Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

А.Л. Бобров, Е.В. Лесных

ОСНОВЫ МАГНИТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Новосибирск 2018

УДК 620.179

Основы магнитного неразрушающего контроля. Учебное пособие / Бобров А.Л., Лесных Е.В. - Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2018. – 108 с.

В учебном пособии изложены физические и технологические основы магнитных методов неразрушающего контроля технических объектов, в первую очередь – деталей подвижного состава железных дорог. Наиболее подробно рассмотрены аспекты магнитопорошкового неразрушающего контроля.

Пособие полезно для студентов бакалавриата, изучающих методы неразрушающего контроля направления «Стандартизация и метрология» по дисциплине «Неразрушающий контроль объектов железнодорожного транспорта» и студентов магистратуры направления «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» по дисциплине «Неразрушающий контроль машин и механизмов», а также специалистов неразрушающего контроля и технологов при изучении магнитного контроля и подготовке к сертификации.

Рассмотрено и рекомендовано к изданию в качестве учебного пособия на заседании редакционно-издательского совета СГУПС

Ответственный редактор
к.т.н., доцент Бояркин Е.В.

Рецензенты:
декан электромеханического факультета ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», к. т. н., доцент Жаров А.В.
кафедра «Электроснабжение» Физико-технического института ФГАОУ ВО «Северовосточный федеральный университет имени М.К. Амосова»

© Бобров А.Л.,
Лесных Е.В.,
2018, СГУПС

Содержание

Введение 4
1. Теория магнетизма 5
1.1 Основы. Магнитное поле. Его характеристики 5
1.2 Магнитные свойства материалов 11
2. Намагничивание и магнитные свойства ферромагнетиков 16
2.1 Кривая первоначального намагничивания 16
2.2 Циклическое перемагничивание 21
2.3 Размагничивающий фактор 26
3. Создание магнитного поля разными намагничивающими устройствами 28
3.1 Магниты как намагничивающие устройства 28
3.2 Магнитные поля вокруг магнитов 32
3.3 Магнитные поля вокруг проводников с током 33
4. Виды токов, применяемых в магнитной дефектоскопии 37
5. Физические принципы магнитной дефектоскопии 45
5.1 Поля рассеяния дефектов 45
5.2 Осаждение частиц магнитного порошка над дефектами 50
5.3 Феррозондовая дефектоскопия 51
6. Технология магнитопорошкового контроля 57
6.1 Этапы и способы магнитопорошкового контроля 57
6.2 Подготовка деталей и средств контроля 60
6.3 Намагничивание 63
6.3.1 Полюсное намагничивание 64
6.3.2 Циркулярное намагничивание 71
6.3.3 Комбинированное намагничивание 81
6.4 Выбор магнитного индикатора и его нанесение на поверхность детали 82
6.5 Осмотр и идентификация дефектов 89
6.5.1 Освещение для магнитных частиц, видимых в обычном свете 89
6.5.2 Ультрафиолетовое освещение 91
6.5.3 Измерение освещенности 92
6.5.4 Ложные индикации 93
6.5.5 Типы выявляемых дефектов 95
6.6 Измерители величины магнитного поля 98
6.7 Размагничивание деталей 102
Заключение 106
Библиография 107

ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающий контроль деталей вагонов, локомотивов и специального (самоходного и несамоходного) подвижного состава является важной составляющей ремонтных работ и надежности эксплуатации подвижного состава. В составе каждого предприятия, осуществляющего изготовление и ремонт деталей и узлов подвижного состава, находится подразделение, обеспечивающее контроль их технического состояния. При этом, магнитными методами контролируются практически все детали подвижного состава, подвергаемые неразрушающему контролю. Широкая распространенность магнитных методов при контроле объектов железнодорожного транспорта требует от специалистов, занимающихся обеспечением качества продукции на предприятиях знаний в области магнитных методов неразрушающего контроля и владения технологиями и оборудованием с помощью которых этот контроль осуществляется.

В пособии рассмотрены основные принципы магнитных методов неразрушающего контроля. Физические основы даны в упрощенном представлении, достаточном для понимания основных принципов работы магнитных методов контроля, а для их расширенного изучения рассмотренных вопросов требуется специализированная литература [1, 2]. Вопросы практического применения магнитного контроля рассмотрены на примере магнитопорошкового метода неразрушающего контроля, как самого распространенном при контроле деталей подвижного состава. Для подробного изучения других методов контроля целесообразно обратиться к специализированной литературе, приведенной в библиографическом списке.

Магнитный контроль получил широкое распространение благодаря тому, что изделия из сплавов железа (ферромагнитного материала) часто используются для удовлетворения потребностей человека. Именно особые магнитные свойства железа и его сплавов привели к развитию магнитных методов контроля. Магнитный контроль в ряде случаев достаточно дешево и надежно позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты и осуществлять другие задачи неразрушающего контроля.

Данное пособие будет полезно для студентов, знакомящихся в рамках учебной программы с методами магнитного неразрушающего контроля, персонала, осуществляющего неразрушающий контроль магнитными методами объектов железнодорожного транспорта и ориентированного на сдачу экзаменов при сертификации по магнитному виду.

Авторы выражают благодарность коллегам из научно-исследовательской лаборатории «Физические методы контроля качества» СГУПС, принявшим активное участие в обсуждении концепции и содержания учебного пособия.

1. ТЕОРИЯ МАГНЕТИЗМА

1.1 Основы. Магнитное поле. Его характеристики.

Магнетизм – это форма взаимодействия движущихся электрически заряженных частиц. Можно сказать, что магнитное поле это силовое поле, возникающее вокруг движущихся электрических зарядов, которое воздействует на другие заряды. Для описания воздействия этого поля на движущийся заряд вводится понятие магнитной индукции.

Магнитная индукция $\vec{B}$ - силовая характеристика магнитного поля, характеризующая его интенсивность и направление в точке пространства, векторная величина. Это значит, что она характеризуется в каждой точке поля численным значением и направлением в пространстве.

В системе единиц СИ магнитная индукция измеряется в «Теслах», Тл.

В системе единиц СГС – в “Гауссах”, Гс.

1Тл = 10^4 Гс;

1 Гс = 10^{-4} Тл.

Движущаяся заряженная частица формирует вокруг себя магнитное поле и влияет на другие частицы, находящиеся в этом поле. При одновременном движении большого количества заряженных частиц создаваемое ими магнитное поле будет равно сумме полей, создаваемых отдельными частицами. Таким способом можно создать достаточно сильные магнитные поля. Движение больших

потоков заряженных частиц мы назовем электрическим током. *Электрический ток* – направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц: электронов, ионов и др. Условно за направление электрического тока принимают направление движения положительных зарядов. В металлах подвижными носителями заряда являются электроны, то есть отрицательно заряженные частицы, поэтому направление тока в них противоположно направлению движения зарядов.

Силовое воздействие магнитного поля, создаваемого током, как оказалось, зависит не только от силы тока, но и от свойств среды в которой взаимодействие происходит. Поэтому для описания магнитного поля ввели ещё одну величину - вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}$, который зависит:

– от силы тока,

– размеров и формы источника, создающего магнитное поле,

– от места расположения точки по отношению к этому источнику;

Единицей измерения напряженности магнитного поля является - А/м.

1 А/см = 100 А/м.

Напряженность магнитного поля также является векторной величиной. Вектор $\vec{H}$ в изотропной среде связан с вектором магнитной индукции соотношением:

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

Где $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м.* - *магнитная проницаемость вакуума* или магнитная постоянная.

μ - *относительная магнитная проницаемость*, показывающей, во сколько раз сила взаимодействия в данной среде больше чем в вакууме при одном и том же значении напряжённости магнитного поля.

Магнитные поля на чертежах изображают замкнутыми непересекающимися кривыми, которые называют магнитными силовыми линиями. Силовые линии проводят таким образом, чтобы касательные к ним в любой точке были параллельны вектору индукции магнитного поля в этой точке, а их плотность (количество линий, проходящих через площадку в 1 м^2) была пропорциональна модулю этого вектора. Магнитные поля являются непрерывными в пространстве и

убывающими до близких к нулю значений на больших расстояниях от проводника с током так, что таким магнитным полем уже можно пренебречь и считать отсутствующим.

Магнитная стрелка в магнитном поле устанавливается по направлению магнитных силовых линий. В соответствии с этим магнитным силовым линиям приписывают направление, совпадающее с направлением, указываемым северным концом магнитной стрелки компаса (так как на северном полюсе находится южный магнитный полюс Земли).

Участок поверхности тела, из которого выходят магнитные силовые линии, условно назвали *Северным* магнитным полюсом «*N*», а другой, участок поверхности, на котором силовые линии входят в тело, – *Южным « S»*

Магнитное поле в магнитных методах НК используется для намагничивания и размагничивания проверяемых объектов.

При магнитном контроле $\vec{B}$ раскладывают на две составляющие (рис.1):

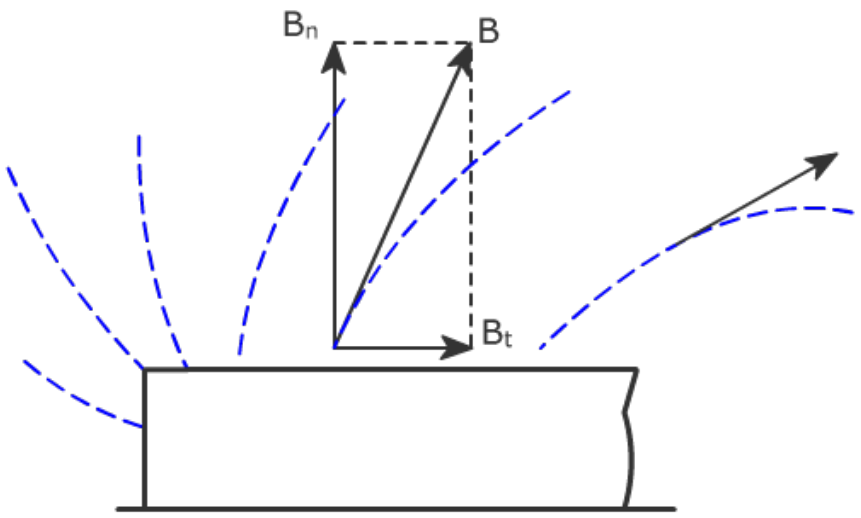


Рисунок 1 - Разложение вектора магнитной индукции на нормальную B_n и тангенциальную B_t составляющие

– нормальную составляющую B_n, направленную перпендикулярно к поверхности проверяемой детали;

– тангенциальную B_t, направленную вдоль поверхности или параллельно поверхности детали.

Напряженность магнитного поля также раскладывают на нормальную H_n и тангенциальную H_t составляющие напряженности магнитного поля, которые можно измерить у поверхности любого твердого объекта.

При введении в магнитное поле материала он в зависимости от собственных магнитных свойств может искажать силовые линии внутри него и вокруг.

Ещё одной характеристикой магнитного поля является *магнитный поток Ф* - поток вектора магнитной индукции через какую-либо поверхность.

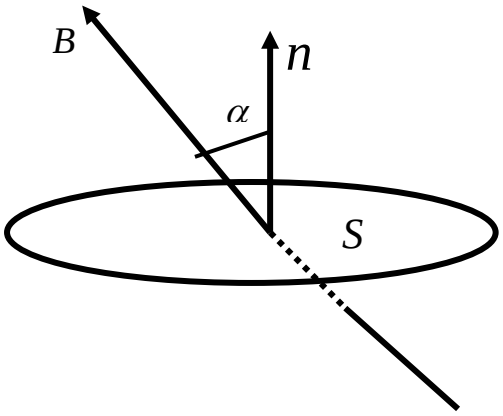


Рисунок 2 – Иллюстрация к вычислению магнитного потока

Единица измерения магнитного потока – 1 Вб (вебер).

В однородном поле (в котором магнитная индукция соседних точек практически не отличается друг от друга) магнитный поток *Ф*, пронизывающий плоскость *S*, нормаль которой расположена под углом α к магнитным силовым линиям (рис.2), равен:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha, \qquad (1)$$

где *S* – площадь, м^2.

Единица измерения магнитного потока – 1 Вб (вебер).

Таким образом, магнитный поток *Ф* графически характеризуется количеством линий магнитного поля проходящих через заданное сечение, а магнитная индукция *B* – их плотностью.

Из рис. 3 видно, что если мы лист развернем по отношению к потоку, то через него будет проходить меньше силовых линий, то есть поток будет слабее. А

если лист повернем вдоль силовых линий, то есть поток пройдет мимо, *cos* α станет для угла 90 ° равным 0 и поток также станет равным нулю через такой лист (если, конечно, пренебречь его толщиной).

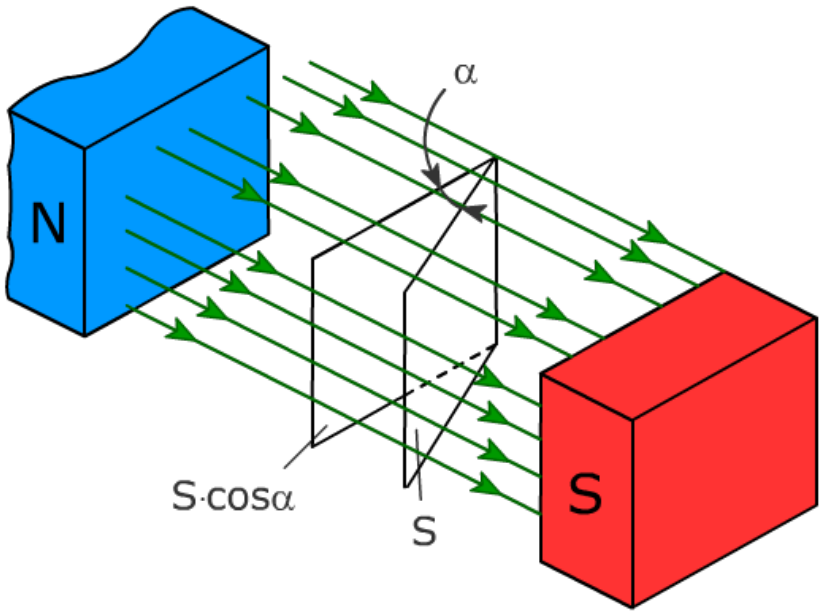


Рисунок 3 - Магнитный поток *Ф* через площадку *S*, расположенную под углом α к магнитным силовым линиям

Наиболее простые и часто встречающиеся примеры магнитного поля проводников с током приведены на рис. 4 и 5. Сплошными линиями на рис. 4 и штриховыми линиями на рис. 4 обозначены силовые линии магнитного поля. Каждая силовая линия – кривая, на которой напряженность магнитного поля направлена по касательной в каждой точке. Направление силовых линий определяется по **правилу буравчика**.

Если буравчик вращать так, чтобы его поступательное движение совпадало с направлением тока в проводнике, то направление движения рукоятки укажет направление силовых линий.

Внутри соленоида (рис. 4) магнитное поле близко к однородному. Вокруг проводника с током (рис. 5) возбуждается убывающее магнитное поле.

Напряженность вокруг проводника с током зависит от полного тока, охватываемого каждой линией *l*. На примере рисунка 5 видно, что ток течет только по проводнику, охватываемому линиями, и в данном случае для каждого контура

он будет одинаков. Напряженность магнитного поля при этом можно определить по формуле:

$$H = \frac{I}{2\pi r},$$

где $2\pi r$ – длина силовой линии l, I– сила тока.

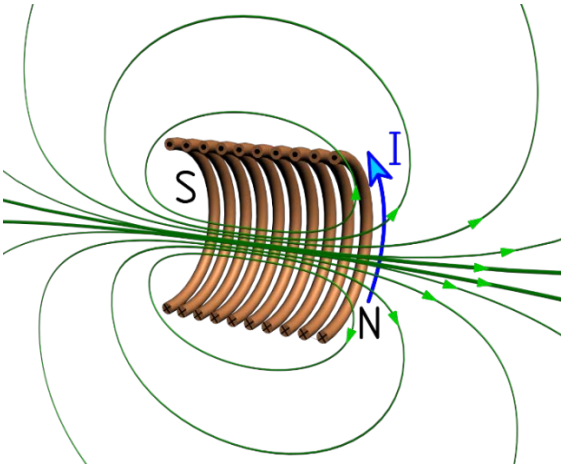


Рисунок 4 – Магнитное поле соленоида или катушки

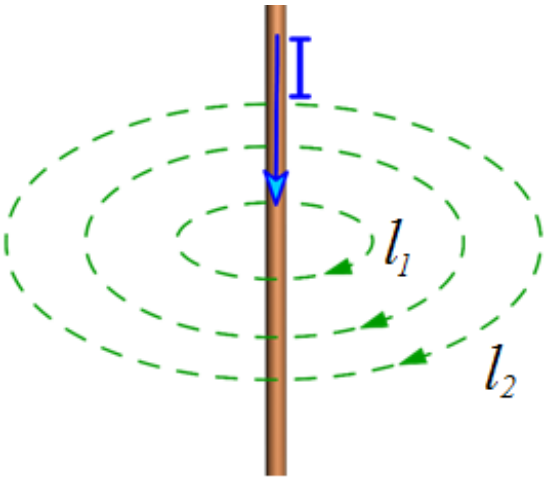


Рисунок 5 – Магнитное поле проводника с током

Так же магнитные поля могут создаваться постоянными магнитами (рис. 6), в которых силовые линии идут частично внутри магнита от полюса к полюсу, а частично по внешнему пространству, и их большая часть сосредоточена на кратчайшем расстоянии от полюса к полюсу.

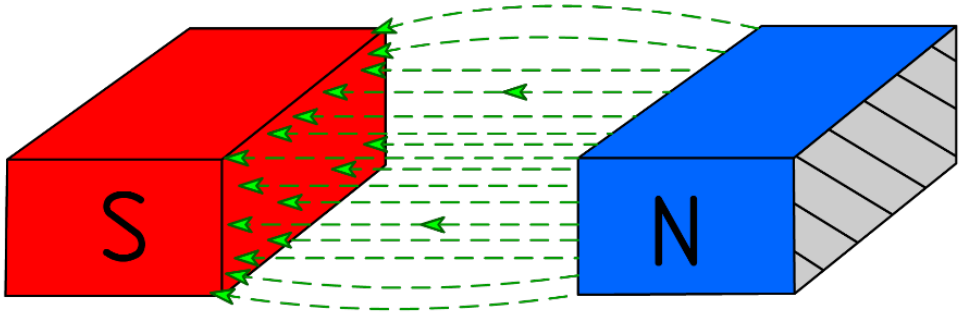


Рисунок 6 – Магнитное поле постоянных магнитов

Таким образом магнитное поле обладает следующими свойствами:

– силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, никогда не

пересекаются и проходят через любую среду, в том числе вакуум;

– магнитное поле взаимодействует только с движущимися электическими зарядами, с неподвижными – не взаимодействует;

– магнитные поля складываются друг с другом;

– магнитные поля непрерывны в пространстве;

– при большом удалении от источника магнитные поля ослабевают настолько, что ими можно пренебречь.

1.2 Магнитные свойства материалов

Магнитный момент

Магнитным моментом контура с током называется вектор, модуль которого равен произведению силы тока в контуре на площадь, ограниченную этим контуром, а направлен он по нормали к плоскости контура в сторону, определяемую по правилу правого винта.

$$P_m = IS\vec{n}$$

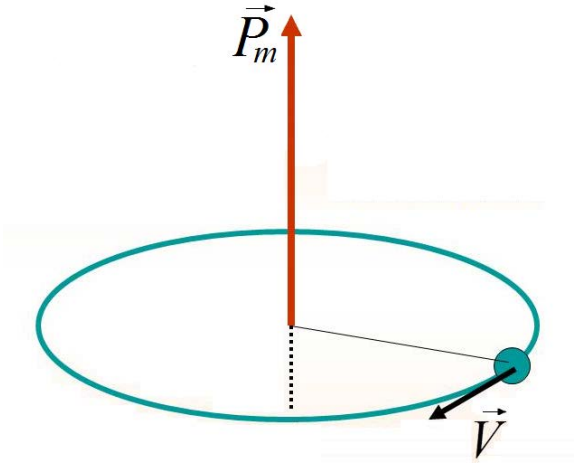


Рисунок 7 – Движение электрона вокруг ядра и его магнитный момент

Магнитное поле маленького контура с током по своей структуре сходно с полем короткого постоянного магнита и быстро спадает при удалении от контура. Если такой контур поместить в магнитное поле, то на него будет действовать момент силы, равный

$$M = P_m B sin\alpha$$

Где α – угол между вектором индукции магнитного поля и вектором магнитного момента.

Таким образом, при внесении контура в магнитное поле он стремится установиться так, чтобы вектор индукции магнитного поля был направлен перпендикулярно плоскости контура. При этом направление собственного поля контура будет совпадать с направлением внешнего поля.

Как известно, все окружающие нас вещества состоят из атомов. Каждый атом состоит из положительно заряженного ядра в котором сосредоточена практически вся масса атома, и отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг ядра по замкнутым орбитам. Такое движение электронов в атоме можно рассматривать как электрический ток, поэтому каждый электрон создаёт свой магнитный момент (рис. 7), который называется орбитальным. Кроме того, каждый электрон обладает ещё собственным магнитным моментом. Магнитный момент всего атома складывается из орбитальных и собственных магнитных моментов всех электронов входящих в состав атома. Если атомы вещества в отсутствие внешнего магнитного поля имеют магнитные моменты равные нулю, то такое вещество называется диамагнитным. Если магнитные моменты атомов не равны нулю, то вещество называется парамагнитным.

Когда какой либо материал попадает в магнитное поле, то внутри него создаётся внутреннее поле атомов, которое, складываясь с внешним полем, усиливает или ослабляет его.

По значению μ все материалы делят на три группы:

Диамагнитные, у которых μ на несколько миллионных или тысячных долей меньше единицы (μ < 1. Относительная магнитная проницаемость некоторых диамагнетиков приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Относительная магнитная проницаемость некоторых диамагнетиков

Вещество	Висмут (Bi)	Серебро (Ag)	Медь (Cu)	Вода
μ	0,999825	0,999981	0,9999897	0,999991

К диамагнетикам относятся инертные газы (He, Ne, Ar, Kr, Xe), некоторые металлы (медь, бериллий, цинк, серебро, золото, ртуть, висмут), неорганические соединения (H_2O, CO_2), кристаллы (NaCl, Al_2O_3, CuCl, PbO, $AgNO_3$, $PbSO_4$, $BiCL_3$), органические соединения (метан, бензол, нафталин, октан и др.).

В диамагнитных материалах (рис. 8) внешнее магнитное поле незначительно ослабляется. Под воздействием внешнего поля у атомов диамагнетика появляются магнитные моменты направленные против поля, создающие внутреннее поле атомов, которое, складываясь с внешним, ослабляет его.

Диамагнитные вещества выталкиваются из магнитного поля.

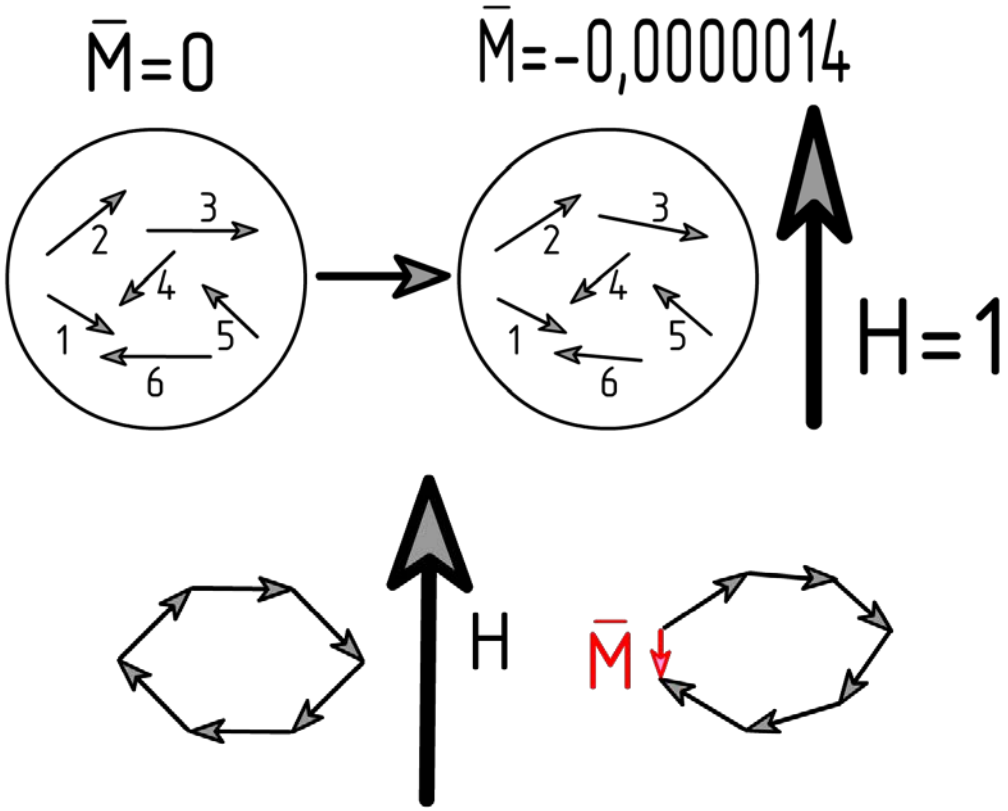


Рисунок 8 – Поведение диамагнетика во внешнем магнитном поле

Парамагнитные, у которых μ на несколько миллионных или тысячных долей больше единицы (μ > 1).

К парамагнетикам относятся такие вещества: Al, Li, Na, K, Ti, V, U, O_2, NO, MnO, $CuCl_2$, $NiSO_4$ и др.

Парамагнитные материалы в отличие от диамагнетиков незначительно усиливают внешнее магнитное поле. Во внешнем поле магнитные моменты атомов ориентируются в направлении, совпадающем с этим полем, поэтому их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, усиливая его. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле.

Относительная магнитная проницаемость парамагнетиков на тысячные доли выше единицы.

Ферромагнитные, у которых μ велико, выражается сотнями, тысячами и изменяется в зависимости от интенсивности магнитного поля. Они сильно притягиваются магнитным полем. К ним относятся *железо (Fe), никель (Ni),*

Вещество	Железо (Fe)	Сталь обычного качества	Кобальт (Co)	Никель (Ni)	Ферриты
μ_{max}	5000-200 000	500-2000	250	600	40-17000

кобальт (Co), гадолиний (Gd), их сплавы и некоторые соединения, например, оскиды железа. Кроме того магнитная проницаемость ферромагнитных материалов меняется при намагничивании сложным образом, что будет рассмотрено в следующем разделе, а максимальное значение некоторых распространенных ферромагнетиков приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Максимальная относительная магнитная проницаемость некоторых ферромагнетиков

Контрольные вопросы

1. *Что такое магнитное поле?*
2. *Какими основными свойствами обладает магнитное поле?*
3. *Как формируется магнитное поле вокруг соленоида?*
4. *Как формируются силовые линии магнитного поля вокруг прямолинейного проводника с током?*

5. *Классификация материалов по магнитным свойствам.*
6. *Чем отличаются разные материалы по магнитным свойствам?.*
7. *Что такое постоянные магниты?*
8. *Что такое магнитные полюса?*
9. *Как связаны между собой магнитная индукция и магнитная проницаемость?*
10. *Как направлены силы, действующие на заряженные частицы (ток) в магнитном поле.*
11. *Что такое магнитный поток?*
12. *Приведите примеры диамагнетиков, парамагнетиков и ферромагнетиков.*

2. НАМАГНИЧИВАНИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

2.1 Кривая первоначального намагничивания

Ферромагнетизм – магнитно упорядоченное состояние макроскопических объемов вещества (ферромагнетика), в котором магнитные моменты атомов (ионов) параллельны и одинаково ориентированы. Однако эти объемы, внутри которых магнитные моменты соседних атомов ориентированы одинаково, не бесконечны и не занимают всего объекта, иначе такие объекты были бы полностью намагничены всегда. В размагниченном состоянии ферромагнитный объект состоит из доменов (участков величиной в десятки микрометров), в которых магнитные моменты атомов P_m направлены одинаково даже при отсутствии внешнего намагничивающего поля, но у соседних доменов суммарные магнитные моменты могут быть направлены в разных направлениях, особенно в размагниченном состоянии. На рисунке 9 приведен пример размагниченного ферромагнетика с суммарным магнитным моментом, равным 0, когда три домена имеют направления намагничивания приводящие к такому состоянию.

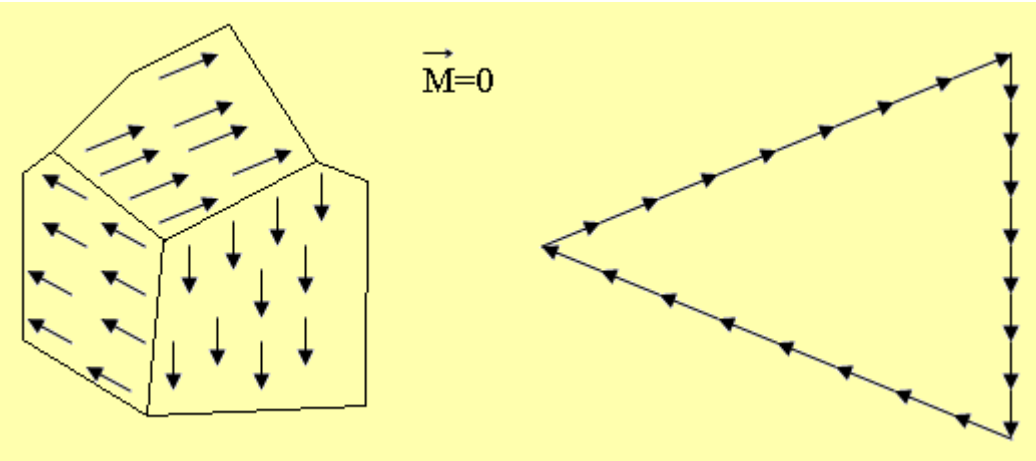


Рисунок 9 – Ферромагнитный объект, состоящий из трех доменов и магнитные моменты его отдельных частиц

В пределах каждого домена ферромагнетик спонтанно намагничен до насыщения в наиболее удобном направлении, обеспечивающим минимальную свободную энергию материала и обладает определенным суммарным магнитным

моментом входящих в него частиц.

Ферромагнетики обладают:

- высокими значениями магнитной проницаемости;

- доменной структурой, при этом при намагничивании домены, магнитные моменты которых направлены в том же направлении что и внешнее намагничивающее поле, начинают расти за счет остальных доменов, разворачивая магнитные моменты соседних доменов в направлении намагничивания;

- обладают гистерезисом при перемагничивании, то есть не все магнитные моменты, при снятии внешнего намагничивающего поля, возвращаются в первоначальное направленное состояние;

Домены имеют размеры порядка 1-10 мкм. Каждое кристаллическое зерно разбивается на несколько доменов с различной ориентацией магнитных полей. Это обычно бывает при отсутствии внешнего поля.

В размагниченном материале магнитные поля доменов направлены хаотично и компенсируют друг друга так, что результирующее поле всех доменов в детали практически равно нулю. В этом случае говорят, что такой ферромагнетик размагничен.

Искажение магнитного поля, происходящее при внесении в него диамагнитных или парамагнитных тел незначительно. Напротив, магнитное поле искажается весьма существенно, если в него будут помещены ферромагнитные тела.

Железный образец, обладающий проницаемостью в сотни и тысячи раз большей, чем проницаемость вакуума, вбирает в себя магнитное поле. Это явление называется намагниченностью.

Намагничивание ферромагнитных материалов под действием внешнего поля объясняется тем, что поля отдельных областей (доменов) устанавливаются по направлению внешнего поля, их магнитные поля при этом суммируются. В результате образуется сильное поле намагниченной детали.

Намагниченность проверяемой детали зависит от напряженности поля H, действующего на эту деталь.

Намагниченностью называется суммарный магнитный момент единицы объёма вещества

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{P}_{mi}}{V}, \qquad (4)$$

где $\vec{M}$ (А/м) - намагниченность материала; V – объем, м^3.

Кривой первоначального намагничивания (КПН) называют график функции *B = f (H),* которую получают постепенным увеличением H из состояния *B = 0* и *H = 0* до B_{max} (рисунок 10).

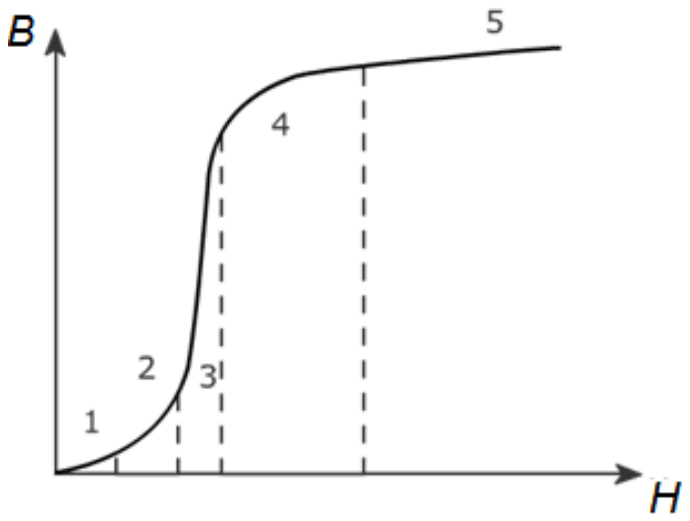


Рисунок 10 - Изображение кривой первоначального намагничивания

Намагничивание – это процесс смещения доменных границ, заключающийся в том, что домены, энергетически более выгодно ориентированные в отношение намагничивающего (приложенного) поля, начинают расти за счет доменов, ориентированных менее выгодно. Рост этих доменов происходит путем смещения границ в сторону доменов, ориентированных противоположно или под большим углом к магнитному полю.

На КПН можно выделить пять участков, на каждом из которых преобладает определенный механизм намагничивания. Участок *1* (рис.9) соответствует обратимым смещениям доменных границ. В области Рэлея (*2*) имеют место наряду

с обратимыми также необратимые процессы смещения, и зависимость B*(H)* здесь квадратична.

Наиболее крутой участок КПН (*3*) соответствует максимальной восприимчивости и связан с необратимыми смещениями доменных границ. В области приближения к насыщению (*4*) основную роль играют процессы вращения намагниченности M_s к направлению намагничивающего поля. Наконец, участок *5* характеризуется слабым ростом намагниченности. Для магнитопорошкового контроля изделия обычно можно намагнитить до конца области 3 – начала области 4. Вид КПН зависит от скорости намагничивания, поэтому приводимые кривые обычно характерны для очень медленного намагничивания.

Магнитная индукция $\vec{B}$ характеризует суммарное магнитное поле, складываемое из внешнего поля и намагниченности того материала, в котором оно измеряется (рисунок 11):

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}), \tag{5}$$

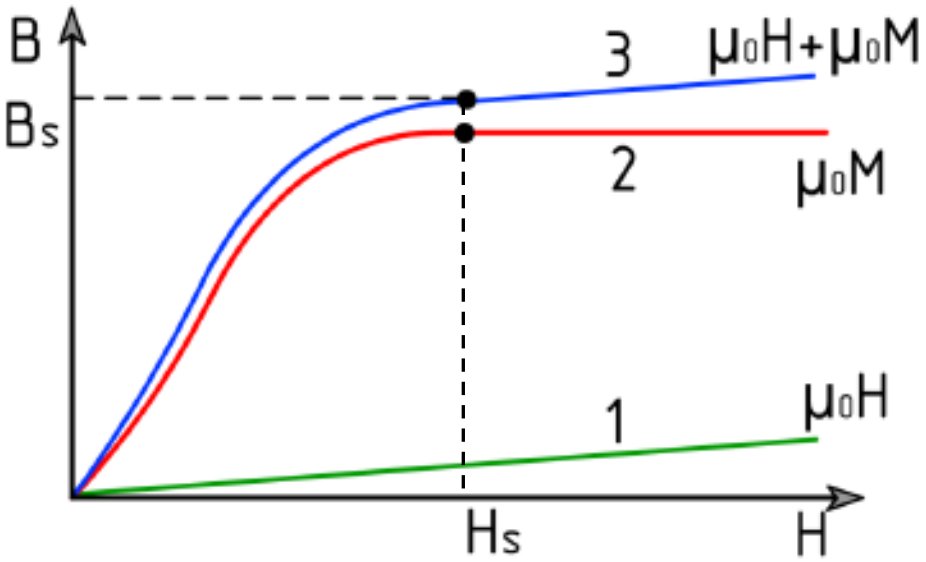


Рисунок 11 – Кривая первоначального намагничивания

В ферромагнетике μ зависит от напряженности магнитного поля *H*, воздействующего на объект, и изменяется по кривой, представленной на рисунке 12. Это происходит потому, что фактически магнитная проницаемость отражает отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля, исходя из формулы 2. Таким образом, абсолютная магнитная проницаемость является

отношением двух катетов *c* к *b* в выделенном треугольнике, а такое отношение, как известно, равно тангенсу угла α.

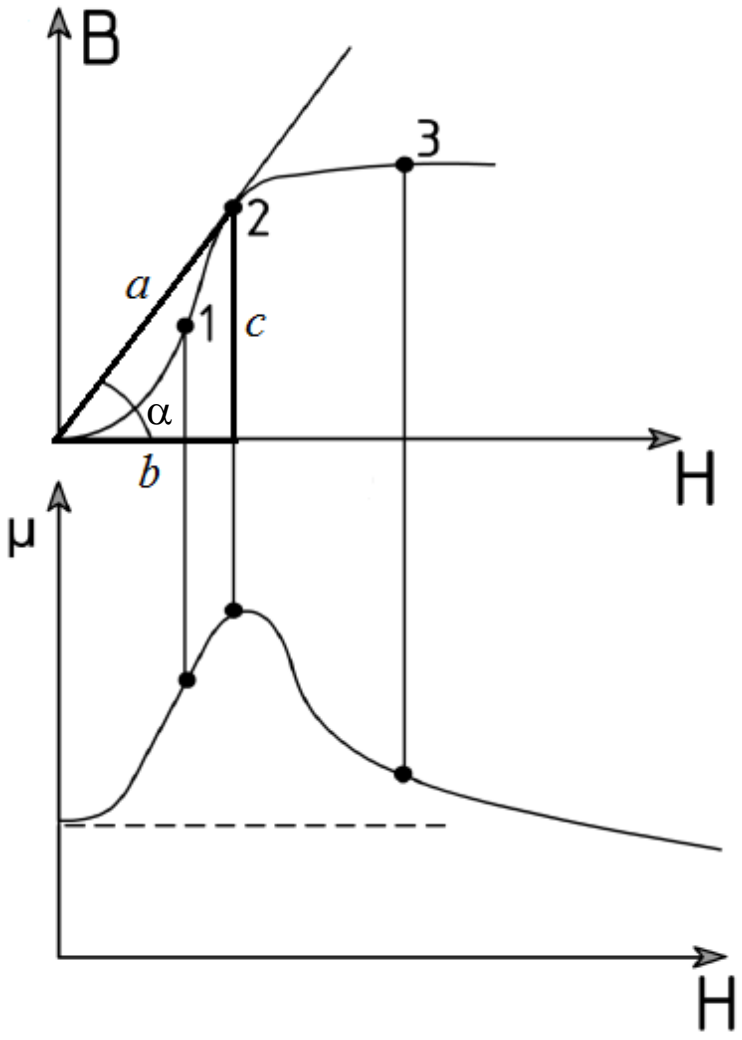


Рисунок 12 – Связь магнитной проницаемости с кривой первоначального намагничивания и напряженностью магнитного поля.

Как видно из графика на рис. 12, относительная магнитная проницаемость сначала возрастает, а затем уменьшается, и максимум приходится на точку 2, так как максимальный угол α приводит к максимальному значению тангенса. Кроме того, в начальный момент намагничивания деталь имеет отличное от нуля значение магнитной проницаемости, так как кривая имеет уже какой-то наклон, пусть и относительно небольшой. Обычно начальная магнитная проницаемость в 2-5 раз меньше максимального значения этого параметра.

В дальнейшем повышение напряженности магнитного поля правее точки 2 приводит к постепенному снижению угла наклона гипотенузы треугольника и, соответственно, к постепенному снижению магнитной проницаемости.

2.2 Циклическое перемагничивание

При намагничивании детали переменным или периодически изменяющимся по направлению постоянным полем имеет место *циклическое перемагничивание* (рис. 13).

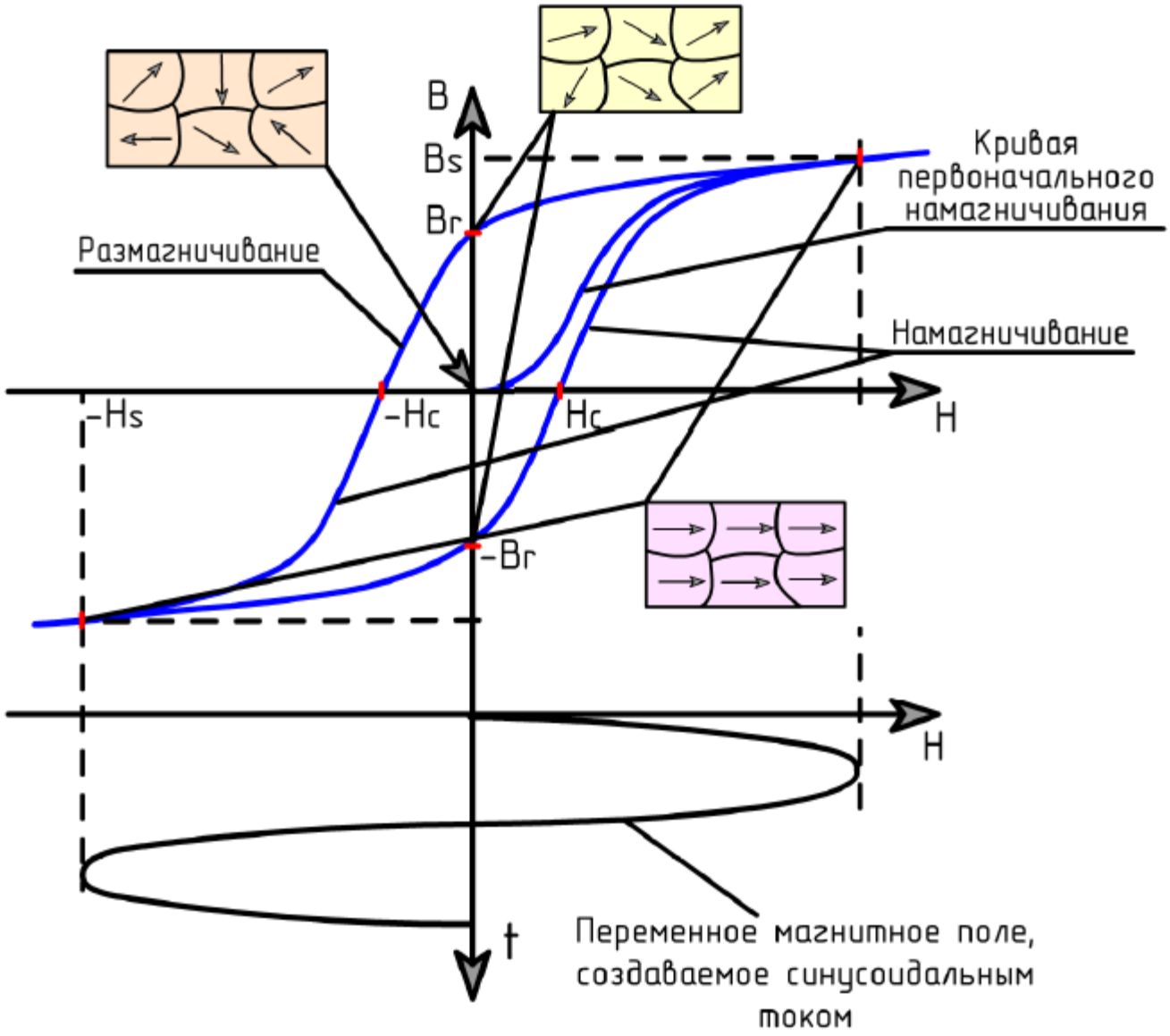


Рисунок 13 – Петля гистерезиса ферромагнетика и ее основные фазы

При перемагничивании ферромагнетика в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии, то есть материал нагревается. Эти потери обусловлены потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи. Потери на гистерезис пропорциональны площади петли гистерезиса. Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика. Чем выше сопротивление – тем меньше потери на вихревые токи.

Слово гистерезис произошло от греческого hysterēsis – запаздывание. Гистерезис объясняется необратимыми изменениями, проявляющимися в различном течении прямых и обратных процессов. Характерная особенность магнитного гистерезиса – «отставание» намагниченности тела от напряженности намагничивающего поля.

Гистерезис препятствует намагничиванию ферромагнитных материалов. Его можно сравнить с внутренним трением. Более того развороты магнитных моментов действительно приводят к нагреву материала и ширина петли гистерезиса свидетельствует о величине энергии переходящей в тепло. Чем шире петля гистерезиса – тем больше нагревается материал при перемагничивании.

В ферромагнитных материалах из-за явления гистерезиса при уменьшении напряженности H магнитная индукция B убывает не по кривой первоначального намагничивания, а по кривой, лежащей несколько выше нее. Когда же внешнее магнитное поле исчезает совсем, то в ферромагнитном материале сохраняется некоторая остаточная индукция B_r, величина которой определяется магнитными свойствами материала и характером магнитных воздействий, предшествовавших рассматриваемому состоянию. Остаточная индукция B_r принимает максимальное значение в том случае, если ферромагнитный материал предварительно намагнитить до насыщения, а затем напряженность магнитного поля уменьшить до нуля.

B_s – индукция технического насыщения.

H_s – напряженность магнитного поля, при которой достигается состояние технического магнитного насыщения материала образца.

B_r – остаточная индукция, т. е. оставшаяся в детали после снятия поля H_s (остаточная намагниченность).

Индукция B обращается в нуль лишь под действием поля H_c, имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряженность H_c называется коэрцитивной силой.

H_c – коэрцитивная сила (от лат. coërcitio – удерживание) – это напряженность магнитного поля, которое нужно приложить встречно намагниченности детали (предварительно намагниченной до насыщения), чтобы её полностью размагнитить.

Величины H_s, B_r, H_c являются основными магнитными характеристиками ферромагнетика и приводятся в справочниках.

Петля гистерезиса, достигающая области насыщения, называется предельной (максимальной) петлёй гистерезиса. Петля гистерезиса симметрична относительно начала координат.

Существование остаточной намагниченности делает возможным изготовление постоянных магнитов, т.е. тел, которые без затраты энергии на поддержание макроскопических токов обладают магнитным моментом и создают в окружающем их пространстве магнитное поле. Постоянный магнит тем лучше сохраняет свои свойства, чем больше коэрцитивная сила материала, из которого он изготовлен.

В зависимости от величины работы, необходимой для перемагничивания единицы объема ферромагнетика за один цикл перемагничивания, все ферромагнитные материалы разделяют на две группы: магнитомягкие (с узкой петлёй гистерезиса) и магнитотвердые (с широкой петлёй гистерезиса).

Материалы с узкой предельной петлей гистерезиса называют магнитомягкими и их обязательно надо контролировать способом приложенного поля и у них значения B_r и H_C малые. Условно к магнитомягким относят низко- и среднеуглеродистые и низколегированные стали, у которых $B_r \leq 0{,}53$ Тл, а $H_C \leq 9{,}5$ А/см. Среди деталей подвижного состава это колесная сталь, осевая сталь и большинство деталей тележки и автосцепного устройства. Материалы, у которых

значения остаточной индукции и коэрцитивной силы больше указанных числовых значений, относят к магнитотвердым и их можно контролировать способом остаточной намагниченности. К таким деталям относят кольца подшипников, ролики, шестерни и зубчатые колеса, некоторые разновидности валов тягового и самоходного подвижного состава. К магнитотвердым материалам относятся углеродистые и легированные конструкционные стали (хромистые, вольфрамовые, кобальтовые), а также специальные сплавы, используемые для постоянных магнитов.

Конструкционные стали относятся, как правило, к группе ферромагнитных материалов с нормальными петлями гистерезиса, у которых отношение остаточной индукции $\mathbf{B_r}$ к максимальной $\mathbf{B_s}$ на предельной петле гистерезиса почти постоянно и равно 0,5-0,7.

Как правило, магнитотвердые материалы обладают более низкими значениями магнитной проницаемости по отношению к материалам из магнитотвердых материалов.

Следует учесть, что магнитные характеристики существенным образом зависят не только от марки стали (химического состава), но и от режима термообработки.

При проведении магнитного контроля на ремонтных предприятиях выполненный ранее режим термообработки деталей, как правило, неизвестен. В таких случаях можно воспользоваться:

– прибором для измерения коэрцитивной силы материала изделия – коэрцитиметром или;

– имеющейся связью между твердостью и магнитными характеристиками сталей.

К магнитомягким материалам наряду с низкоуглеродистыми сталями и железоникелевыми сплавами относятся чугуны. Чугун как магнитомягкий материал имеет ряд особенностей по сравнению со сталью, а именно: его магнитные свойства меньше зависят от механических напряжений; меньше влияние температуры и вибрации на его магнитные свойства. Кроме того,

чугунным отливкам можно легче придать выгодную для магнитного контроля конфигурацию.

В зависимости от назначения берутся ферромагнетики с той или иной характеристикой. Так, магнитомягкие материалы используют для статоров и роторов электромашин и магнитопроводов электромагнитных устройств (трансформаторы, дроссели, реле и т.д.). Магнитотвердые материалы применяют для постоянных магнитов, у которых коэрцитивная сила может быть повышена до 10^6 А/м.

Если технического насыщения не достигается, получаемая петля называется частным циклом или промежуточной. Частных циклов существует бесконечное множество, все они лежат внутри максимальной петли гистерезиса.

Если ферромагнитное тело подвергается действию полей одного знака, то такая петля так же называется частной петлёй гистерезиса (рис.14).

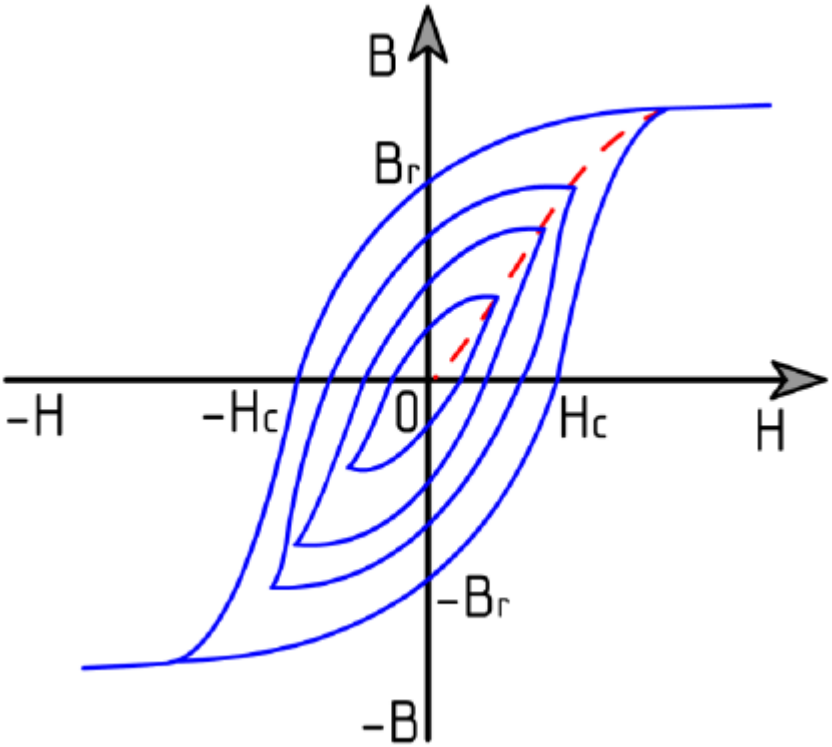


Рисунок 14 – Семейство частных петель гистерезиса, образуемых при намагничивании напряженностью меньшей, чем до насыщения

Важно отметить, что при достижении определенной температуры магнитная проницаемость ферромагнитных тел резко падает до значения, близкого к единице.

Эта температура, характерная для каждого ферромагнитного вещества, носит название точки Кюри по имени французского физика Пьера Кюри (1859—1906).

В ферромагнетиках при температуре выше *точки Кюри* тепловое движение атомов кристалла разрушает доменную структуру и ферромагнетизм исчезает: *ферромагнетик становится парамагнетиком*. Домены при этом исчезают. У железа точка Кюри равна 767 °С, у никеля - 360 °С, у кобальта - около 1130 °С. Таким образом, при нагреве металла постепенно уменьшается его ферромагнетизм, который можно полностью убрать, а ферромагнетик – размагнитить. Для того, чтобы в нем появилась остаточная индукция, его придётся вновь намагничивать.

Подводя итоги магнитным свойствам ферромагнетиков, можно сказать, что они обладают следующими характерными свойствами:

- любой ферромагнетик состоит из доменов – участков, внутри которых элементарные магнитные моменты имеют одинаковое направление;
- намагничивание полностью размагниченного ферромагнетика происходит по кривой первоначального намагничивания;
- перемагничивание изделия происходит по петле гистерезиса;
- зависимость магнитных свойств материала от температуры и величины точки Кюри;
- силовые линии магнитного поля, если в него будут помещены ферромагнитные тела перераспределяются таким образом, что большая их часть проходит внутри ферромагнетика.

2.3 Размагничивающий фактор

Так как любые детали имеют конечную длину, то при их продольном намагничивании (рис. 16) получается так, что в детали силовые линии направлены от одного полюса к другому, а снаружи, там где находятся частицы, силовые линии направлены в противоположную сторону. Чем короче деталь, тем большая величина и концентрация силовых линий, направленных в противоположную сторону около поверхности. Эти противоположные силовые линии ослабляют силу притяжения частиц к дефекту. Поэтому, чем короче деталь, тем слабее частицы

порошка на ее поверхности, намагниченной продольно, будут притягиваться к дефекту. Такое действие называется – размагничивающим фактором и для коротких деталей требуется их удлинение для снижения его влияния.

Влияние размагничивающего фактора достаточно сложное и зависит от формы, размеров намагничиваемого объекта и его магнитных свойств. Именно из-за размагничивающего фактора на каждом типе деталей приходится экспериментально определять степень ее намагниченности на поверхности контроля.

Контрольные вопросы

1. *Что характеризует кривая первоначального намагничивания?*
2. *Как влияет скорость намагничивания на кривую намагниченности?*
3. *Как можно определить магнитную проницаемость по кривой намагничивания?*
4. *Какие характеристики ферромагнетика можно определить по петле гистерезиса?*
5. *Что такое – предельная петля гистерезиса?*
6. *Что такое – семейство петель гистерезиса?*
7. *Что характеризует точка Кюри?*
8. *Что такое домены?*
9. *Как ведут себя магнитные моменты доменов при намагничивании и размагничивании?*
10. *Чем отличаются магнитомягкие и магнитотвердые материалы.*

3. СОЗДАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАЗНЫМИ НАМАГНИЧИВАЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Возникает вопрос, каким же образом возможно создание магнитного поля и перемагничивание, описываемое петлей гистерезиса.

Магнитное поле можно в любом объекте создать только двумя способами:

– поднесением намагниченного объекта (постоянного магнита), силовые линии которого будут пронизывать объект, а в силу его высокой магнитной проницаемости, силовые линии даже будут стараться проходить через объект намагничивания (рисунок 15) и таким образом намагничивать;

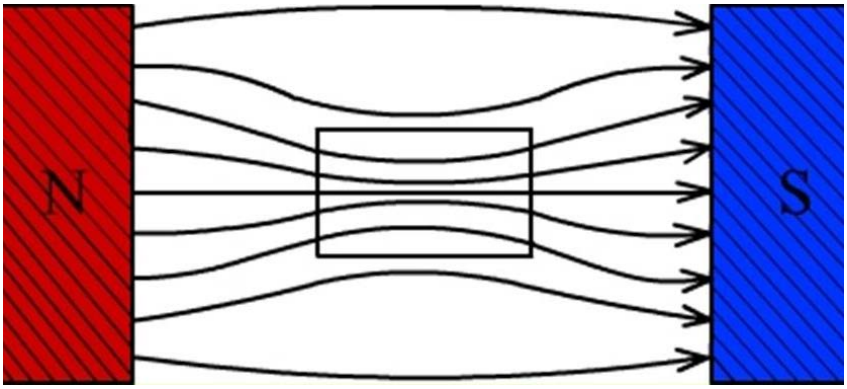


Рисунок 15 – Намагничивание объекта в поле постоянного магнита

– расположением рядом с намагничиваемым объектом проводника с током, который создает магнитное поле вокруг себя, намагничивая объект.

Второй способ более распространен и имеет различные варианты применения, которые мы и рассмотрим в этой главе.

3.1. Магниты как намагничивающие устройства

Под магнитом понимается тело, обладающее способностью намагничивать (притягивать или отталкивать) предметы из железа и некоторых других металлов благодаря действию своего магнитного поля.

Магниты разделяются на два класса:

– постоянные магниты;

– электромагниты.

Изделие определенной разомкнутой формы, например, в виде подковы, полосы или стержня из предварительно намагниченного материала, способного сохранять значительную магнитную индукцию в течение длительного времени после устранения намагничивающего поля, называют постоянным магнитом (рис.16).

Если магнитные поля доменов сохраняют или имеют преимущественную ориентацию после прекращения воздействия магнитного поля, то об этом материале говорят, как о постоянно намагниченном.

Если намагниченный стержень согнуть в петлю с плотно сжатыми или сваренными торцами, то магнитное поле будет полностью содержаться в замкнутой цепи внутри намагниченного материала.

Для использования магнитной энергии постоянных магнитов в магнитопроводе создают воздушный зазор определенных размеров и конфигурации. Магнитное поле, создаваемое магнитами, используют для намагничивания объектов из ферромагнитных материалов.

При делении магнита на части каждая из них представляет собой магнит с двумя полюсами. Отделить северный полюс от южного полюса не представляется возможным.

Считают, что магнитные силовые линии выходят из северного магнитного полюса и входят в южный полюс.

Известно, что одноименные магнитные полюсы отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

Если стержневому магниту придать подковообразную форму, полярность сохранится, но при этом магнитное поле и силовые линии будут в значительной степени сконцентрированы в промежутке между концами стержня. Чаще для намагничивания используются постоянные магниты *U* – образной формы, которые называют подковообразными магнитами или ярмом.

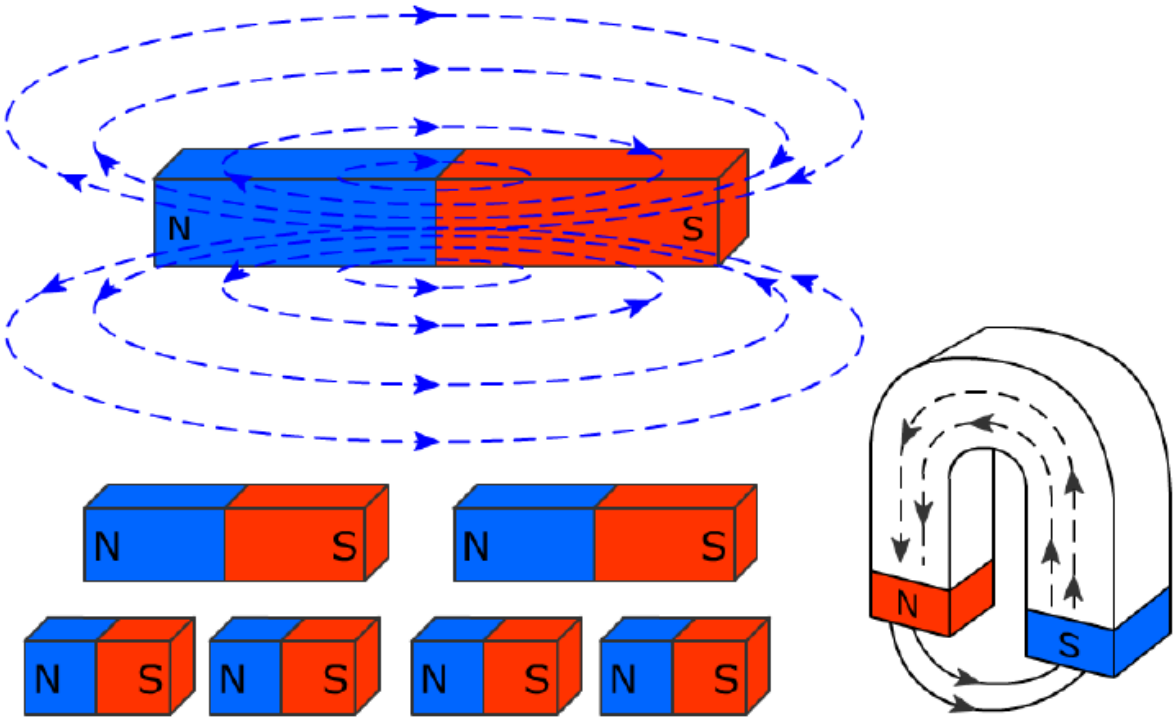


Рисунок 16 - Постоянный магнит

Постоянные магниты применяются в качестве автономных (не потребляющих энергии) источников магнитного поля.

Недостатком постоянных магнитов является то, что ими не всегда можно сильно намагнитить объект, а также регулировать намагниченность объектов.

Магнитный поток постоянного магнита с течением времени уменьшается. Это явление называется старением магнита. Старение может быть обратимым и необратимым.

В случае обратимого старения при воздействии на постоянный магнит ударов, толчков, резких колебаний температуры, внешних постоянных полей происходит снижение его остаточной магнитной индукции B_r на 1…3%; при повторном намагничивании свойства таких магнитов восстанавливаются.

Более надежным, стабильным и управляемым устройством является электромагнит (рисунок 17), который состоит из катушки, по которой течет ток, и магнитопровода (ферромагнитного сердечника) с высокой магнитной проницаемостью. По катушке течет ток создающий магнитное поле, которое практически полностью сконцентрировано в сердечнике и зависит от силы тока в

катушке и количества витков. В катушках можно создать очень мощное магнитное поле с большой напряженностью, рассчитываемой по формуле:

$$H = \frac{I \cdot N}{\sqrt{l^2 + d^2}}, \qquad (6)$$

где N – число витков катушки; l – длина катушки; d – ее диаметр.

Так как магнитное поле катушки с ферромагнитным сердечником практически полностью сконцентрировано внутри сердечника, магнитный поток в любом сечении сердечника практически один и тот же.

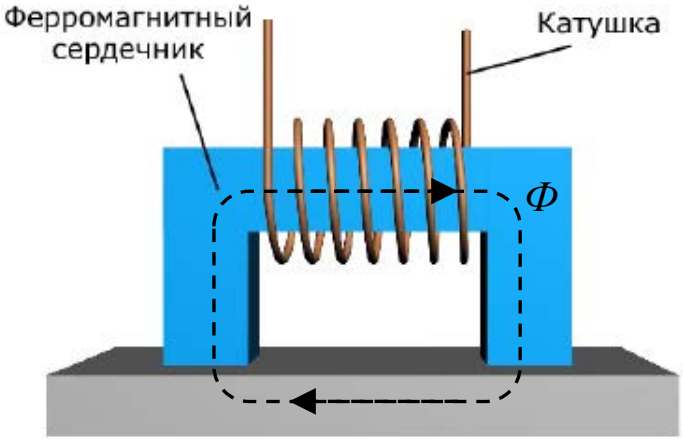


Рисунок 17 - Электромагнит

Электромагниты состоят из железного сердечника с обмоткой. Сердечники электромагнитов теряют свою намагниченность, когда внешнее поле удаляется. С этой точки зрения они могут быть названы «временными магнитами».

3.2. Магнитные поля вокруг магнитов

Магнитные силовые линии в различных точках пространства по отношению к магниту имеют различную плотность и направление. Если рассматривать магнит в виде цилиндра, то наибольшая интенсивность поля наблюдается на торцевых поверхностях, а наименьшая – в средней части цилиндрической поверхности.

Сила притяжения или отталкивания у магнита в разных местах различна; больше всего она на его концах — полюсах.

С увеличением расстояния от намагниченного образца интенсивность поля быстро уменьшается.

Ферромагнитные материалы можно намагнитить путем соприкосновения с постоянным магнитом или размещением их очень близко к магниту.

Магнитное поле, в каждой точке которого векторы магнитной индукции имеют равные значения, называется однородным.

Примером однородного поля является поле в средней части межполюсного пространства электромагнита с бесконечными плоскопараллельными полюсными наконечниками или внутри бесконечного соленоида (рис.18).

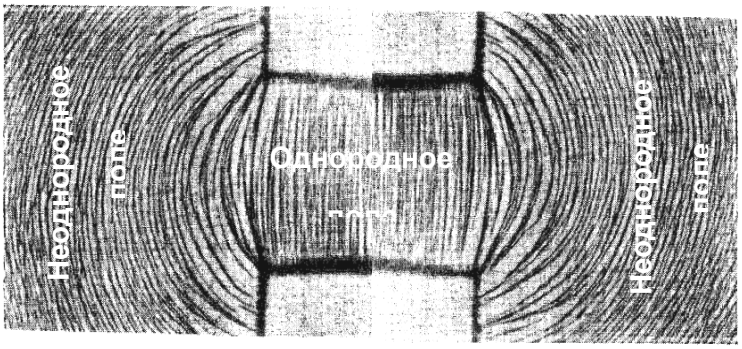


Рисунок 18 – Магнитное поле в пространстве между двумя близко расположенными полюсами постоянных магнитов

При использовании стержневого магнита один из полюсов устанавливают на намагничиваемое изделие. Силовые линии наведенного (индуцированного) магнитного поля будут проходить между точкой контакта (или наибольшего сближения) и полюсом индуцирующего магнита. Если стержневой магнит используется для намагничивания пластины или подобного ей объекта большой площади, то поле будет распространяться в радиальных направлениях от точки

приложения магнита. Силовые линии подковообразного магнита являются прямыми между полюсами и радиально направленными непосредственно у полюсов.

3.3. Магнитные поля вокруг проводников с током

Намагничивание ферромагнитных материалов с помощью электрического тока можно осуществить путём:

а) *Прямого намагничивания* – пропусканием тока по изделию (рисунок 19) или его участку в результате использования ферромагнитного материала в качестве электрического проводника.

б) *Непрямого или наведенного намагничивания* – путем помещения детали во внешнее электромагнитное поле.

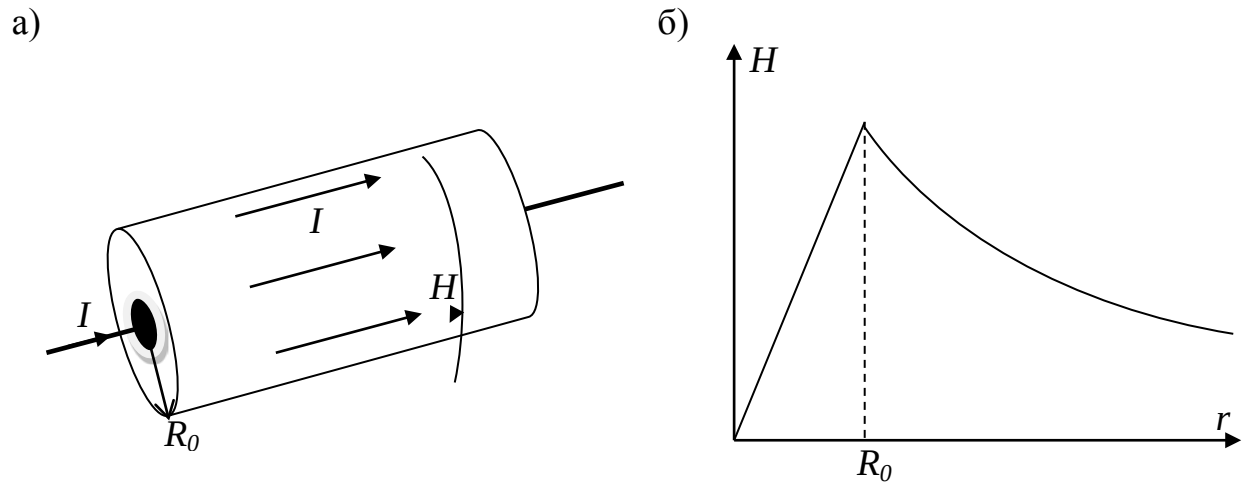


Рисунок 19 - Магнитное поле проводника: пропускание тока по детали (а) и распределение магнитного поля внутри и вокруг такого проводника (б)

Проводник может представлять собой стержень (прямой провод) или быть выполненным в виде одного или большего числа витков - катушкой.

Магнитные поля, возникающие вокруг деталей и проводников с токами, являются чаще всего неоднородными.

Проводник с количеством витков более одного называют соленоидом. Магнитные поля вокруг каждого витка катушки суммируются и образуют единое поле. В центре катушки магнитное поле направлено вдоль ее оси (рисунок 20),

достаточно сильное и однородное, поэтому часто изготавливают соленоиды, внутри которых помещают детали для намагничивания и последующего контроля.

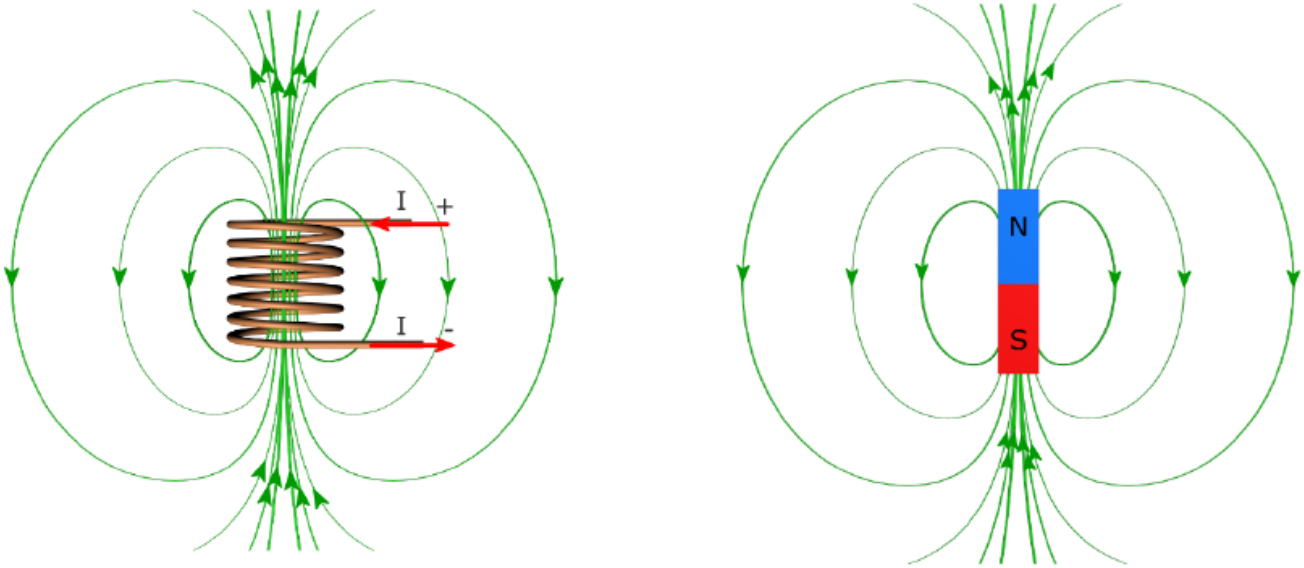


Рисунок 20 - Магнитное поле соленоида (а) и постоянного магнита (б)

Направление поля вокруг проводника с током может быть определено по правилу буравчика (штопора).

Для того, чтобы определить полный магнитный поток, проходящий через поверхность всех витков, нужно сложить потоки, проходящие через поверхности отдельных витков, или, иначе говоря, сцепляющиеся с отдельными витками.

Суммарный магнитный поток, пронизывающий все витки контура, называется потокосцеплением Ψ (пси):

$$\psi = \sum_{i=1}^{n} \Phi_n \tag{7}$$

Для замкнутого тороида, на котором намотано N витков кабеля с током:

$$\psi = \Phi \cdot N \tag{8}$$

где Ф – магнитный поток через один виток; N – число витков.

Потокосцепление Ψ, как и магнитный поток Ф, измеряется в веберах (Вб).

Величина магнитного потока, проходящего внутри соленоида зависит от

числа его витков N, силы тока I и его размеров. Произведение $N \cdot I$ называется намагничивающей силой соленоида.

Напряжённость магнитного поля соленоида H определяется по формуле 6, однако в практике магнитопорошкового контроля чаще используют короткие соленоиды с большим диаметром, чтобы удобно было осматривать детали в приложенном поле. Поэтому при использовании формулы 6 и пренебрегая малой длиной l, можно использовать приближенную формулу для напряженности магнитного поля, формируемого в центре такого соленоида:

$$H = \frac{N \cdot I}{d}. \qquad (9)$$

Внутри соленоида поле считается достаточно однородным, однако при приближении к его внутренним стенкам оно постепенно увеличивается. Вне соленоида напряженность магнитного поля значительно слабее. Так как при намагничивании в соленоидах контролируемые части детали находятся на оси соленоида, но выходят за пределы его торцов, чтобы оценить напряженность поля на их поверхностях надежнее всего использовать экспериментальную оценку с помощью измерительных приборов (миллитесламетров, магнитометров и т.п.).

Существуют другие способы намагничивания с помощью проводников с током, например, пропусканием тока через проводник, продетый в полую деталь (рисунок 21).

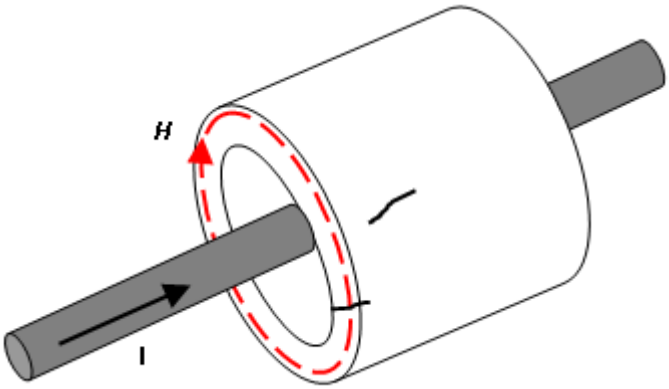


Рисунок 21 – Намагничивание пропусканием тока по центральному проводнику

В таком случае эффективно намагничиваются все поверхности полой детали, однако магнитное поле при этом замкнуто в детали и выявляет только продольные дефекты (почему это происходит подробно изложено в разделе 5). Существуют и другие способы намагничивания, получившие меньшее распространение.

Контрольные вопросы

1. *Что такое соленоид?*
2. *Из каких компонентов состоит электромагнит?*
3. *От каких параметров зависит напряженность поля в центре катушки с током?*
4. *Что такое постоянный магнит?*
5. *Как распределяется напряженность магнитного поля в проводнике с током и около него?*
6. *Чем отличаются прямое и наведенное намагничивание?*
7. *Назовите достоинства и недостатки постоянных магнитов для намагничивания?*

4. ВИДЫ ТОКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

При проведении магнитопорошкового контроля намагничивание деталей осуществляют с помощью:

– переменного синусоидального тока;

– однополупериодного выпрямленного тока;

– двухполупериодного выпрямленного тока;

– выпрямленного однополупериодного и двухполупериодного трехфазного тока;

– постоянного тока;

– импульсного тока.

В таблице 3 приведены основные параметры применяемых для намагничивания токов.

Для получения переменного магнитного поля, как правило, используют переменный синусоидальный ток промышленной частоты (50Гц) или повышенной частоты (100 ÷ 400Гц).

Для получения постоянного магнитного поля используют постоянный или выпрямленный ток.

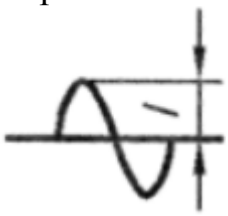
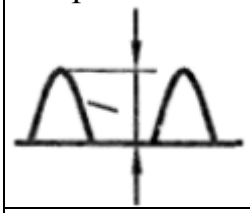
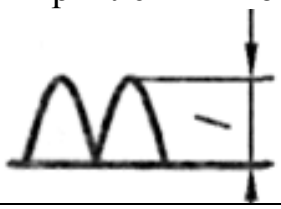
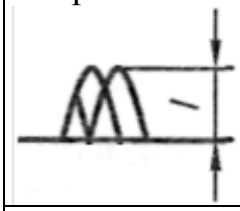
Наиболее распространены переменный и постоянный токи при проведении магнитопорошкового контроля, но часто так же используют импульсный ток.

Импульсный ток – одиночные импульсы малой длительности постоянного или переменного тока.

При контроле способом приложенного поля рекомендуется использование переменного, постоянного и выпрямленных токов. Накопление порошка над дефектом определяется действующим значением тока.

При контроле способом остаточной намагниченности рекомендуется использование импульсного тока, но можно использовать постоянный и выпрямленные токи. При этом измеряют амплитудное значение импульсного тока, т. е. остаточная намагниченность определяется амплитудой намагничивающего тока.

Таблица 3 – Виды токов, применяемых для намагничивания и их основные характеристики

Форма волны	**Пиковое значение**	**Среднее значение**	**Действующее значение**
Переменный ток 	I	0	$0{,}707I$ $(=\frac{I}{\sqrt{2}})$
Переменный однополупериодный выпрямленный ток 	I	$0{,}318I$ $(=\frac{I}{\pi})$	$0{,}5I$
Переменный двухполупериодный выпрямленный ток 	I	$0{,}637I$ $(=\frac{2}{\pi}I)$	$0{,}707I$ $(=\frac{I}{\sqrt{2}})$
Трехфазный однополупериодный выпрямленный ток 	I	$0{,}826I$	$0{,}840I$
Трехфазный двухполупериодный выпрямленный ток	I	$0{,}955I$ $(=\frac{3}{\pi}I)$	
Импульсный ток	I	-	-

Переменный ток

Ввиду больших преимуществ переменного тока перед постоянным током он быстро вошел в употребление и теперь применяется почти повсеместно. Пользование переменного тока дает ряд преимуществ:

– доступен и удобен, так как используется в бытовых и промышленных сетях;

– может применяться при любом способе намагничивания;

– силу переменного тока можно менять в широких пределах;

– не требует специального ухода за таким оборудованием, как аккумуляторы.

Переменный ток является широко распространенным источником питания, с помощью которого получают другие виды электрического тока.

Большие намагничивающие токи можно получить при помощи понижающих трансформаторов, когда напряжение на соленоиде меньше напряжения сети. Поэтому блок питания таких намагничивающих устройств включает трансформатор, который является достаточно громоздким и сложным компонентом.

Намагничивание детали переменным током, приводит к образованию на поверхности детали вихревых токов. Из-за малой величины электрического сопротивления металлических магнитопроводов вихревые токи могут достигать значительных величин. В свою очередь вихревые токи в контролируемой детали образуют собственное магнитное поле, которое направлено навстречу потоку, их создавшему.

Взаимодействие встречных магнитных потоков (намагничивающего устройства и индуцированного вихревыми токами, возникшими в детали вследствие закона электромагнитной индукции) приводит к поверхностному эффекту (скин-эффекту), т. е. резкому уменьшению проникновения переменного электромагнитного поля в глубь материала. Потому переменное магнитное поле внутри ферромагнитного объекта сильно уменьшается и характеризуется глубиной

проникновения, т.е. глубиной проникновения магнитного поля при его уменьшении в *е* раз, то есть примерно в 2,71 раза.

Глубина проникновения переменного поля в приложенном поле с частотой 50 Гц составляет, примерно, 2÷3мм в зависимости от марки стали и формы детали. Для поля с частотой 400Гц ≈ 0,8 мм.

Увеличение частоты поля приводит к уменьшению размагничивающего фактора и улучшению выявления дефектов на деталях сложной формы или с малым удлинением.

Переменный ток более эффективен по сравнению с постоянным током для контроля деталей с малым удлинением, как при контроле в приложенном поле, так и способом остаточной намагниченности.

Под действием вихревых токов контролируемая деталь нагревается. Можно считать, что нагрев стали до 100 °С не вреден для нее. Но если при этом все же возникает какая-либо опасность или трудность, и ток такой силы действительно необходим, то надо применять импульсный ток, сокращая время включения тока.

Достоинства переменного тока:

- легко доступен;

- не оставляет остаточной намагниченности (остаточная намагниченность низкая);

- оборудование можно сделать достаточно легким;

- выявляются в основном поверхностные дефекты, такие как усталостные трещины, которые всегда развиваются с поверхности.

Недостатки переменного тока:

- в приложенном поле происходит нагрев детали за счет вихревых токов; возможно наличие прижогов (применение электроконтактов), которые опасны как зародыши дефектов;

- не проникает глубоко в металл для обнаружения подповерхностных дефектов.

Однако переменный ток вполне применим для продольного намагничивания деталей в соленоидах или электромагнитах. Сердечники электромагнитов в таких случаях должны быть шихтованными.

Переменный ток высокого напряжения легко превратить в ток низкого напряжения соответствующими понижающими трансформаторами. Они сравнительно просты и эффективны и являются лучшим средством получения сильных токов для циркулярного намагничивания.

Постоянный и выпрямленные токи

Постоянный ток протекает по проводнику в одном направлении и имеет не изменяющуюся во времени величину, что создает устойчивые поля в проводниках и катушках.

Постоянный ток может быть получен с помощью:

– выпрямителей, преобразующих переменный ток в постоянный;

– электрических генераторов постоянного тока;

– гальванических элементов (батарей).

Достоинства постоянного тока:

– постоянный ток создает магнитное поле, глубоко проникающее в металл;

– постоянный ток и выпрямленные токи применяют для выявления как поверхностных, так и подповерхностных дефектов. Считают, что постоянный ток наиболее удобен для выявления подповерхностных дефектов (на расстоянии 1 ÷ 3 мм).

– оборудование на аккумуляторных батареях может использовать слаботочные зарядные устройства для их зарядки, а на выходе выдавать большие токи.

Недостатки постоянного тока:

– детали с толщиной стенки более 20 ÷ 25 мм не следует намагничивать постоянным током, так как такие детали после контроля практически невозможно размагнитить;

– аккумуляторные батареи требуют постоянного обслуживания, чтобы они не разряжались; их периодическая замена связана с большими расходами.

Однополупериодный выпрямленный ток

Однополупериодный выпрямитель отсекает все отрицательные полупериодны и оставляет только положительные:

В результате получается пульсирующий ток, который обладает теми же достоинствами, что и постоянный, и вместе с тем имеет дополнительное достоинство: пульсирующий характер тока обеспечивает подвижность магнитных частиц в сухом порошке.

Использование однополупериодного выпрямленного тока и сухого магнитного порошка считается наилучшей комбинацией для выявления подповерхностных дефектов. По этой причине однополупериодный выпрямленный ток используется при контроле сварных швов и литья.

С помощью портативных устройств можно получить выход до 3000 А.

Двухполупериодный выпрямленный ток.

Двухполупериодные выпрямители обеспечивают преобразование переменного тока в постоянный ток. Вместо отсечения отрицательного импульса переменного тока, как это имеет место в однополупериодных выпрямителях, мостовая схема позволяет получить на выходе второй положительный полупериод.

Трехфазный однополупериодный выпрямленный и трехфазный двухполупериодный выпрямленный ток

В промышленности широко используется трехфазный переменный ток. При этом три полупериода следуют друг за другом с фазовой задержкой в 120^0. Если в каждой фазе поставить двухполупериодный выпрямитель, то на выходе получится слабо пульсирующий постоянный ток.

Импульсный ток

Импульсный ток – одиночные импульсы малой длительности постоянного или переменного тока. При этом ток включается только на очень малый промежуток времени порядка тысячных долей секунды.

Преимущество мгновенного намагничивания состоит в том, что при нем можно применять сильный ток от небольших установок.

Импульсный ток глубоко не проникает в материал детали. Выявляются в основном поверхностные дефекты, такие как усталостные трещины, которые всегда развиваются с поверхности.

В приложенном переменном или импульсном поле могут быть обнаружены как поверхностные, так и неглубоко залегающие подповерхностные дефекты.

Применение импульсного намагничивания обеспечивает отсутствие (сводит к минимуму) прижоги на поверхности детали, опасные как зародыши дефектов.

Достоинства импульсного тока:

- глубоко не проникает в материал детали, поэтому им эффективно выявляются в приложенном поле поверхностные дефекты;
- применяют для контроля деталей с малым удлинением;
- не происходит сильный нагрев детали;
- не оставляет прижогов на поверхности металла;
- можно применять сильный ток от небольших установок.

Недостатки импульсного тока:

- имеет малую глубину проникновения и поэтому плохо выявляет подповерхностные дефекты.

Импульсный ток в виде одиночных импульсов однополупериодного тока одного направления эффективен для контроля способом остаточной намагниченности (СОН) с применением кабелей, электроконтактов и других устройств, имеющих небольшие индуктивные сопротивления.

Контрольные вопросы

1. *Перечислите виды токов, применяемых для намагничивания.*
2. *В каких случаях целесообразно применять для намагничивания переменный ток?*
3. *Какие достоинства и недостатки имеет переменный ток?*
4. *В каких случаях целесообразно применять для намагничивания постоянный ток?*
5. *Какие достоинства и недостатки постоянного тока?*

6. *В каких случаях целесообразно применять для намагничивания импульсный ток?*

7. *Какие достоинства и недостатки имеет импульсный ток?*

8. *Какой вид тока наиболее экономичен и почему?*

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

5.1. Поле рассеяния дефекта

Если бездефектный однородный образец ферромагнетика с магнитной проницаемостью μ поместить в продольное постоянное магнитное поле H, он намагнитится и в соответствии со своей кривой намагничивания приобретет магнитную индукцию B, линии которой распределяются равномерно внутри образца, образуют магнитный поток Ф и выходят из поверхности образца только на полюсах (рисунок 22). То, что силовые линии в большинстве своем проходят по ферромагнетику объясняется тем, что внешняя среда (воздух) имеет магнитную проницаемость, значительно меньшую магнитной проницаемости μ ферромагнетика, а плотность силовых линий пропорциональна магнитной проницаемости материала, через который они проходят.

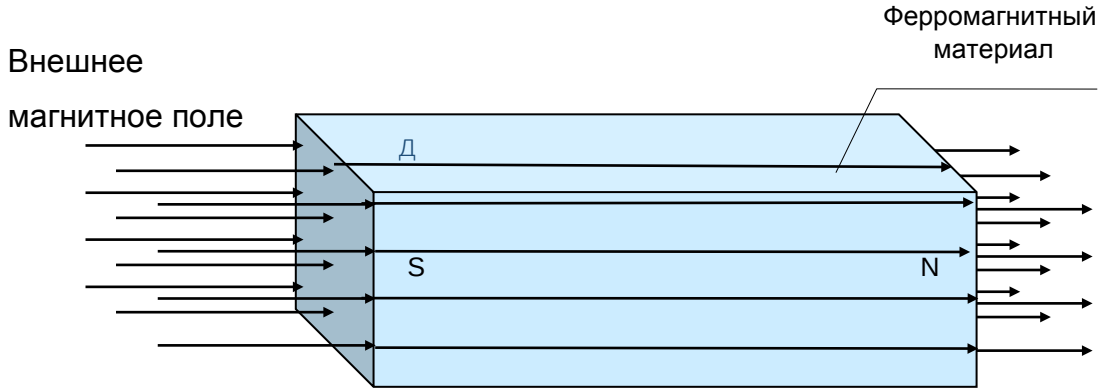


Рисунок 22 – Намагничивание ферромагнетика без дефекта

Если в продольное равномерно распределенное магнитное поле поместить образец ферромагнетика с поверхностной трещиной, ориентированной перпендикулярно направлению поля, то произойдет перераспределение магнитного потока как в пределах профиля трещины, так и в окружающей ее зоне. В части сечения образца, прерванного трещиной, плотность линий существенно снизится. Это приведет к тому, что часть линий индукции, расположенных ниже основания трещины, уплотнится. Значительно меньшая часть линий пойдет через воздушный зазор – полость трещины. Оставшаяся часть магнитных линий неизбежно

преодолеет трещину снаружи по воздуху, как показано на рисунке 23. Участки на детали, из которых выходят и в которые входят силовые линии являются магнитными полюсами. Тогда, если на поверхность намагниченного объекта нанести ферромагнитные частицы в виде порошка, эти частицы будут притягиваться к полюсам.

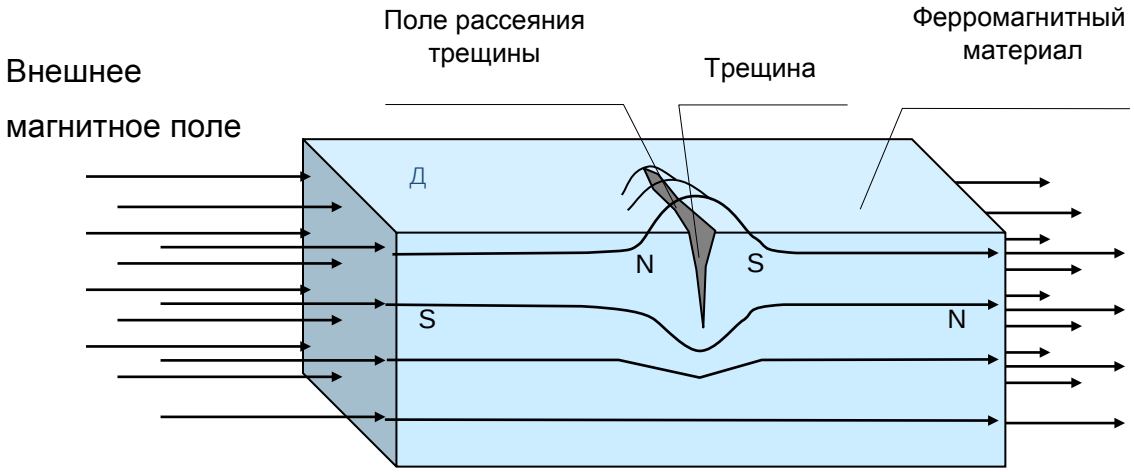


Рисунок 23 – Поле рассеяния над дефектом

Поле рассеяния дефекта максимально, если трещина расположена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Если угол α между силовыми линиями и трещиной меньше 30^0 (трещина T_2 на рисунке 24), то поле дефекта может быть недостаточным для выявления дефекта, так как оно пропорционально sin(α), который для 30 ° равен 0,5, то есть первоначальное искажение поля уменьшается в 2 раза. При $\alpha < 10^0$ (трещина 3 на рисунке 24) - $\sin(\alpha)<0{,}17$, поле ослабевает почти в 6 раз и дефекты не выявляются, так как силы притяжения будут скорее всего недостаточны для того, чтобы задержать частицы порошка на дефекте.

Что же происходит с магнитными частицами порошка, попадающего на намагниченную деталь?

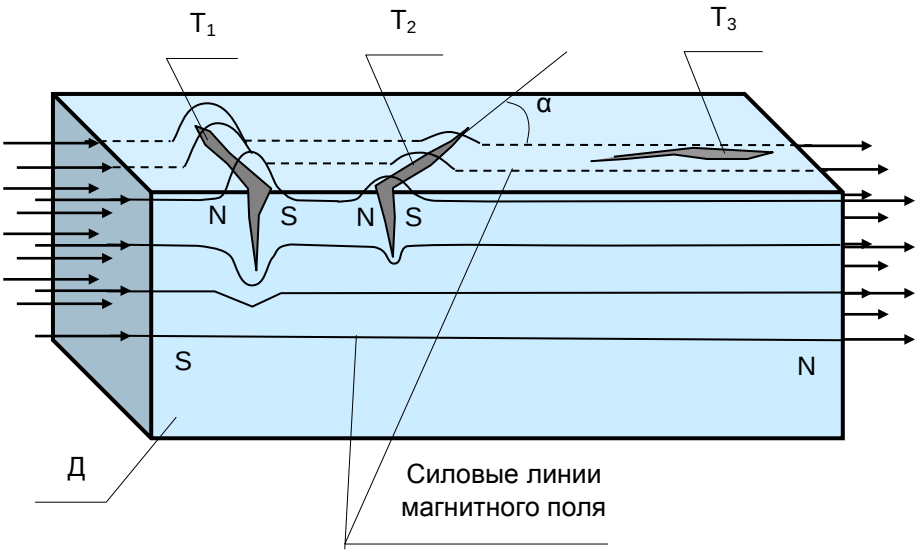


Рисунок 24 – Поля рассеяния над дефектами различной ориентации относительно силовых линий магнитного поля

Во первых: так как разноименные полюса магнитов притягиваются, а одноименные – отталкиваются, в однородном магнитном поле на оба полюса частицы порошка (как элементарного магнита) действуют силы F_1 и F_2, равные по величине, но противоположные по направлению. Они создают вращающий момент, поворачивающий магнит вдоль силовых линий – частицы, попадающие на поверхность намагниченного ферромагнетика, на котором нет дефектов, попадают именно в такое поле и разворачиваются по направлению поля (рисунок 25).

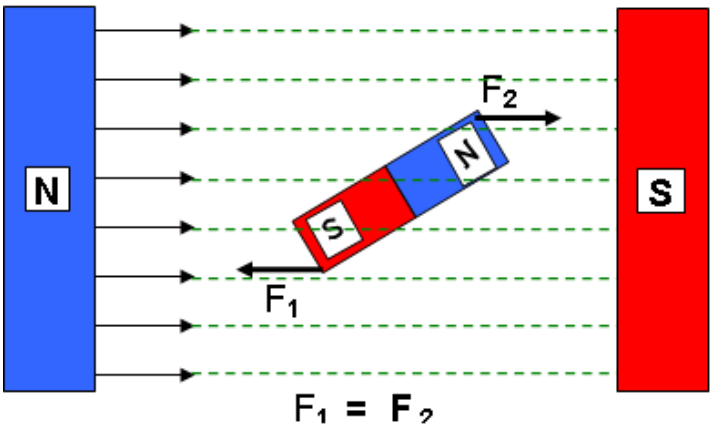


Рисунок 25 – Силы, действующие на частицу магнитного порошка в поле намагниченного бездефектного ферромагнетика

Во вторых: в неоднородном поле сила притяжения $\mathbf{F_1}$ больше силы $\mathbf{F_2}$, поэтому кроме вращающего момента на элементарный магнит действует сила,

заставляющая перемещаться (рисунок 26).

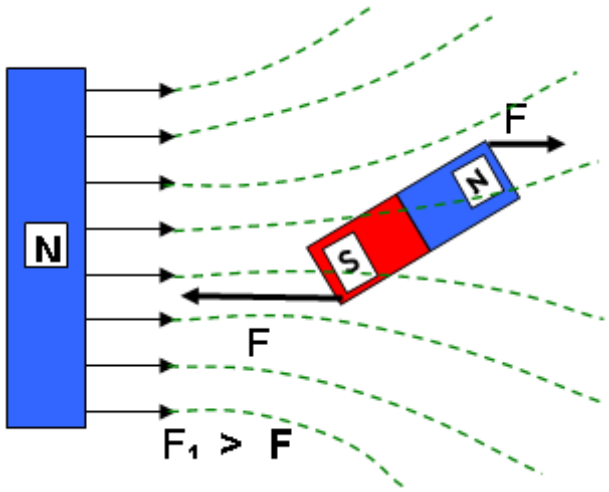


Рисунок 26 – Силы, действующие на частицу в неоднородном магнитном поле

Если силы притяжения к полюсу достаточны, чтобы преодолеть силу трения это приводит к перемещению ферромагнитных частиц к полюсам магнита в область наибольшей плотности силовых линий, выходящих из объекта. А такими участками являются:

– края дефекта,

– на торцы детали, откуда выходят силовые линии поля;

– галтельные переходы, где часть силовых линий так же выходит в воздух;

– у полюсов постоянных магнитов или электромагнитов, установленных на поверхности детали.

Величина сил притяжения к дефекту зависит от размеров дефекта (протяженности, ширины раскрытия, глубины), формы дефекта и глубины его залегания.

Чем больше размеры дефекта, в том числе каждого по отдельности, тем большим магнитом будет являться дефект, и значит большее число магнитных частиц он притянет. Чем глубже дефект находится под поверхностью, тем слабее он как магнит, притягивающий частицы магнитного порошка на поверхности. Чем больше размер подповерхностного дефекта, тем более расплывчатым будет пятно магнитного порошка, собираемого над ним.

Частицы магнитного порошка разворачиваются по направлению силовых линий магнитного поля и движутся вдоль них к полюсам, то есть деталь должна быть намагничена так, чтобы максимальное количество силовых линий было направлено вдоль контролируемой поверхности. Силовые линии напряженности магнитного поля в каждой точке на поверхности объекта могут рассматриваться как линии, которые можно разбить на две составляющие: нормальную – H_n, направленную перпендикулярно поверхности детали и тангенциальную – H_t, направленную вдоль поверхности детали (рисунок 27). Для магнитопорошкового контроля важное значение имеет тангенциальная составляющая, которая и формирует силу притяжения к дефекту вдоль поверхности. А нормальная составляющая наоборот, является вредной, так как частицы направляясь по ней будут разворачиваться и торчком стоять на детали, при этом никуда не перемещаясь. Поэтому важное значение в магнитопорошковом контроле имеет правильное обеспечение нужного направления поля, так чтобы вдоль контролируемой поверхности оно было достаточно большим для притягивания частиц порошка к дефектам, а перпендикулярно поверхности – достаточно малым и не препятствовало проведению контроля.

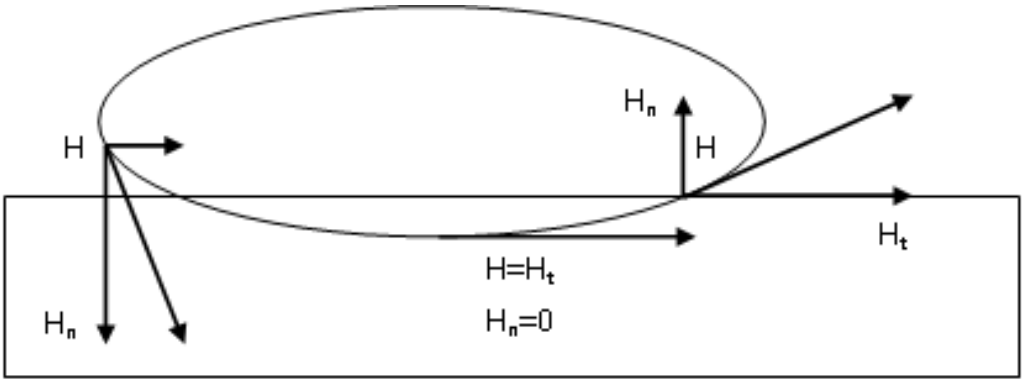


Рисунок 27 – Разложение напряженности магнитного поля на тангенциальную и нормальную составляющие относительно поверхности детали

5.2. Осаждение магнитного порошка над дефектами

Наибольшая плотность магнитных силовых линий поля рассеяния наблюдается непосредственно над дефектом (трещиной) и уменьшается с удалением от него.

Оседание порошка над подповерхностными дефектами менее чёткое и более размытое по сравнению с поверхностными дефектами.

Скопление порошка над дефектом происходит в основном отдельными частицами и короткими цепочками.

Процесс образования цепочек из частиц магнитного порошка называют *магнитной коагуляцией*.

Выявление дефектов непосредственно связано с интенсивностью магнитной коагуляции. На интенсивность магнитной коагуляции оказывают влияние следующие факторы:

– концентрация магнитного порошка;

– магнитные характеристики порошка;

– вязкость дисперсионной среды;

– напряженность намагничивающего поля;

– длительность действия намагничивающего поля.

На частицу в поле рассеяния будут действовать (рис. 28):

$F_з$ – затягивающая сила магнитного поля (пондеромоторная), направленная в область наибольшей плотности магнитных силовых линий, т.е. к месту расположения трещины;

$F_{тр}$ – сила трения;

$F_т$ – сила тяжести;

F_A – сила выталкивающего действия жидкости (Архимедова сила); $F_э$ и $F_м$ силы электростатического и магнитного взаимодействия, возникающие между частицами.

$F_р$ - результирующая сила, под действием которой частицы притягиваются к трещине и накапливаются над ней, образуя скопление порошка.

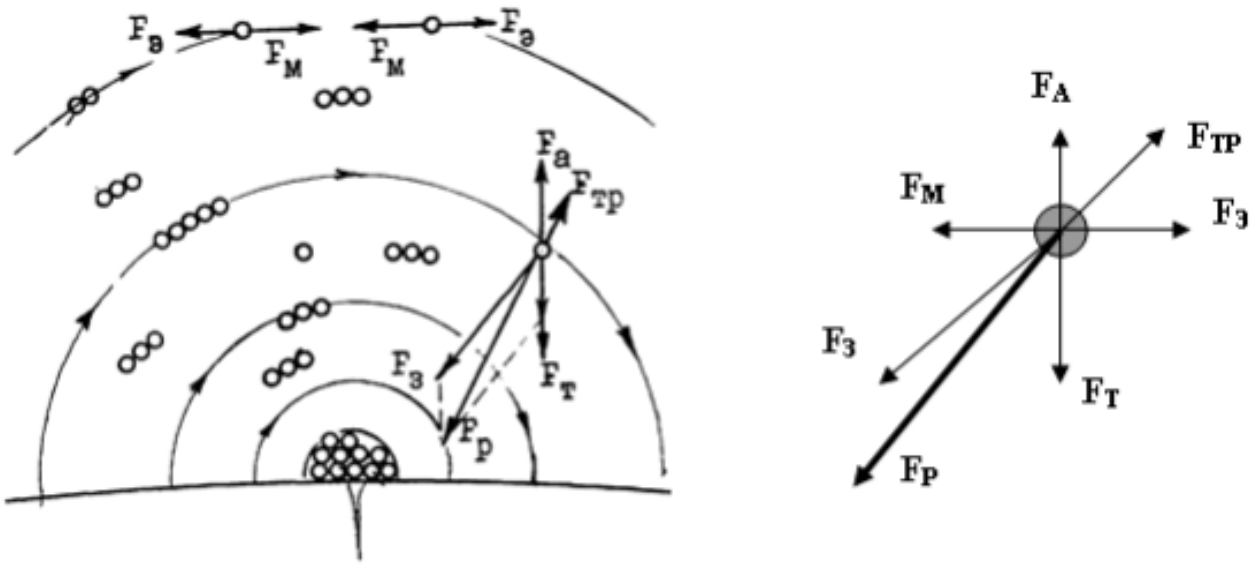


Рисунок 28 – Схема сил, действующих на частицу в поле рассеяния трещины

Картину из осевшего порошка называют индикаторным рисунком или индикацией.

5.3 Феррозондовая дефектоскопия

Все другие методы магнитной дефектоскопии (феррозондовый, магнитнографический, индукционный) используют принцип регистрации изменений нормальной или тангенциальной составляющей магнитного поля при перемещении преобразователя над дефектом в намагниченной детали. Методы отличаются только тем, что используются разные преобразователи: в феррозондовом и индукционном контроле: катушки, работающие по принципу электромагнитной индукции; в магнитнографическом методе: магнитная пленка, намагниченность которой рядом с дефектом изменяется. Наиболее распространенным методом контроля деталей подвижного состава является феррозондовый, поэтому рассмотрим принцип его работы и регистрации дефектов.

Физическая сущность магнитного феррозондового контроля состоит в намагничивании изделий из ферромагнитных материалов и сканировании контролируемых поверхностей с помощью специальных преобразователей –

феррозондов, которые фиксируют отклонения магнитных полей над локальными участками с дефектами.

При наличии дефекта силовые линии магнитного поля ведут себя над ним так, как указано на рисунке 29.

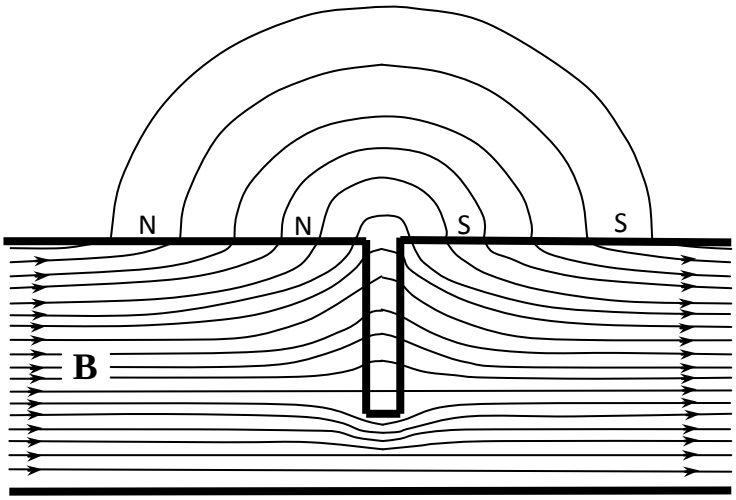


Рисунок 29 – Силовые линии над дефектом в намагниченном объекте

Как видно из рисунка 29 силовые линии поля, проходящие в окрестностях дефекта искривляются и изменяется их плотность как в пространстве дефекта, так и над ним. Так как феррозондовый датчик представляет собой катушку, которую можно ориентировать нормально или вдоль поверхности контролируемого объекта, силовые линии магнитного поля целесообразно представить в виде двух составляющих: нормальной составляющей – перпендикулярной поверхности и тангенциальной составляющей, параллельной поверхности. Следует отметить – если дефект подповерхностный, то искажение силовых линий над ним тоже будет, но гораздо слабее.

Разложение магнитного поля над дефектом в каждой точке силовой линии приводит к возможности проанализировать изменения и нормальной и тангенциальной составляющих поля (рисунок 30). Как видно из рисунка тангенциальная составляющая имеет максимальное значение непосредственно над серединой дефекта. Кроме того, в силу того что преобразователь находится на одном расстоянии от объекта и усилении плотности силовых линий при

приближении к ферромагнетику – то это значение больше тех значений, которые регистрируются над бездефектными участками. Нормальная же составляющая меняется значительно сильнее, более того разница между значениями в точке 1 и в точке 5 максимальна. Именно поэтому предпочтительно использовать измерение нормальной составляющей как разницу между этими значениями. При вычитании этих значений результат сложится, так как одно из них отрицательное.

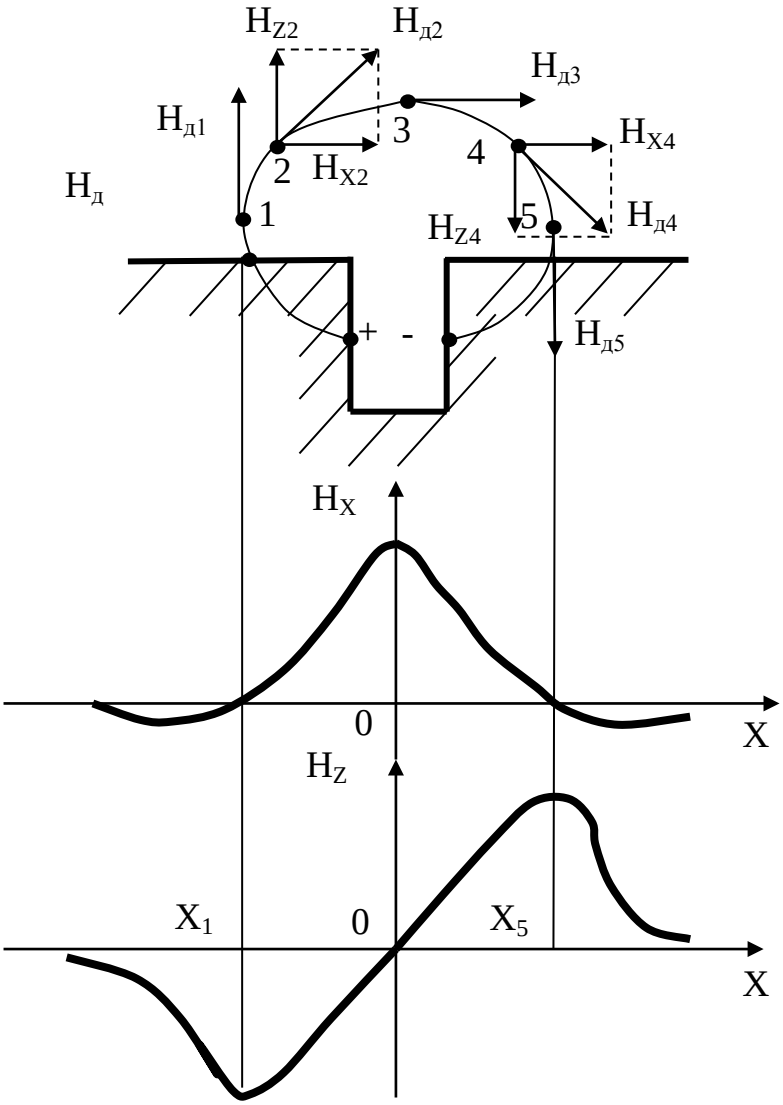


Рисунок 30 – Изменение составляющих магнитного поля при намагничивании в зоне локального дефекта в идеально бесконечном объекте где $H_д$ – векторы напряженности магнитного поля в различных точках над дефектом; H_x – векторы тангенциальной составляющей магнитного поля над дефектом;H_z – векторы и значения нормальной составляющей магнитного поля вдоль объекта контроля

Для измерений составляющих магнитного поля используются катушки, в которых индуцируется электродвижущая сила в соответствии с законом электромагнитной индукции.

Если в качестве измерителя поместить катушку вертикально относительно поверхности контроля (фиксирующая нормальную составляющую магнитного поля), то внутри катушки наводится магнитное поле, формирующее электродвижущую силу (ЭДС), которую и фиксирует измерительный прибор. Для повышения чувствительности преобразователя к магнитному потоку измерительную катушку наматывают на сердечник из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью.

ЭДС в катушке в общем случае определяется как:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt}, \tag{11}$$

где n – количество витков катушки, а $\frac{d\Phi}{dt}$ – скорость изменения магнитного потока, пронизывающего катушку. То есть важно, чтобы магнитный поток изменялся, что и происходит при перемещении измерительной катушки феррозонда над дефектом. Как видно из формулы (11) ЭДС в преобразователе возникает только в случае изменения магнитного потока сердечника во времени, поэтому для обеспечения высокой чувствительности такого преобразователя следует использовать переменное магнитное поле. Переменное магнитное поле дополнительно создается катушкой возбуждения, находящейся на том же сердечнике.

Теперь рассмотрим как работает преобразователь-градиентомер (который так называется потому, что измеряет разность значений индукции магнитного поля в двух параллельно расположенных рядом катушках) при обнаружении дефектов.

Катушка по которой протекает ток I создаёт вокруг себя магнитное поле. Если катушку надеть на ферромагнитный стержень, то магнитные силовые линии будут замыкаться в стержне (рисунок 31, а).

а) б)

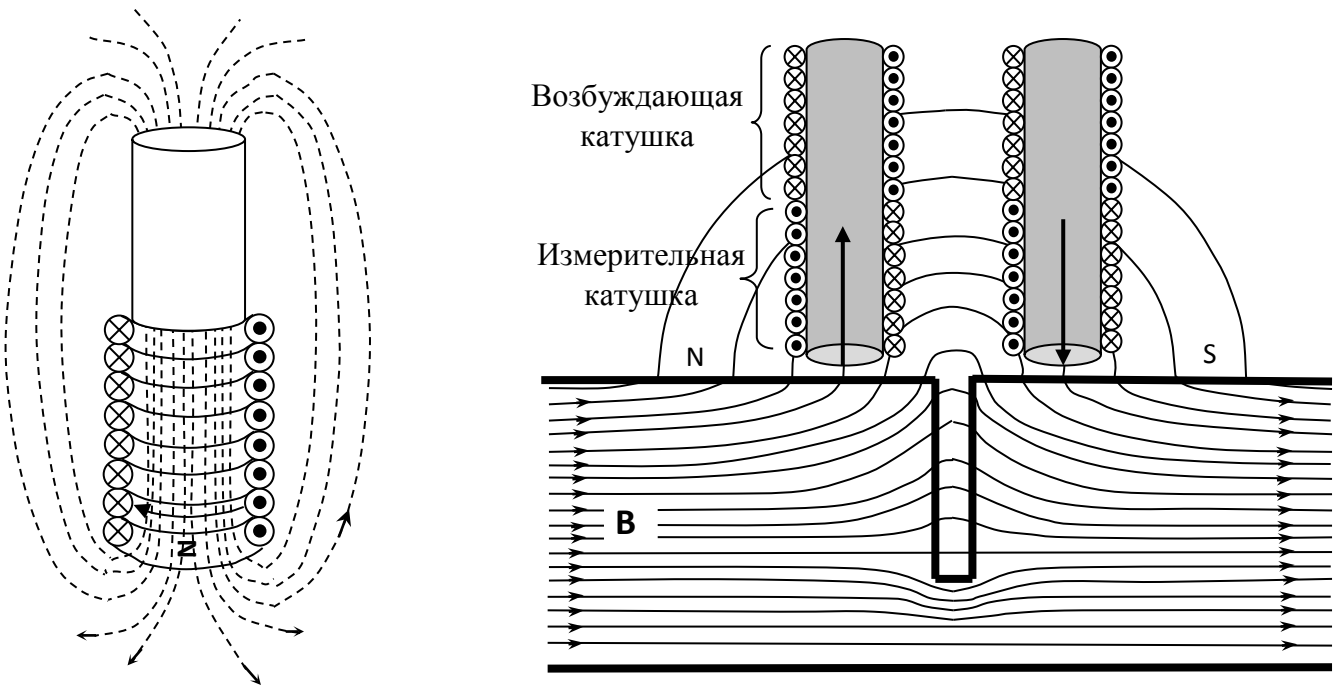


Рисунок 31 – Феррозондовый преобразователь

Если стержень взять достаточно длинным, то на нём рядом можно поместить вторую катушку, в которой в силу законов электромагнитной индукции так же возникнет электродвижущая сила, которую можно измерить с помощью вольтметра.

Когда такое устройство помещаем в поле дефекта над объектом контроля (Рисунок 31, б), то нормальная составляющая поля добавится к полю создаваемому первой катушкой и во второй катушке будет индуцироваться ЭДС общего суммарного поля, то есть изменится по сравнению с ЭДС в бездефектной области, потому что в бездефектной области нормальная составляющая поля почти равна 0.

А если ещё рядом с другой стороны дефекта в его поле поместить точно такой же второй полузонд, то он будет фиксировать тоже изменения поля, но с другой стороны от дефекта, тогда при пересечении дефекта такой конструкции её чувствительность к этому дефекту будет в два раза выше чем у одного полузонда.

Вычитая ЭДС в соседних катушках, расположенных на обоих полузондах получаем значения градиента магнитного поля в области дефекта.

В процессе сканирования на бездефектном участке вклад нормальной составляющей детали минимален и измерительные катушки фиксируют только разницу между полями в сердечниках формируемыми противоположно намагничивающими катушками возбуждения, поэтому на выходе соединенных последовательно катушек формируется близкое к 0 значение ЭДС.

Если же преобразователь находится над дефектом, то нормальные составляющие поля дефекта по обе стороны от него велики по сравнению с возбуждающим полем, и разница между магнитными потоками в обеих измерительных катушках будет большая. Тогда вычитание формируемыми этими потоками ЭДС приведет к значительному повышению сигнала на выходе преобразователя, что и говорит о наличии дефекта.

Контрольные вопросы

1. *Почему над дефектом образуется неоднородное магнитное поле?*
2. *Какие силы действуют на частицу магнитного порошка в магнитном поле дефекта на объекте контроля?*
3. *Где на поверхности объекта собираются частицы магнитного порошка?*
4. *Как зависит искажение магнитного поля над дефектом при разной направленности дефектов относительно магнитного поля намагниченной детали?*
5. *Что такое магнитная коагуляция и как она влияет на перемещения порошка?*
6. *Что описывает закон электромагнитной индукции?*
7. *Как работает феррозондовый преобразователь?*
8. *Почему для феррозондового контроля используется нормальная составляющая магнитного поля?*
9. *Как изменяется нормальная составляющая магнитного поля над дефектом?*

6 ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

6.1 Этапы и способы магнитопорошкового контроля

При проведении магнитного контроля требуется выполнить следующие операции:

– подготовка детали к контролю;

– подготовка средств контроля;

– намагничивание детали или деталей;

– нанесение магнитного индикатора на контролируемую поверхность;

– осмотр контролируемой поверхности и расшифровка магнитной индикации с последующим измерением размеров дефекта;

– при необходимости уточнения результатов контроля выполнение дополнительны операций по идентификации дефекта;

– размагничивание деталей (если требуется);

– оформление результатов контроля в журналы или в виде протоколов.

В зависимости от последовательности этих операций магнитопорошковый контроль разделяется на два способа контроля:

– способ приложенного поля (СПП);

– способ остаточной намагниченности (СОН).

Сущность способа приложенного поля (СПП) заключается в том, что операции намагничивания, нанесения магнитного порошка и основную часть осмотра выполняют одновременно, т. е. в приложенном поле.

Способ остаточной намагниченности (СОН) описывает способ намагничивания детали с последующим нанесением магнитных частиц после снятия намагничивающего поля. В этом случае для образования индикаций на поверхности изделия используется только остаточное магнитное поле намагниченной детали.

Способ СОН имеет следующие преимущества перед способом СПП:

– возможность установки детали в любое положение для выбора лучшего освещения и удобного осмотра, так как деталь не надо удерживать в поле

намагничивающего устройства, особенно ценно это преимущество при контроле деталей сложной формы, когда надо заглядывать в пазы, канавки и т. п.;

– нанесение суспензии как путем полива, так и окунанием в ванне с суспензией одновременно ряда деталей не только непосредственно за операцией намагничивания, но и спустя несколько часов;

– почти всегда способ СОН имеет большую производительность труда, так как выполнение однотипных операций, например, сначала намагничивание 100 деталей подряд, а затем полив сразу их всех, а потом последовательный осмотр, сокращает рабочее время по сравнению с работой, когда надо выполнять каждый раз другую операцию;

– меньшую вероятность появления ложных отложений порошка в местах грубой обработки поверхности, наклепа, по рискам и т. п.;

– улучшение безопасности труда; так как дефектоскопист даже случайно не может попасть в магнитное поле включенного намагничивающего устройства или коснуться открытых частей токопровода намагничивающего устройства (некоторые устройства имеют в силу технических особенностей открытые части, по которым протекает электрический ток).

СПП имеет только одно важное преимущество – этот способ имеет высокую чувствительность. При этом индикаторные рисунки дефектов образуются в процессе намагничивания. При использовании СПП сначала прекращают нанесение индикатора на объект, затем – намагничивание. Осмотр контролируемой поверхности проводят при намагничивании и (или) после его прекращения. При контроле СПП достигаются высокие значения намагниченности деталей, вплоть до насыщения, и, следовательно, тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния над дефектами. Это повышает выявляемость дефектов данным способом, но не всегда, так как даже при средней шероховатости поверхности и наличии эксплуатационных рисок, вмятин и т. п. могут появляться дополнительные ложные осаждения магнитного порошка в этих местах, осложняющие расшифровку результатов контроля.

Поэтому при прочих равных условиях предпочтение следует отдать

магнитному контролю СОН.

Способ остаточной намагниченности, как правило, проводят в следующих случаях:

– изделие должно быть изготовлено из магнитотвердого материала с $B_г$ >0.53 Тл и H_c >9,5 А/см, чтобы остаточная намагниченность была достаточно большой, чтобы на поверхностных дефектах образовывались полюса, притягивающие частицы магнитного порошка;

– изделие должно быть достаточно простой формы, без галтельных переходов, пазов, резьбы, которые сильно ослабляют и рассевают магнитное поле и остаточное поле, и так не сильно большое;

– намагничивающее устройство позволяет создать поле напряженностью близкой к Hs.;

– на детали не должно быть немагнитного покрытия, например, краски, лака, эмали и т. п.;

– задачей контроля должно быть выявление только выходящих на поверхность дефектов, для выявления подповерхностных дефектов нужно только сильное приложенное магнитное поле.

Для правильного выбора способа намагничивания следует выполнить следующие действия:

1) определяют марку материала проверяемого объекта, используя техническую документацию на его изготовление;

2) по справочникам оценивать остаточную намагниченность и коэрцитивную силу;

3) исходя из положения точки с координатами H_c и $B_г$ на рисунке 32 делают заключение о возможности применения того или иного способа контроля, руководствуясь следующим: если на графике точка (H_c, $B_г$) расположена выше кривой, то возможен контроль объекта как СОН, так и СПП, если точка (H_c, $B_г$) расположена ниже кривой, то рекомендуется контроль СПП.

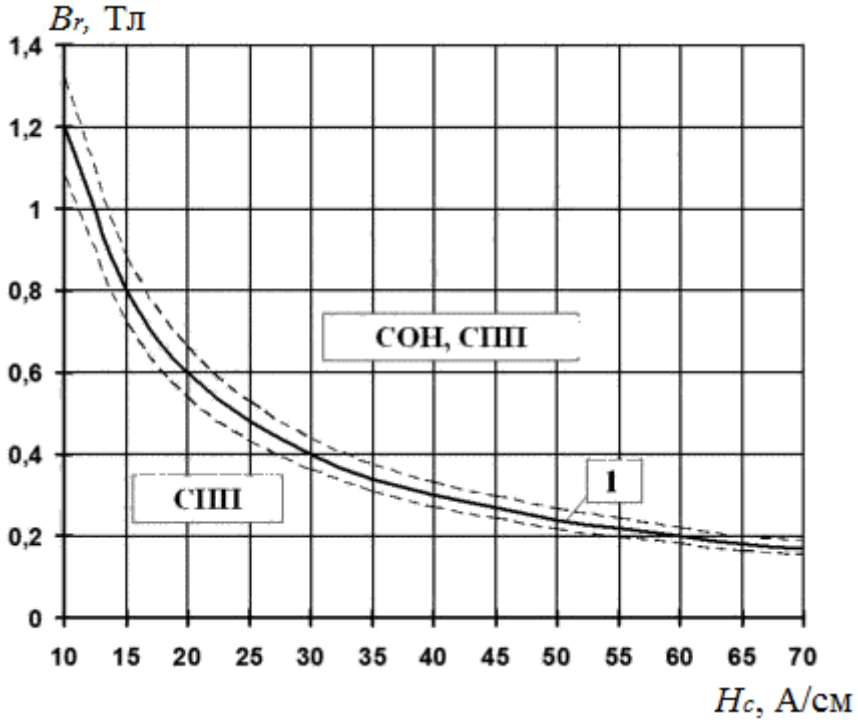


Рисунок 32 – График для определения способа магнитопорошкового контроля

При отсутствии сведений о коэрцитивной силе H_c и остаточной индукции B_r материала изделия деталь контролируют СПП.

6.2 Подготовка деталей и средств контроля

Подготовка деталей заключается в следующих операциях:

– очистка детали от поверхностного немагнитного защитного покрытия, загрязнений, масла, смазки и т. п.;

– обезжиривание поверхности – для исключения залипания магнитных частиц к детали, иначе подвижность частиц в области жирных пятен будет понижена, а вслед за ней и выявляемость дефектов;

– зачистка от заусенцев, рисок, ржавчины, забоин для обеспечения равномерной шероховатости поверхности для особо ответственных деталей наждачной бумагой и шлифовальной машинкой;

– расположение детали на участок намагничивания.

Основное правило при очистке поверхности от немагнитных покрытий связано с тем, что чем дальше будут магнитные частицы находиться от детали, тем

слабее будет магнитное поле и сила притяжения частиц к дефекту. Так, по ГОСТ Р 56512-2015 без ущерба для чувствительности магнитопорошкового контроля допускается немагнитное покрытие толщиной до 50 мкм, а при толщине более 80 и до 200 мкм необходимо использовать в качестве индикатора сухой взвешенный в воздухе порошок и для оценки работоспособности магнитопорошковой системы использовать специализированные образцы с дефектами, имеющими такое же покрытие.

Для протирки можно использовать современные суспензии на основе порошков типа МИНК, ДИАГМА и пр. которые содержат мыльные компоненты, смывающие жирные пятна и повышающие смачиваемость поверхности детали.

Наличие любых неровностей, а особенно локальных типа рисок, заусениц и т.п. является естественными препятствиями на пути магнитного порошка к потенциальному дефекту, и чем меньше их будет, тем лучше проявятся дефекты, особенно находящиеся рядом с ними. Поэтому те детали, которые допускается шлифовать – лучше зачистить от такого рода неровностей.

Деталь надо установить так, чтобы обеспечить стекание суспензии по как можно большей поверхности, особенно это касается деталей с плоской контролируемой поверхностью, иначе суспензия будет застаиваться на детали и образовывать равномерный слой магнитного индикатора, затрудняющего осмотр. Поэтому (особенно если суспензию наносят поливом) плоские детали лучше располагать под небольшим продольным наклоном (около 10 °), то есть один конец подложки длиной 1 м должен возвышаться над другим на 17 см) , так небольшое количество суспензии будет стекать по всей поверхности равномерно, мы добьемся определенной экономии суспензии и отсутствия фона, затрудняющего осмотр.

Если детали короткие, когда отношение длины к наибольшей поперечной стороне или диаметру детали менее 5, то детали нужно укладывать в цепочки такой длины, чтобы их длина стала больше ширины. Это происходит из-за того, что на краях изделия тангенциальная составляющая напряженности поля, направленная вдоль детали H_t убывает очень быстро, и чем короче деталь, тем быстрее она убывает, вместе с тем растет значение нормальной составляющей

напряженности магнитного поля. В этом случае, полюса торцов детали будут гораздо более мощным магнитом для частиц, которые к этим полюсам и будут притягиваться, а не к дефектам, которые необходимо обнаружить (рисунок 33).

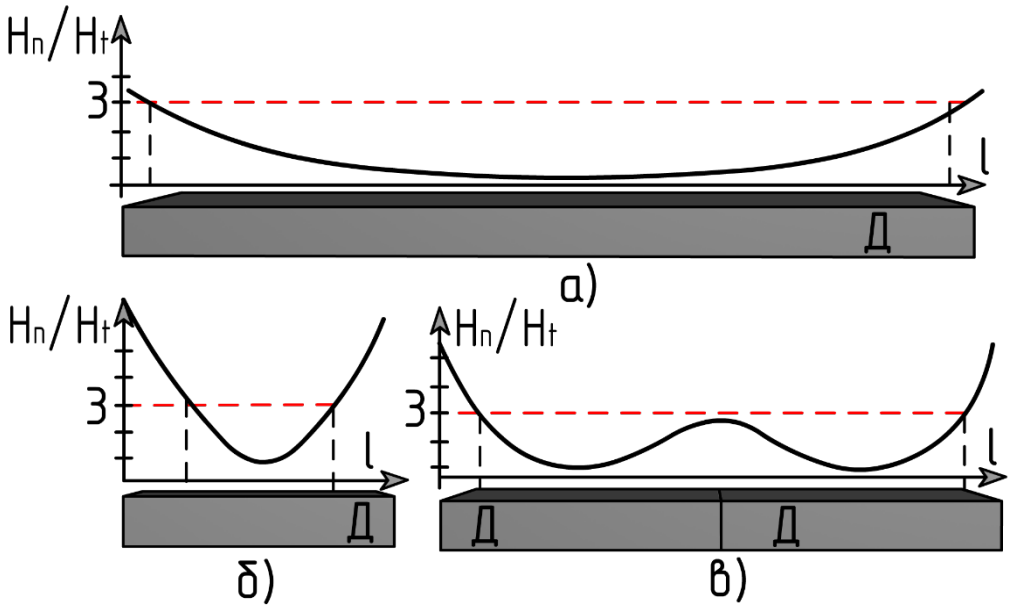


Рисунок 33 – Изменение соотношения составляющих магнитного поля на поверхности контролируемых деталей, составляемых в цепочки

При составлении деталей в цепочки одинаковыми торцами друг к другу, когда их общая длина становится больше, чем в 5 раз по сравнению с шириной, добиваются повышения тангенциальной составляющей и уменьшения нормальной, что позволит более эффективно находить дефекты на таких деталях.

Подготовка средств контроля делится на сменную, которую проводят один раз в течении дня в начале смены (или при смене одного из средств контроля в течение рабочего дня) и постоянную, которую надо проводить перед контролем каждой детали или серии деталей.

При сменной подготовке необходимо:

– поверить целостность заземления, корпусов приборов и соединительных кабелей, резинового коврика и диэлектрических перчаток – чтобы исключить возможность поражения электрическим током дефектоскописта;

– включить блок питания намагничивающего устройства, в положении без контролируемых деталей и любых ферромагнитных предметов в поле

намагничивающего устройства и убедиться в том, что устройство выдает требуемое значение намагничивающего тока на встроенном амперметре (если он встроен в прибор);

– стандартный образец (тест-образец, контрольный образец) с искусственным дефектом установить в положение контроля;

– подготовить магнитный индикатор;

– намагнитить деталь или детали, нанести индикатор и определить качество собираемого валика над дефектом, сравнив его с дефектограммой.

– удалить остатки индикатора с поверхности образца (иначе невидимый глазу дефект на кромках начнет постепенно разрушаться под воздействием коррозии, а значит со временем станет виден и придет в негодность, так как невидимость при визуальном осмотре невооруженным глазом дефекта одно из главных условий его пригодности), а сам образец убрать на место хранения.

Допускается использовать вместо образца с искусственным дефектом – образец в виде реальной детали с естественной трещиной, в этом случае необходимо проверить суспензию с помощью отраслевых стандартных образцов на устройстве МОН-721 или МФ-10СП или на аналогичном приборе проверки качества магнитного индикатора.

Суспензию перед каждым нанесением на деталь необходимо перемешивать деревянной мешалкой, которая не сохраняет статического электрического заряда.

6.3 Намагничивание

Способ, схему и средство намагничивания, а также вид намагничивающего поля выбирают в зависимости от геометрической формы и размеров ОК, материала и толщины немагнитного защитного (естественного) покрытия, а также от типа, местоположения и направления подлежащих выявлению дефектов. Дефекты выявляются значительно хуже или могут не выявляться, если магнитное поле направлено к плоскости дефекта под углом менее 30°. Если ориентация дефектов неизвестна, то детали простой формы намагничивают в двух направлениях, сложной – в нескольких.

Так как магнитное поле рассеяния дефекта формируется только тангенциальной составляющей H_τ вектора напряженности намагничивающего поля, то основной задачей при намагничивании кроме выбора направления является обеспечение минимально допустимого значения напряженности магнитного поля на контролируемом участке. Так же выявляемость дефектов ухудшается, если нормальная составляющая H_n вектора напряженности намагничивающего поля превышает тангенциальную более чем в три раза. Для надежного выявления дефектов на контролируемой поверхности детали при намагничивании должно выполняться условие: $H_n/H_t \leq 3$.

Существует три способа намагничивания: полюсное, циркулярное и комбинированное.

6.3.1 Полюсное намагничивание

Полюсное намагничивание – способ намагничивания, при котором магнитные силовые линии часть пути проходят по детали, а часть по воздуху. Этот способ намагничивания, чаще всего, служит для выявления поперечных дефектов относительно продольной оси детали. Именно поэтому часто полюсное намагничивание называют продольным. А поперек детали можно эффективно намагничивать далеко не все детали. Так как в поперечном направлении детали очень часто развиваются усталостные трещины, то этот способ широко применяется для намагничивания деталей на вагоно- и локомотиворемонтных предприятиях для контроля деталей, бывших в эксплуатации. Реализовать полюсной способ намагничивания можно по одной из четырех схем, представленных на рисунке 34.

Полюсное намагничивание обычно получают помещением детали в соленоид, часто в качестве соленоида используется гибкий кабель, обертываемый вокруг участка детали, а также постоянные магниты и электромагниты.

Средство и схему полюсного намагничивания выбирают исходя из величины и вида намагничивающего поля.

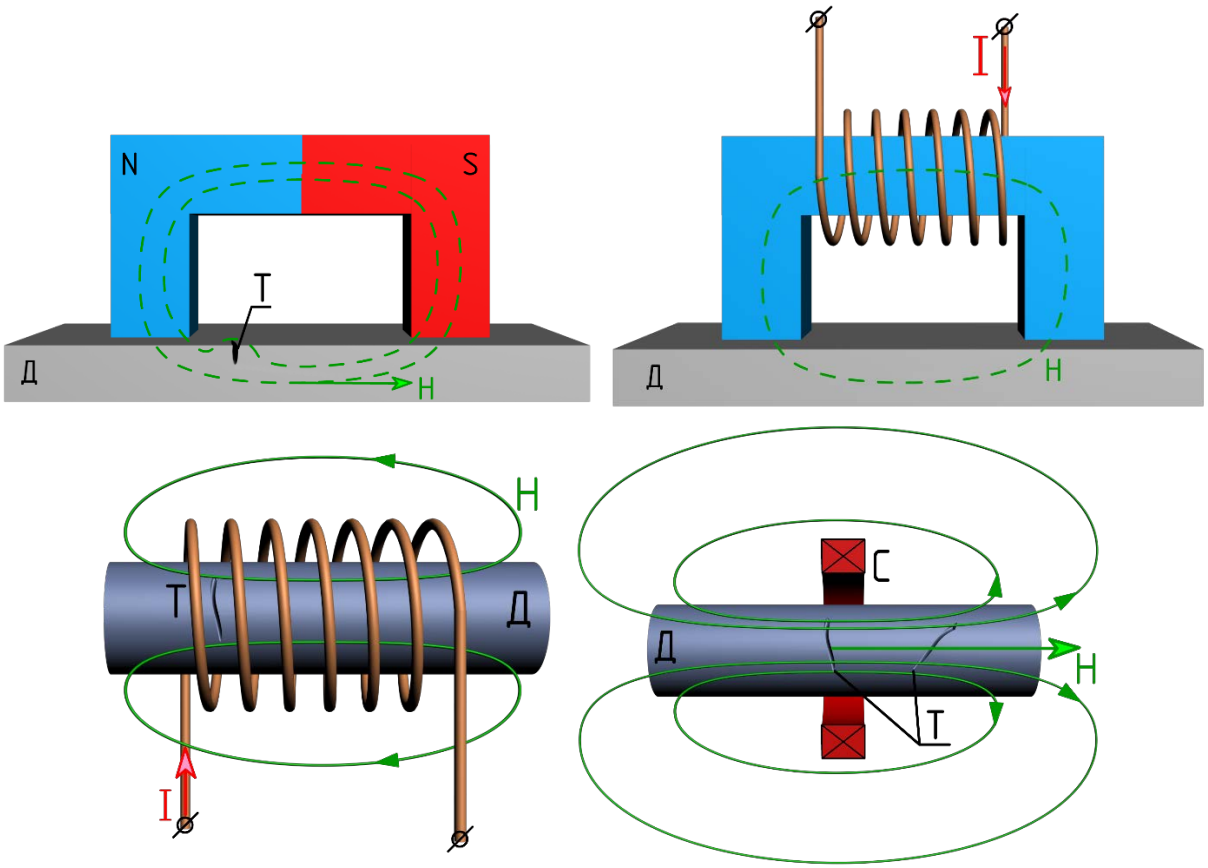


Рисунок 34 – Схемы и средства реализации полюсного способа намагничивания

Самым простым средством контроля является **постоянный магнит**, сделанный из магнитотвердого материала имеющего высокий уровень остаточной намагниченности. Простота этого средства в том, что не требуется питания электрическим током, а следовательно постоянный магнит безопасен. При намагничивании постоянным магнитом хорошо выявляются дефекты перпендикулярные линии, соединяющей магнитные полюса. Постоянный магнит хорошо использовать для намагничивания мелких или тонких деталей, а так же отдельных участков. Кроме того его удобно ставить на вертикальные поверхности крупных конструкций сложной формы, которые необходимо проконтролировать. Постоянный магнит приведен на рисунке 35.

Если необходимо намагничивать большие объемы, то размера и реализуемой напряженности магнитного поля не хватит на всю поверхность сразу, а мелкими шагами контролировать долго и находятся способы более эффективные. Постоянные магниты способны навести постоянный и нееизменный магнитный

поток, а это значит, что при увеличении площади сечения магнитная индукция у поверхности будет уменьшаться обратно пропорционально увеличению площади поперечного сечения, по которому проходит магнитный поток в детали. Поэтому применяется постоянный магнит не так часто. Другими недостатками постоянного магнита являются:

Рисунок 35 – Намагничивающее устройство на постоянных магнитах

– постоянный магнит может обеспечить только постоянное магнитное поле, которое равномерно распределяется по всей толщине детали, поэтому он слабее выявляет поверхностные дефекты, по сравнению с устройствами наводящими переменное магнитное поле;

– слишком толстые детали, толщиной более 10…15 мм большинством современных постоянных магнитов намагничиваются уже недостаточно;

– участки около полюсов (на расстоянии около 3 см) обладают повышенной нормальной составляющей поля, которая фактически не дает контролировать эти участки;

– уменьшая расстояние между полюсами мы практически не можем изменить напряженность магнитного поля на поверхности, так как она зависит в основном от площади сечения детали.

– Похожим на постоянный магнит является электромагнит. Это намагничивающее устройство отличается тем, что магнитный поток создается в

магнитопроводе катушкой на рисунке 28, по которой течет электрический ток I, силовые линии которого H замыкаются в детали Д. Несомненными достоинствами электромагнита по сравнению с постоянным магнитом являются:

– возможность реализовать ток любого вида (постоянный, переменный, выпрямленный, импульсный), но для выявления поверхностных усталостных трещин предпочтителен переменный ток;

– в большинстве электромагнитов можно регулировать ток, а значит и напряженность поля над деталью, так напряженность поля создаваемого между полюсами, при условии хорошего контакта полюсов с деталью, примерно равна:

$$H = \frac{1}{2}\frac{N \cdot I}{\sqrt{l^2+d^2}}, \qquad (12)$$

где N – количество витков катушки, l и d – соответственно длина и диаметр катушки;

– для обеспечения качества контакта в том числе с криволинейными поверхностями в комплекте электромагнита часто поставляют контактные съемные насадки.

С помощью электромагнита удобно намагничивать отдельные участки деталей. Хотя встречаются и специализированные стационарные электроагниты, детали в которые надо вставлять. Но наиболее распространенным на вагоноремонтных предприятиях является электромагнит МЭД-40/120 (рисунок 36). С помощью электромагнита удобно контролировать отдельные участки крупных деталей (например, при обязательном магнитопрошковом контроле углов буксовых проемов боковых рам грузовых вагонов) или дополнительно контролировать участки, на которых результаты контроля другими методами подвергаются сомнению.

Наиболее распространенным средством реализации полюсного намагничивания при магнитопорошковом контроля на ремонтных предприятиях железнодорожного подвижного состава являются соленоиды, питаемые от сети 220 В или 380 В. Достоинства этих намагничивающих устройств связаны с возможностью обеспечения на поверхности деталей очень высоких значений напряженности магнитного поля (иногда свыше 100 А/см) и достаточно большой

зоной достаточной намагниченности – до 350 мм. Другим достоинством соленоида является возможность контроля как СОН, так и СПП благодаря блоку питания применение любого вида тока и соответсвенно магнитного поля (постоянного, переменного, импульсного и т. п.).

Рисунок 36 –Электромагнит МЭД-40/120, состоящий из электромагнита (1), блока питания (2), кабеля соединяющего электромагнит с блоком питания (3), и насадок для контроля угловых участков (4).

Недостатком их использования являются ограниченнные поперечные размеры деталей, которые можно контролировать этим устройством, при этом максимальный диаметр или ширина детали должна быть меньше на несколько сантиметров (4…5), чем внутренний диаметр соленоида. Кроме того, если диаметр детали большой, то сложно поворачивать соленоид под углом, так чтобы продольные дефекты (если они вероятны в детали) оказывались под углом 30° и более к силовым линиям магнитного поля.

Основные правила намагничивания соленоидами следующие:

– если детали достаточно короткие, то их надо выкладывать в цепочки, длина которых должна находиться в пределах зоны достаточной намагниченности, а соленоид устанавливать посередине над деталями;

– чем ближе к центральной оси соленоида находится контролируемая поверхность (рисунок 37) длинной детали, тем больше будет зона достаточной намагниченности;

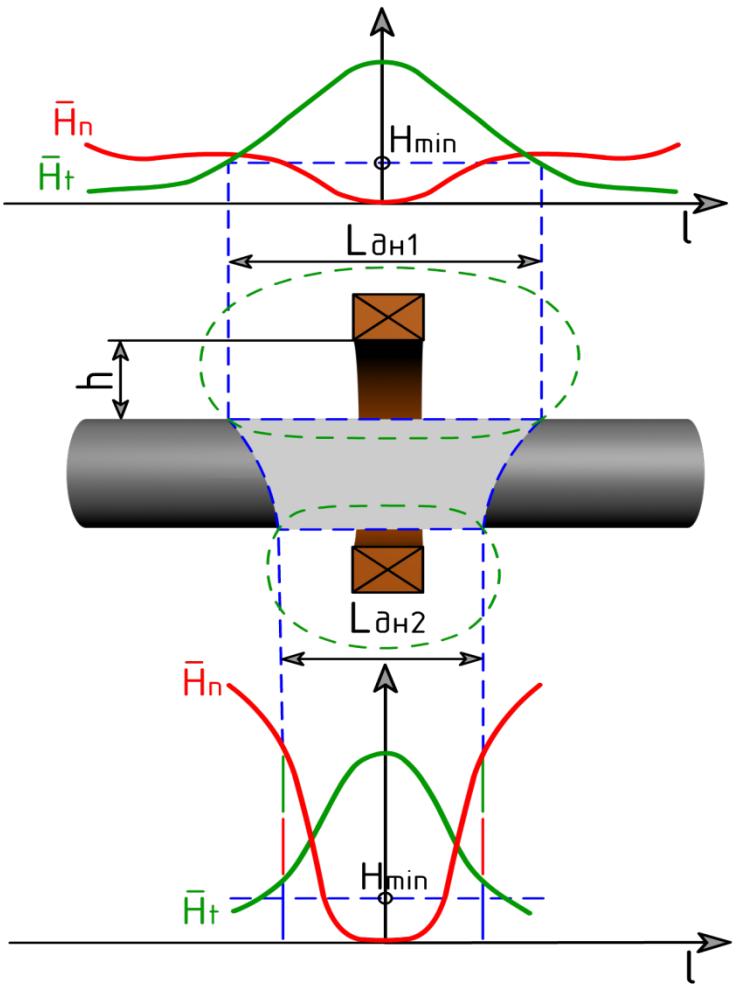


Рисунок 37 – Распределение напряженности магнитного поля на поверхности детали, смещенной относительно оси намагничивающего ее соленоида

– при намагничивании протяженных деталей и деталей с галтельными переходами намагничивать соленоидом можно двумя вариантами: а) равномерно перемещая соленоид над деталью со скоростью не более 150 мм и успевать наносить индикатор перед соленоидом, б) перемещая соленоид на расстояние примерно 0,8 зоны достаточной намагниченности, останавливать и наносить индикатор вокруг соленоида в пределах зоны достаточной намагниченности;

– помнить, что при контроле конусных поверхностей деталей и при приближении к торцам величина зоны достаточной намагниченности немного уменьшается, а насколько сильно, для каждого намагничивающего соленоида следует определять экспериментально измерителями напряженности магнитного поля;

– при намагничивании протяженных деталей и деталей с галтельными

переходами, когда зона достаточной намагниченности меньше длины контролируемого участка, намагниччивать деталь в приложенном поле лучше всего от торца, заводя торец детали на 30…50 мм внутрь соленоида (рисунок 38, а).

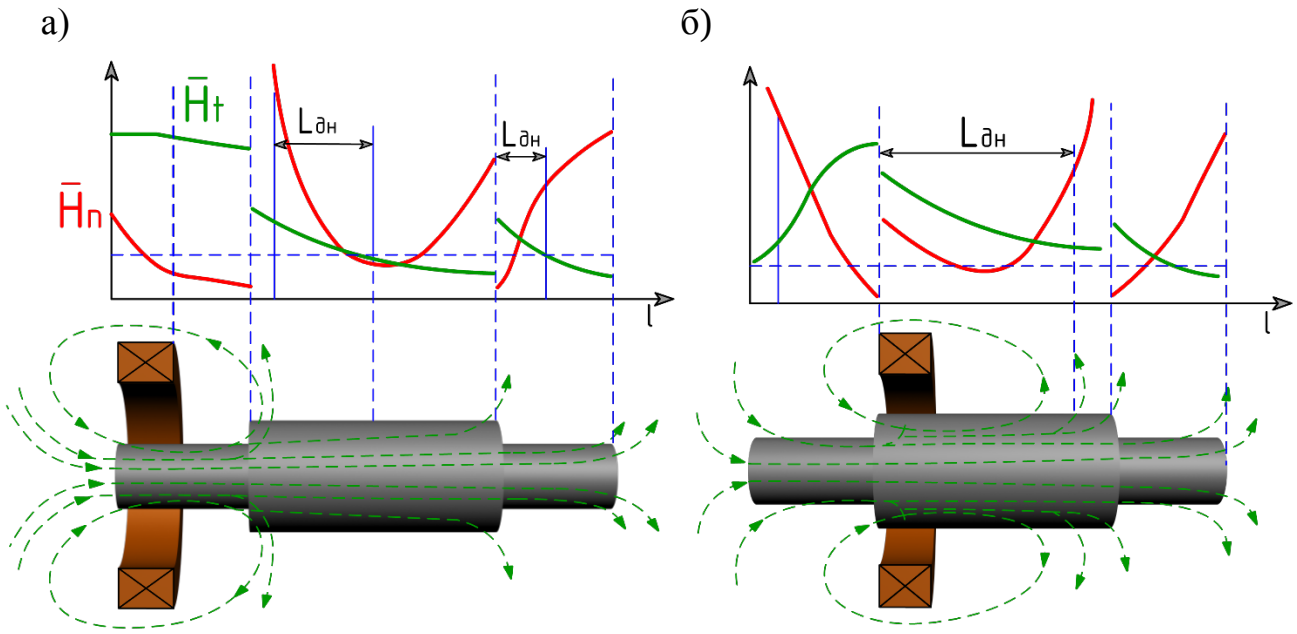


Рисунок 38 – Намагничивание протяженных деталей и деталей с изменением площади сечения: расположение соленоида в начальный момент намагничивания (а) и расположение намагничивающего соленоида после перемещения на величину зоны достаточной намагниченности (б)

Соленоиды бывают различного вида и назначения. Например, соленоид МД-12ПЭ (эксцентричный) отличается тем, что намагничивает деталь только с одной стороны, в отличие от других соленоидов и, соответственно, наносить индикатор и осматривать деталь надо только с той стороны, которая намагничивает (рисунок 39, а). Другой тип оригинального соленоида – седлообразное намагничивающее устройство (рисунок 39, б), представляет собой соленоид изогнутый таким образом, что его можно подводить к крупногабаритной детали сбоку и намагничивать. Так как если перегнуть соленоид, то оказывается, что ток течет по обеим половинкам навстречу друг другу, из-за этого в середине такого устройства велика нормальная составляющая поля и в середине на деталь не следует наносить индикатор и осматривать, это делают только с обеих внешних сторон седлообразного намагничивающего устройства.

а)

Рисунок 39 – Соленоиды: а) МД-12ПЭ, б) МД-12ПС

6.3.2 Циркулярное намагничивание

Циркулярное намагничивание – это намагничивание, при котором магнитный поток весь свой путь проходит по проверяемой детали (замыкается в детали или из детали не выходит), явные полюса у детали не образуются. Циркулярное намагничивание применяется для выявления продольных и наклонных дефектов (рисунок 40).

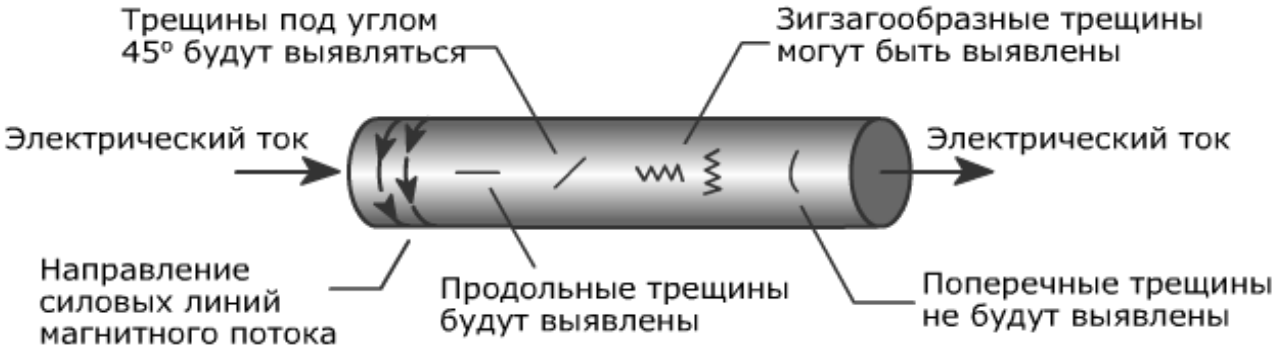


Рисунок 40 - Схема намагничивания цилиндрической детали путём пропускания по ней тока

Циркулярное магнитное поле представляет собой магнитные силовые линии, которые проходят по окружностям по периметру детали. Циркулярное намагничивание можно осуществить путём пропускания тока по детали, по участку детали, пропускания тока по проводнику, помещённому внутрь изделия, с помощью тороидальной обмотки и с помощью индукционного намагничивания.

Намагничивание пропусканием тока по сплошной детали

Этот технический приём предполагает наибольшую чувствительность к обнаружению продольных несплошностей (трещин) имеющих ориентацию параллельно с направлением прохождения электрического тока.

Электрический ток проходит по детали, с которой должен быть обеспечен хороший электрический контакт с контактными площадками. Типичное расположение показано на рисунке 41.

Обозначения:

1 Изделие

2 Дефект (трещина)

3 Магнитный поток

4 Электрический ток

5 Контактная площадка

6 Контактная головка

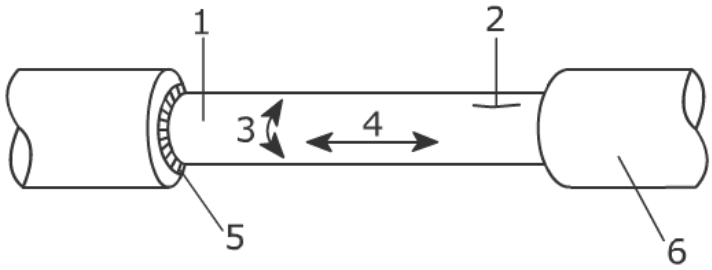


Рисунок 41 - Намагничивание пропусканием тока по сплошной детали

Принимается, что электрический ток распределен равномерно по поверхности детали и сконцентрирован на внешней поверхности детали.

Изменение напряженности поля Н внутри проводника при прохождении по нему тока распределяется таким образом, что поле на оси проводника равно нулю, а внутри проводника изменяется по линейному закону. Снаружи поле уменьшается по гиперболе (рисунки 42, 43).

Расчет требуемой силы тока согласно производится по формуле:

$$I = 3Hd, \qquad (13)$$

где I – сила тока, А;

H – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля, А/см;

d – наружный диаметр детали, см.

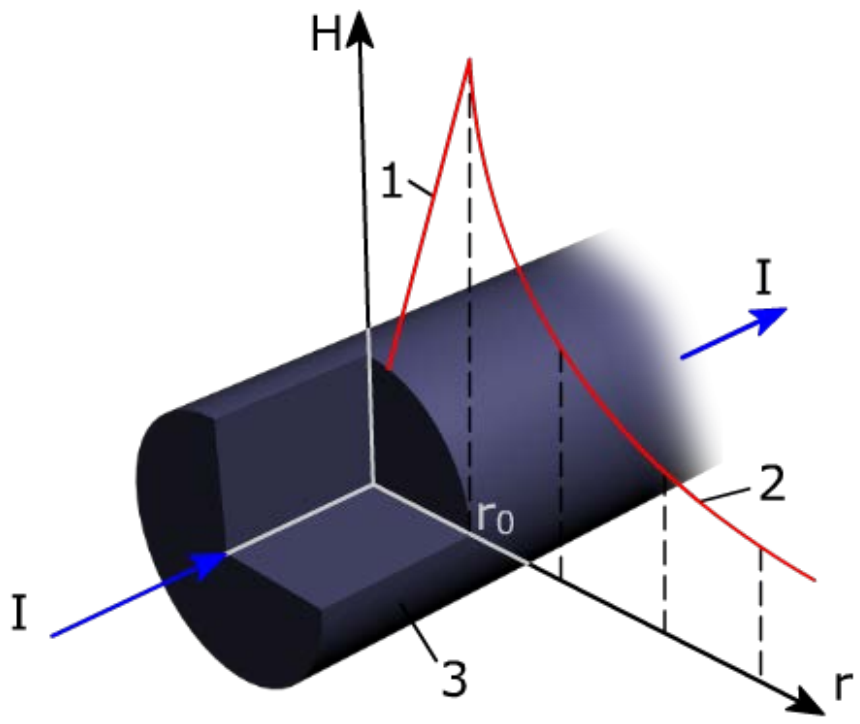


Рисунок 42 – Схема распределения напряженности магнитного поля H при пропускании тока по цилиндрической детали: 1 –напряжённость магнитного поля внутри детали; 2 – график изменения напряжённости магнитного поля за пределами детали; 3 – поверхность детали, на которой самая высокая напряженность

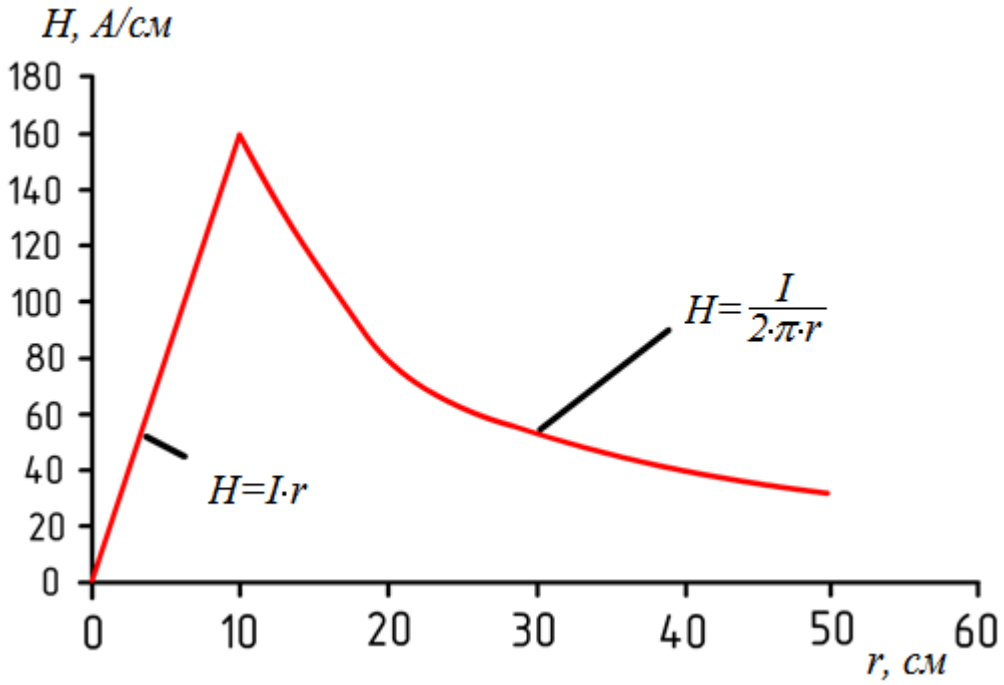


Рисунок 43 – Распределение напряженности магнитного поля внутри и снаружи детали, по которой пропускается электрический ток *I*

Намагничивание пропусканием тока по детали с отверстием

Такая схема намагничивания эффективна для обнаружения **продольных трещин на внешней поверхности** (рисунок 44)**.**

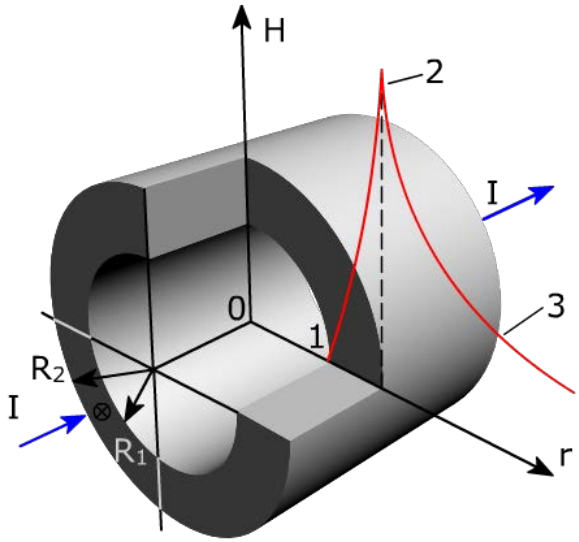


Рисунок 44 - Схема распределения напряженности магнитного поля H при пропускании тока по цилиндру с отверстием: 1 – в пространстве полости; 2 – напряжённость магнитного поля внутри детали; 3 - напряжённость магнитного поля за пределами детали снаружи

Внутри полой цилиндрической детали, по которой пропускают ток, магнитное поле отсутствует. Магнитное поле равно нулю на внутренней поверхности детали и увеличивается, пока не достигнет максимума на внешней поверхности детали.

Расчет требуемой силы тока согласно производится по формуле (13).

Намагничивание пропусканием тока по участку детали с помощью контактных электродов

Ручные переносные контактные электроды, устанавливаются на поверхность контролируемого изделия для того, чтобы пропустить электрический ток через металл.

Электрический ток при прохождении между контактами создает циркулярное магнитное поле вокруг наконечников. Наконечники, как правило, изготавливаются из меди и имеют изолированные ручки для защиты

дефектоскописта. Один из наконечников оборудуется выключателем таким образом, чтобы ток можно было быстро и легко включать и отключать. Иногда два наконечника могут связываться между собой изолятором (как показано на рисунке 45) для облегчения работы дефектоскописта. Такое соединение электроконтактов называют сдвоенными электроконтактами, и обычно они используется для контроля сварных соединений.

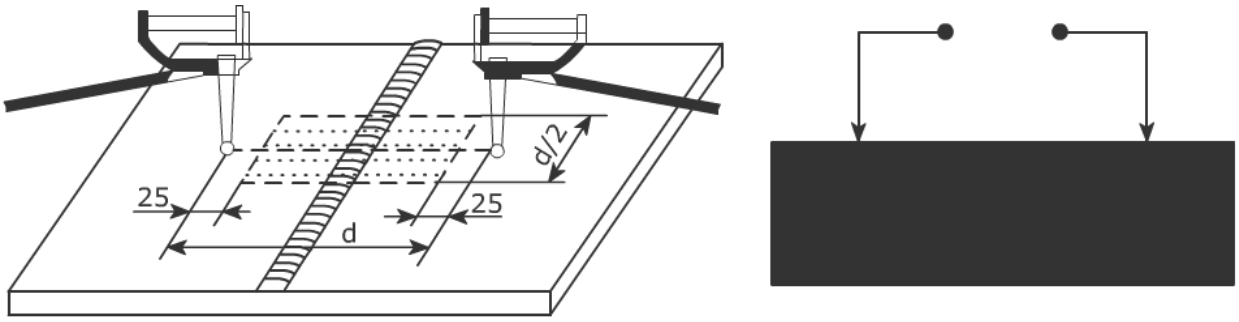


Рисунок 45 - Схема контроля сварного соединения пропусканием электрического тока с помощью контактных наконечников по участку детали

Магнитные линии в этом случае представляют собой концентрические окружности в центрах установки наконечников контактных электродов (рисунок 46).

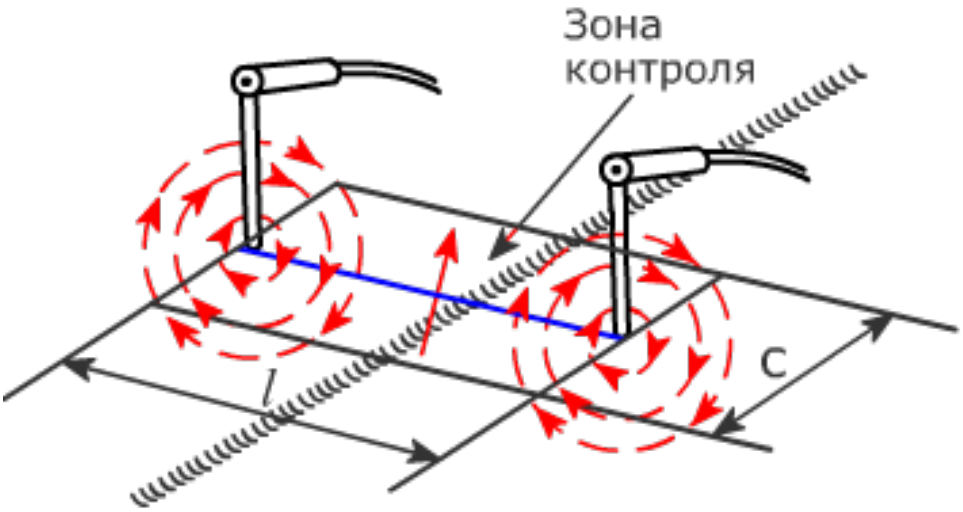


Рисунок 46 – Магнитные силовые линии и зона контроля при намагничивании с помощью с помощью контактных наконечников

Этот способ предполагает наибольшую чувствительность для дефектов, направленных вдоль линии, соединяющей точки установки контактных наконечников.

Сила тока в этом случае рассчитывается по формуле:

$$I = 1{,}5H \cdot \sqrt{l^2 + c^2} \tag{14}$$

где I – сила тока, А;

H – напряженность магнитного поля, А/см;

l - длина пути тока (расстояние между электроконтактами), см;

c – ширина контролируемой зоны, см.

Циркулярное намагничивание полых деталей пропусканием тока по центральному проводнику

Ток проходит через изолированный стержень или гибкий кабель, помещенный внутри диаметра трубы или отверстия в изделии (рисунок 47).

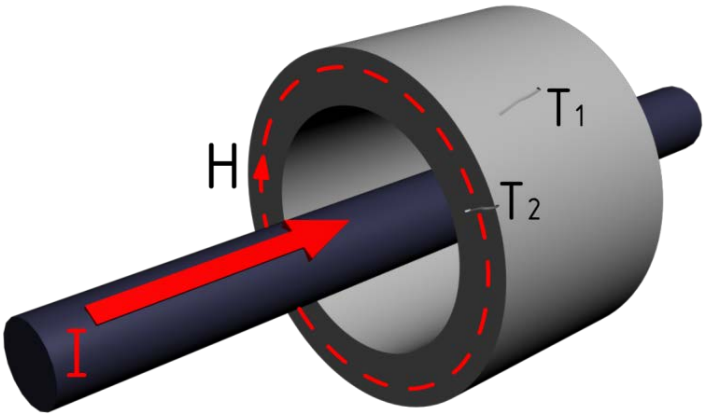


Рисунок 47 - Циркулярное намагничивание полых деталей пропусканием тока по центральному проводнику

Намагничивание детали производится с помощью магнитного поля вокруг проводника с током. Данный технический приём представляет не прямое (наведенное) циркулярное намагничивание. При такой схеме намагничивания проверяемой детали с отверстием на центральном проводнике внутренние

поверхности полых изделий намагничиваются сильнее наружных. Скачки индукции обусловлены ферромагнетизмом детали (рисунок 48).

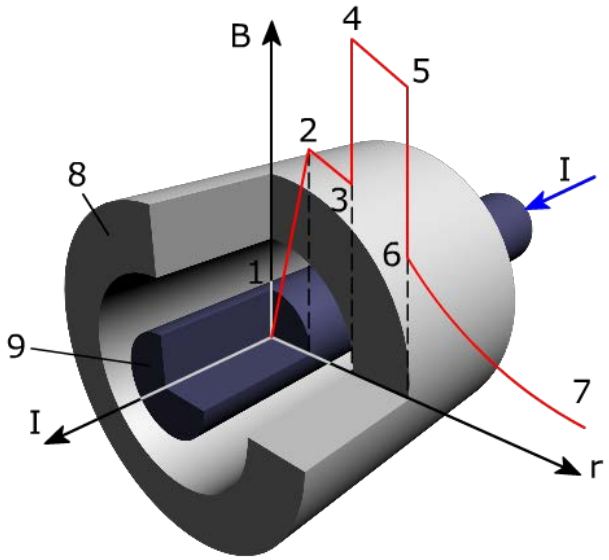


Рисунок 48 - Схема распределения индукции магнитного поля при намагничивании проверяемой детали на центральном проводнике: участок 1-2 – распределение индукции поля внутри проводника (9) по линейному закону; участок 2-3 – уменьшение индукции поля в воздушном зазоре; 3-4 скачкообразное повышение магнитной индукции на границе воздушного зазора и ферромагнетика (8); участок 4-5 – поведение магнитной индукции внутри ферромагнетика; 5-6 скачкообразное уменьшение магнитной индукции на границе металла с воздухом; участок 6-7 – постепенное ослабление поля снаружи намагничиваемого объекта.

Причем выявляются дефекты направленные вдоль оси детали – Т1 и радиальные трещины на торцевых поверхностях – Т2.

Распределение напряженности магнитного поля в детали при намагничивании полой детали пропусканием тока по ней и пропускании тока по центральному проводнику в зависимости от расстояния от центральной оси детали приведены на рисунках 48, 49 из которых видно, почему детали со всеми контролируемыми поверхностями должны намагничиваться пропусканием тока по детали.

Этот метод предлагает наибольшую чувствительность для выявления несплошностей имеющих ориентацию параллельно с направлением прохождения электрического тока.

Из схемы распределения величины напряжённости магнитного поля с помощью прямого намагничивания пропусканием тока по детали видно, что на внутренней поверхности полого проводника цилиндрической формы величина магнитного поля очень низка. Поэтому, прямой метод намагничивания не рекомендуется, проведения контроля внутренних полостей особенно на наличие мелких дефектов для таких деталей.

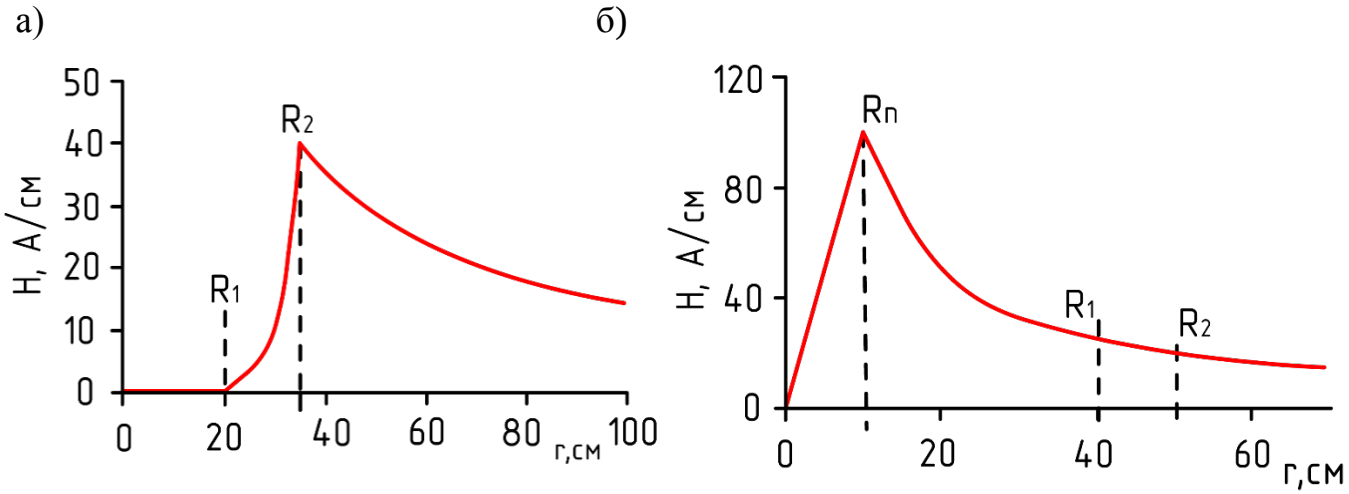


Рисунок 49 – Распределение напряженности магнитного поля в сечении полой детали при пропускании тока по ней (а) или по центральному проводнику (б), где $R_П$ – радиус центрального проводника, R_1 – внутренний радиус намагничиваемой детали, R_2 – наружный радиус намагничиваемой детали

Напряжённость магнитного поля быстро увеличивается при распространении его в глубь металла с внутренней стороны, и поэтому, дефект, имеющий значительную глубину, может быть выявлен. Тем не менее, наилучшим технологическим приёмом для намагничивания полых изделий с целью проведения контроля его внутренней и внешней поверхности является намагничивание с использованием центрального проводника. В том случае, когда электрический ток пропускают по центральному немагнитному (медному) проводнику, магнитное поле, на внутренней поверхности ферромагнитной трубы имеет значительную величину, и магнитное поле всё ещё достаточно сильное для обнаружения дефекта на внешней поверхности изделия.

Для проведения магнитопорошкового контроля при намагничивании пропусканием тока по центральному проводнику используется горизонтальное стационарное оборудование, для нанесения магнитного порошка применяют суспензию. Такой приём используют для проведения контроля деталей, имеющих полую центральную часть, типа шестерён, труб и других изделий в форме кольца. Центральный проводник в виде стержня обычно изготавливают из меди или алюминия. Проводник помещают в отверстие и зажимают между контактными головками. При пропускании электрического тока по центральному проводнику вокруг него образуется циркулярное магнитное поле, которое проникает внутрь материала контролируемой детали.

Циркулярное намагничивание с применением тороидальной обмотки

Часто, при намагничивании полых деталей пропусканием тока по центральному проводнику возникает ситуация, когда тока намагничивающего устройства не хватает для обеспечения нужной величины напряженности магнитного поля на поверхности детали, особенно на внешней поверхности. Тогда применяют намагничивание обматыванием детали **тороидальным способом** (рисунок 50).

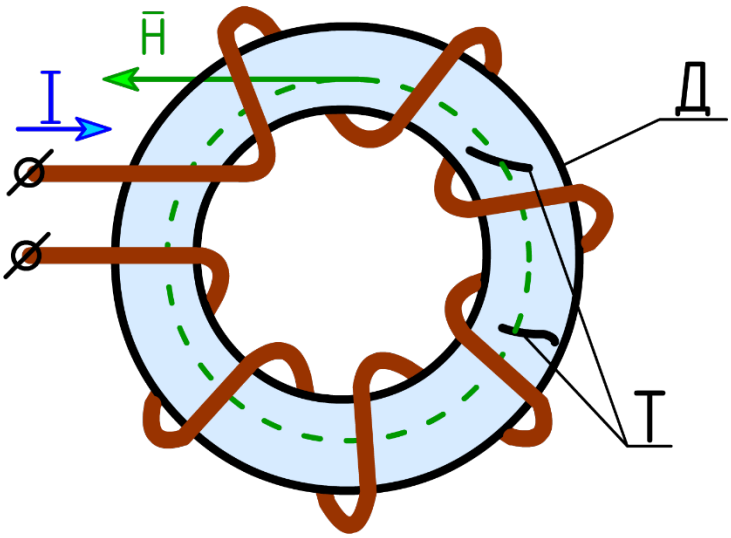


Рисунок 50 – Циркулярное намагничивание детали с помощью тороидальной обмоткой

При намагничивании с помощью тороидальной обмотки магнитные силовые линии в детали, имеющей вид кольца или тороида, также имеют вид концентрических окружностей.

Намагничивание с помощью тороидальной обмотки применяют для выявления радиальных трещин на торцевых поверхностях, а также трещин, расположенных вдоль образующей детали, имеющей вид кольца или тороида. Использование такой схемы позволяет уменьшить ток за счет увеличения числа витков намагничивающего поля.

Расчет напряженности магнитного поля ведется по формуле:

$$H = \frac{I \cdot N}{l_{ср}} = \frac{2IN}{\pi(D_н + d_{вн})} \tag{13}$$

где I – сила тока, А;

H – напряженность магнитного поля, А/см;

N – количество витков, шт;

$l_{ср}$ – длина средней линии, см.

$$I = \frac{H \cdot l_{\text{ср}}}{N} = \frac{H\pi\left(D_{\text{н}} + d_{\text{вн}}\right)}{2N}. \tag{14}$$

Этот способ трудоемок, и в условиях контроля большого числа деталей неприемлем, так как много времени будет тратиться на обматывание детали и ее снятия. Однако, когда деталей немного, а тока, пропускаемого по центральному проводнику недостаточно, то тороидальная обмотка самый лучший способ обеспечения равномерного намагничивания всех поверхностей деталей.

Циркулярное намагничивание с помощью индуцированного тока

Если деталь слишком длинная или много однотипных полых деталей, то вместо тороидального способа можно применить индукционный (рисунок 51). Главное правильно рассчитать силу намагничивающего тока. Этот способ можно использовать пропусканием по катушке только переменного тока, тогда в первичном магнитопроводе возникает переменный магнитной поток Ф и в

соответствии с законом электромагнитной индукции он возбуждает в детали Д вихревые токи, которые, в свою очередь, согласно теореме о циркуляции образуют вторичное магнитное поле напряженностью Н, но уже на поверхности детали. Вот это вторичное поле и является рабочим, которое работает на выявление дефектов на всех поверхностях такой детали, ведь магнитное поле идет по поверхности всей детали.

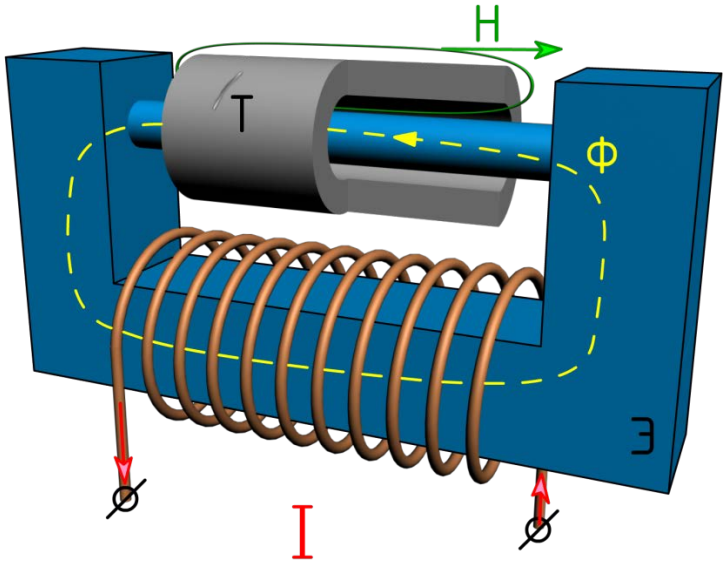


Рисунок 51 – Принцип индукционного намагничивания.

Индукционное намагничивание применяют для выявления кольцевых дефектов, расположенных на торцевых, внутренней и внешней поверхностях.

6.3.3 Комбинированное намагничивание

Комбинированное намагничивание достигается в результате одновременного продольного и циркулярного намагничивания и использования для него токов одного вида или токов разного вида с соответствующими моментами включения или с изменением их значений и направления. В этом случае возникает результирующее поле, величина которого зависит от параметров каждого из полей. Необходимо, чтобы суммарный вектор намагниченности поворачивался относительно оси детали в пределах 90°. Комбинированное намагничивание позволяет выявлять трещины, направленные под разными углами к оси

контролируемой детали.

При комбинированном намагничивании продольное намагничивание осуществляют с помощью соленоида или электромагнита, а циркулярное – пропусканием тока по детали или по центральному проводнику. Кроме того, комбинированное намагничивание можно осуществить одновременным циркулярным намагничиванием в двух направлениях (рисунок 52) пропусканием токов, сдвинутых по фазе на 90° посредством электроконтактов в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

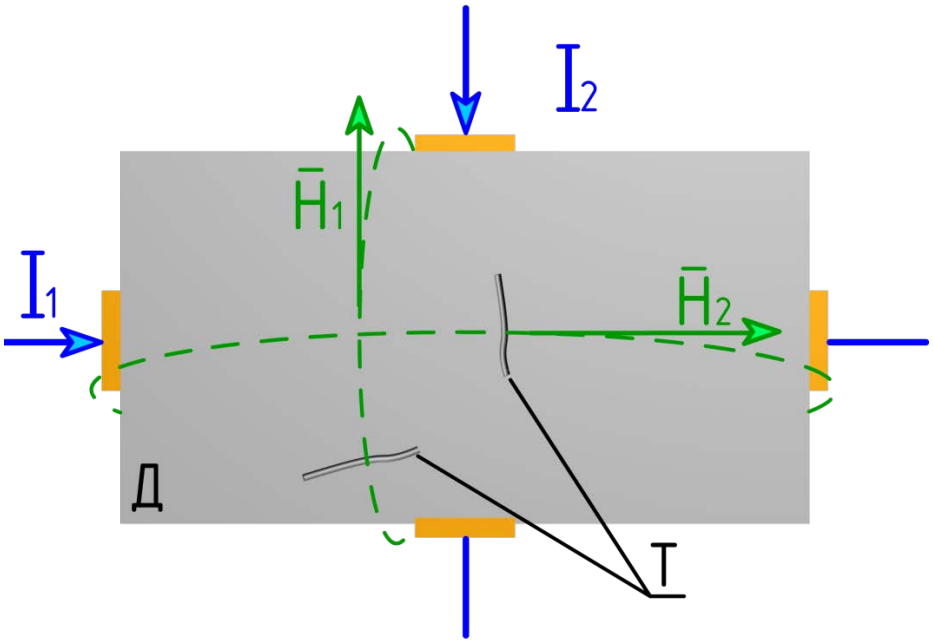


Рисунок 52 – Комбинированное намагничивание пропусканием тока в двух направлениях

6.4 Выбор магнитного индикатора и его нанесение на поверхность детали

Магнитный индикатор и способ его нанесения выбирается в зависимости от цвета, шероховатости, формы и пространственного расположения поверхности контроля.

Если поверхность контролируемой детали светлая или зеркальная и с низкой шероховатостью (кольца подшипников, новые оси колесных пар и т. п. – то для контроля используется темно-серый или черный индикатор (МИНК-030, ДИАГМА-110), шероховатые и темные поверхности контролируют цветными или

люминесцентными порошками и суспензиями. С точки зрения чувствительности контроля предпочтительнее люминесцентные индикаторы, но они требуют соответствующих ультрафиолетовых облучателей, обеспечения затемнения на участках, где освещенность контролируемой поверхности более 20 лк. Кроме того, при использовании люминесцентных индикаторов необходимы средства защиты дефектоскописта от вредного ультрафиолетового излучения (специализированные очки или маски, печатки, халаты).

Нанесение магнитного порошка на поверхность детали можно производить:

– мокрым способом;

– сухим способом;

– магнитогуммированной пасты;

– воздушной взвеси.

Мокрый способ

Наиболее распространенным и производительным способом нанесения порошка на контролируемую поверхность является мокрый способ.

После намагничивания или во время него деталь или ее контролируемый участок должны быть равномерно и обильно обработаны суспензией с заданной концентрацией порошка.

Нанесение индикатора проводится:

– либо путем полива детали суспензией;

– либо путем окунания ее в ванну с хорошо перемешанной суспензией (последний способ применяется в основном при использовании СОН).

Мокрый способ имеет несколько преимуществ перед сухим способом.

Во-первых, все поверхности изделия могут быть быстро и легко покрыты относительно однородным слоем частиц.

Во-вторых, жидкая основа обеспечивает подвижность магнитным частицам в течение большего промежутка времени, который позволяет скапливаться им в слабых полях рассеяния дефектов и формировать более чёткие индикации.

Поэтому, мокрый способ является наилучшим для обнаружения очень мелких дефектов гладкой поверхности.

Тем не менее, на грубой поверхности частицы (которые имеют очень маленькие размеры) могут скапливаться в неровностях поверхности и потерять подвижность, становясь менее эффективными чем сухие порошки при таких условиях.

При нанесении магнитной суспензии из аэрозольного баллончика распылением требуется соблюдение технологии:

– тщательно встряхивайте аэрозольный баллон с магнитной суспензией непосредственно перед использованием, пока не услышите, что шарики, способствующие перемешиванию, стучат свободно;

– удерживайте баллон на расстоянии 200 - 300 мм от поверхности.

При нанесении магнитной суспензии путём полива следует наносить её слабой струей, таким образом, и с такого расстояния, чтобы не смывать образующиеся индикаторные рисунки.

При поливе деталь следует располагать так, чтобы суспензия при стекании, не застаивалась в отдельных участках (углублениях, "карманах", между ребрами и др.).

Если направление движения суспензии, стекающей по поверхности детали, совпадает с направлением дефектов, картина осаждения порошка получается более чёткой.

При контроле СПП обработка деталей суспензией должна заканчиваться до того, как будет выключено намагничивающее поле. Магнитное поле в этом случае должно выключаться только после стекания основной массы суспензии.

Стекание основной массы суспензии - это состояние, при котором дальнейшее стекание суспензии не изменяет картины отложения порошка над дефектом, в том числе и при повторном включении намагничивающего устройства.

Суспензия должна быть тщательно перемешена непосредственно перед применением.

Сухой способ

Сухой способ контроля в основном применяется при контроле деталей, имеющих грубо обработанные поверхности, таких как отливки, поковки и т.п. Это связано с тем, что сухие порошки не скапливаются в шероховатостях поверхности.

При контроле СПП на поверхность испытуемой детали наносят сухой порошок, применяя при этом легкое постукивание по детали или встряхивание ее.

Применение сухих порошков эффективно при использовании переменного тока или выпрямленного однополупериодного тока создающих пульсирующее магнитное поле, которое обеспечивает подвижность порошка. В первую очередь сухой порошок применяется для необработанных сварных соединений, а также по грубым поверхностям, например, в литье.

Сухой способ также используется, чтобы обнаружить подповерхностные трещины. Сухой порошок в сочетании с выпрямленным однополупериодным током - лучший способ проведения контроля для обнаружения непровара в корне шва из тонких материалов. Сухой порошок в сочетании с выпрямленным однополупериодным током обычно используется для контроля литья с целью обнаружения горячих и холодных трещин.

При всех вариантах сухого способа, порошок следует наносить на контролируемую поверхность равномерно, без образования более темных (обогащенных) или светлых (обедненных порошком) мест.

Обычно для получения ясного, четкого рисунка над дефектом излишний порошок или сдувается, или удаляется путем поворачивания детали или путём наклона её, применяя при этом легкое постукивание.

Сила воздушной струи должна быть достаточно сильной, чтобы удалить лишние частицы, но не настолько сильная, чтобы нарушить положение частиц, образующие индикации и удерживаемые магнитными полями рассеяния над дефектами.

Сухой магнитный порошок нельзя использовать при контроле средней части оси седлообразным намагничивающим устройством, а также шеек оси, колец подшипников, участков с резьбой и цилиндрических деталей диаметром менее 60

мм. В остальных случаях можно использовать сухой или мокрый способ, хотя с точки зрения чувствительности предпочтительнее мокрый способ. Однако, если пропускать ток по детали или намагничивающим устройством с открытыми токоведущими частями в приложенном поле, то наносить суспензию опасно с точки зрения возможного поражения дефектоскописта током, в этом случае также лучше использовать сухой порошок. Кроме того, магнитные порошки не следует применять для поверхностей, которые нельзя обезжирить или просушить, а также для мелких деталей даже с плоскими поверхностями.

Разновидностью сухого способа является способ "воздушной взвеси" с помощью специальных установок закрытого типа. Из обычного серийно выпускаемого порошка выделяется высокодисперсная фракция (с размерами частиц 0,1-10 мкм), которая в виде воздушной взвеси наносится на деталь.

Контроль с применением способа воздушной взвеси должен проводиться либо в специальных камерах, обеспечивающих напыление только на контролируемую деталь, либо при наличии отсасывающих устройств.

Магнитные суспензии приготавливаются из компонентов и в пропорциях, представленных в таблице 4.

Выявляющую способность магнитных индикаторов проверяют с помощью стандартных образцов предприятий (СОП) с искусственными дефектами, при этом могут применяться специализированные приборы и отраслевые стандартные образцы.

Допускается проверку работоспособности средств контроля проводить с помощью СОП с естественными дефектами (не обнаруживаемыми визуально трещинами) при обеспечении проверки выявляющей способности магнитных индикаторов предварительно на специализированных устройствах (например, МОН-721, МФ-10СП) и режима намагничивания деталей. Периодичность проверки магнитных индикаторов представлена в таблице 5.

При поступлении с предприятия-изготовителя и после истечения гарантийного срока хранения магнитный порошок или КМС проверяют в дорожных или заводских лабораториях на соответствие требованиям технических

условий. По результатам проверки магнитных индикаторов должен быть оформлен акт.

Магнитные индикаторы могут быть использованы по назначению при получении положительных результатов проверки.

Таблица 4 – Магнитные суспензии

Основа индикатора	Жидкая среда и пропорции веществ	Особенности приготовления
цветные		
КМС ДИАГМА-1200	30±5 г/л воды	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду.
КМС МИНК-010	25±5 г/л воды	
темные		
КМС ДИАГМА-1100	40±5 г/л воды	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду.
КМС МИНК-030	25±5 г/л воды	
ТУ-6-36-05800165-1009-93	25±5 г/л воды с добавками по РД 32.159-2000	
порошок МИНК-070	25±5 г/л трансформаторного масла, дизельного топлива или керосиново-масляной смеси (масла 30% объема)	Необходимое количество порошка развести в небольшом объеме смеси до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся жидкую составляющую.
люминисцентные		
КМС ДИАГМА-1613	20±5 г/л воды	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду.
КМС ДИАГМА-2623	20±5 г/л воды	
КМС МИНК-045Л	10…15 г/л воды	

Дисперсионная среда магнитных суспензий должна быть чистой, прозрачной и обеспечивать хорошее смачивание контролируемой поверхности. Дисперсионная среда для приготовления суспензий на основе люминесцентных магнитных порошков не должна светиться при ультрафиолетовом облучении и гасить люминесценцию порошка.

Таблица 5 – Периодичность проверки магнитных индикаторов

Основания для проверки	Средства проверки	Сроки или периодичность
При поступлении новых индикаторов (с обязательным составлением акта о качестве индикатора)	МФ-10СП	При отсутствии сертификатов качества или других документов, удостоверяющих соответствие – при приобретении
При окончании срока годности индикатора		По истечении срока годности с назначением нового срока годности
После приготовления новой суспензии	На СОП с искусственными дефектами или МОН-721 и СОП с естественными дефектами или тест-образцах (тест-объектах)	Каждый раз
При повторном применении суспензии		Ежесменно
В начале смены		Ежесменно

При использовании в качестве дисперсионной среды магнитных суспензий технических масел или масляных смесей, не указанных в таблице, необходимо определять их кинематическую вязкость в лабораторных условиях, при этом:

- вязкость дисперсионной среды суспензий на основе магнитного порошка типа ПЖВ5-71 по ГОСТ 9849 должна быть в диапазоне от 5×10^{-6} до 36×10^{-6} $м^2/с$ (от 5 до 36 сСт) при температуре контроля;

- вязкость дисперсионной среды суспензий на основе черного магнитного порошка по ТУ6-36-05800165-1009 должна быть не более 10×10^{-6} $м^2/с$ (10 сСт) при температуре контроля.

Магнитные порошки и КМС хранят в закрытых емкостях в соответствии с требованиями инструкций по их применению. Магнитные суспензии хранят в плотно закрытых емкостях, изготовленных из немагнитных материалов. Водные магнитные суспензии при хранении и использовании необходимо оберегать от попадания в них технических масел, керосина и других загрязняющих материалов, которые могут вызвать коагуляцию магнитных частиц. Магнитные суспензии, приготовленные с применением технических масел и смеси масел с дизельным топливом или керосином, необходимо оберегать от попадания в них воды и загрязнений, которые могут вызвать коагуляцию магнитных частиц.

6.5 Осмотр и идентификация дефектов

Технология магнитопорошкового контроля при обнаружении индикаций от дефектов на поверхности детали полагается, главным образом, на визуальный осмотр. Поэтому, освещение – это очень важный элемент технологического процесса. Совершенно очевидно, что требования к освещению и проведению осмотра различны для магнитных частиц, видимых в обычном свете по отношению к осмотру, проводимому с использованием флуоресцентных частиц, видимых в ультрафиолетовом свете.

Не менее важным является адаптация глаз дефектоскописта к используемому освещению.

6.5.1 Освещение для магнитных частиц, видимых в обычном свете

При проведении магнитопорошкового контроля с использованием частиц видимых в обычном свете может проводиться с использованием естественного или искусственного освещения. Используя естественное освещение, важно иметь в виду, что дневной свет изменяется на протяжении светового дня. Дефектоскопист должен быть постоянно осведомлён об уровне освещённости и, при

необходимости, вносить соответствующие корректировки. С целью выравнивания уровня освещенности при проведении осмотра рекомендуется использование дополнительного искусственного освещения. Искусственное освещение всегда должно быть белым, например, галогеновые лампы дневного света. Для проведения осмотра необходимо выбрать такую комбинацию уровня освещённости, например, общего освещения с использованием дневного света и дополнительного искусственного освещения, а также его направление, которые обеспечат достаточную освещённость, но не приведут к чрезмерному отражению света от поверхности детали, который может затруднить проведение осмотра. В большей степени это касается гладких блестящих поверхностей.

В зонах, затрудненных для проведения осмотра, узел изделия или оснастка должны быть размещены или их положение изменено таким образом, чтобы обеспечить доступ для осмотра всех зон.

Особое внимание следует обратить на то, чтобы гарантировать, что индикации не будут повреждены после проведения намагничивания, прежде чем участок изделия будет осмотрен, а индикации зарегистрированы.

Согласно ГОСТ Р 56512-2015 освещенность осматриваемой поверхности деталей должна быть не менее 1000 лк. При этом следует применять комбинированное освещение.

Осмотр деталей, как правило, проводится невооруженным глазом. В сомнительных случаях могут быть применены лупы с 2÷4 кратным увеличением.

Осмотр контролируемой поверхности проводят после стекания основной массы суспензии.

Осмотр деталей с высокой чистотой обработки поверхности затрудняется из-за наличия бликов на поверхности, особенно мешающих контролю при освещении локализованными источниками света (например, лампами накаливания). Для устранения бликов такие детали рекомендуется покрывать тонким до 5 мкм слоем белой нитроэмали (например, НЦ-25 - белой краски и др,), при этом чувствительность контроля практически не меняется. Максимальная толщина слоя согласно ГОСТ Р 56512-2015 может составлять до 40 мкм.

При контроле деталей высокой чистоты обработки поверхности эффективным является применение способа контроля с использованием люминесцентного магнитного порошка. Осмотр под ультрафиолетовой лампой исключает появление бликов, затрудняющих обнаружение дефектов.

6.5.2 Ультрафиолетовое освещение

При проведении магнитопорошкового контроля с использованием флуоресцентных частиц должны быть проверено состояние ультрафиолетового света и окружающего белого света.

Перед проведением контроля необходимо провести проверку состояния стекла на лампе источника ультрафиолетового UV-A излучения и интенсивность освещённости. Источники ультрафиолетового UV-A излучения никогда не должны использоваться со сломанным фильтром, поскольку увеличится интенсивность белого света, что окажет отрицательное влияние на ультрафиолетовый UV-A свет. Должна регулярно и своевременно проверяться чистота фильтра, так как различного рода жидкости, масла, а также другие вещества могут снизить интенсивность излучения до 50 %. Фильтр должен проверяться визуально и очищаться по мере необходимости перед включением источника.

Проверка должна быть выполнена после замены лампочки, перед проведением контроля, если есть подозрение на изменение интенсивности, или каждые восемь часов в случае непрерывном использовании. Регулярная проверка интенсивности источника ультрафиолетового UV-A излучения очень важна и потому, что лампочки теряют свою интенсивность при использовании в течение долгого времени. В конце срока службы лампочка может иметь интенсивность составляющую только 25 % от её первоначальной величины. На интенсивность ультрафиолетового UV-A излучения будут оказывать изменениями напряжения в сети, поэтому необходимо обеспечить неизменное напряжение для освещения.

При проведении контроля с использованием люминесцентных магнитных порошков осмотр контролируемой поверхности проводят в УФ-излучении, при этом УФ-облученность контролируемой поверхности должна быть не менее 800 мкВт/см^2 (согласно нормативной документации на железной дороге, хотя

ГОСТ 56512-2015 рекомендует облученность не менее 2000 мкВт/см^2). При этом освещенность в видимом свете должна быть не более 20 лк, то есть рабочее место должно находиться в затемненном месте.

6.5.3 Измерение освещённости

Измерение интенсивности освещённости контролируемой поверхности производится с помощью люксметров (рисунок 53).

Простейший люксметр состоит из селенового фотоэлемента, который преобразует световую энергию в энергию электрического тока, и измеряющего этот фототок стрелочного микроамперметра со шкалами, проградуированными в люксах. Разные шкалы соответствуют различным диапазонам измеряемой освещённости. Переход от одного диапазона к другому осуществляют с помощью переключателя, изменяющего сопротивление электрической цепи. Ещё более высокие освещённости можно измерять, используя надеваемую на фотоэлемент светорассеивающую насадку, которая ослабляет падающее на элемент излучение в определённое число раз (постоянное в широком интервале длин волн излучения).

а) б) в)

Рисунок 53 - Люксметры: a - DT-1308; b – MS - 6610; c – Testo - 540

Чувствительная область преобразователя должна всегда сохраняться чистой и свободной от различного рода затенения, которые могут уменьшить или препятствовать попаданию светового потока на преобразователь.

Показания люксметров с течением времени могут существенно изменяться. Поэтому, они должны регулярно проходить поверку или калибровку. Для

уверенности в правильности проведения измерений необходимо убедиться в том, что прибор проверен или калиброван.

6.5.4 Ложные индикации

При магнитопорошковом контроле осаждение порошка может происходить не только в местах трещин и других действительных дефектов, но и в местах их отсутствия. Это связано с тем, что при намагничивании деталей магнитные поля рассеяния возникают в случаях изменения рельефа поверхности, сечения детали, локального изменения магнитных свойств металла изделия. Эти изменения не снижают механические или эксплуатационные свойства изделия.

Осаждение порошка, на проверяемой детали при отсутствии на ней действительных дефектов назвали мнимыми или ложными.

Часто индикаторные рисунки над действительными и мнимыми дефектами отличаются незначительно. Требуется знание характерных признаков мнимых дефектов и методических приёмов для расшифровки осаждений над ними.

1) Ложное осаждение порошка по границе сварного шва. Во многих случаях параллельно сварному шву на расстоянии 4-8 мм от него происходит осаждение порошка на границе зоны термического влитии. Это оседание, как правило, менее чёткое и размытое, что позволяет отличать его от оседаний, связанных с нарушением сплошности. Если на границе шов-металл или на границе зоны термического влияния появляется заметно более интенсивное осаждение порошка, то деталь в этом месте следует зачистить и провести повторный магнитный контроль. Если после зачистки оседание порошка усилятся, то это может свидетельствовать о наличии трещины.

2) Осаждение порошка по местам грубой или некачественной обработки поверхности. Порошок заполняет все углубления поверхности, количество над ним растет с увеличением напряженности поля. *Легко распознаётся при осмотре с помощью лупы.*

3) Осаждение порошка в местах резкого изменения сечения детали.

Магнитный порошок осаждается в виде размытых полос. Для расшифровки такого мнимого дефекта дополняют сечение детали, например, вставляют болт, шпонку и т.д. При повторном намагничивании и нанесении суспензии оседание порошка не происходит, если в этом месте нет дефекта. Если дополнить сечение детали не представляется возможным, то на место мнимого дефекта наносят суспензию с пониженной концентрацией порошка, а процесс накопления порошка наблюдают через лупу.

4) Результат так называемой «магнитной записи» или осаждение порошка по месту касания намагниченной детали каким-либо ферромагнитным предметом или соприкосновением детали с намагниченным телом. *Для расшифровки такого мнимого дефекта контролируемую деталь размагничивают и намагничивают повторно.* После повторного намагничивания осаждение порошка не происходит.

5) Местный наклёп один из видов ложных дефектов. Он является следствием ударов, надавливаний, клеймения, бросков и т.д. В случаях легкой деформаций отложения порошка неустойчивы и при повторном контроле могут пропадать. Сильные деформации дают устойчивые отложения порошка. В местах поверхностного наклёпа и забоин образуется слабое поле рассеяния с малым градиентом и происходит слабое размытое осаждение порошка. Порошок слабо удерживается в месте наклепа. В местах наклёпа после снятия осевшего порошка, иногда видна светлая полоска. Забоины обычно видны при осмотре невооружённым глазом или через лупу.

6) Осаждение порошка в виде цепочек, ориентированных по магнитным силовым линиям поля возникает обычно в приложенном магнитном поле. Такое осаждение порошка свидетельствует о чрезмерной концентрации магнитной суспензии.

7) Осаждение порошка, в местах больших внутренних напряжении имеет вид широкой (1-2 мм) полосы. Порошок слабо удерживается на поверхности детали. Часто наблюдается на болтах с большой наработкой.

6.5.5 Типы выявляемых дефектов

Основной задачей магнитопорошкового метода является обнаружение трещин. При этом трещины могут быть различного происхождения и понимание природы их возникновения, и местоположение помогает дефектоскописту в правильной оценке. Обнаружение других дефектов является вспомогательной задачей – например, подповерхностных литейных дефектов, закатов, плен и т. д.

Трещины могут быть эксплуатационными и производственного происхождения. Эксплуатационные трещины еще называют усталостными, и они являются в деталях подвижного состава одними из самых опасных. Усталостные трещины как правило развиваются в поперечном или в наклонном направлении.

Кроме усталостных трещин в деталях могут встречаться трещины производственного происхождения:

– горячие трещины и холодные трещины литых деталей;

– трещины, возникшие при обработке давлением;

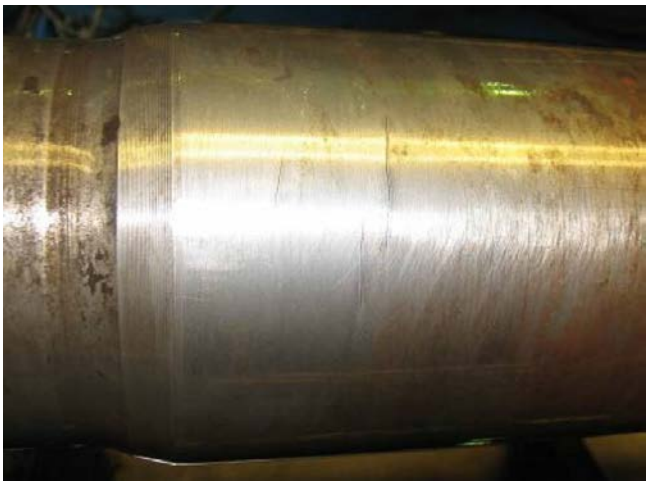
– закалочные трещины;

– шлифовочные трещины;

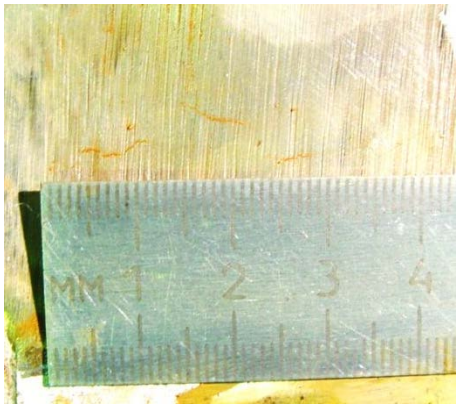
– волосовины и расслоения, выходящие на поверхность вследствие деформации литейных дефектов.

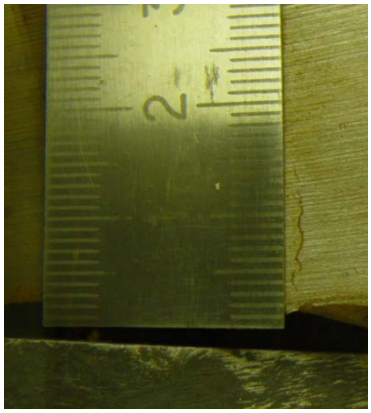
Примеры поверхностных дефектов и их магнитные индикации приведены на рисунке 54.

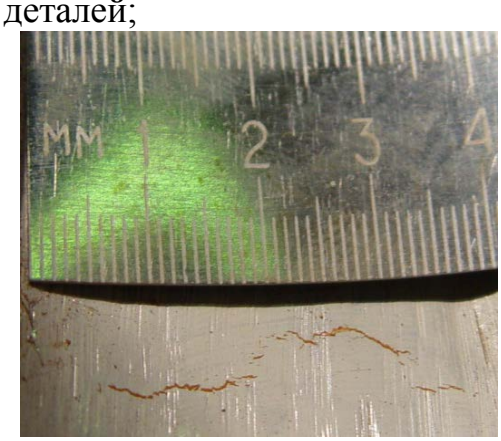
1) усталостные трещины



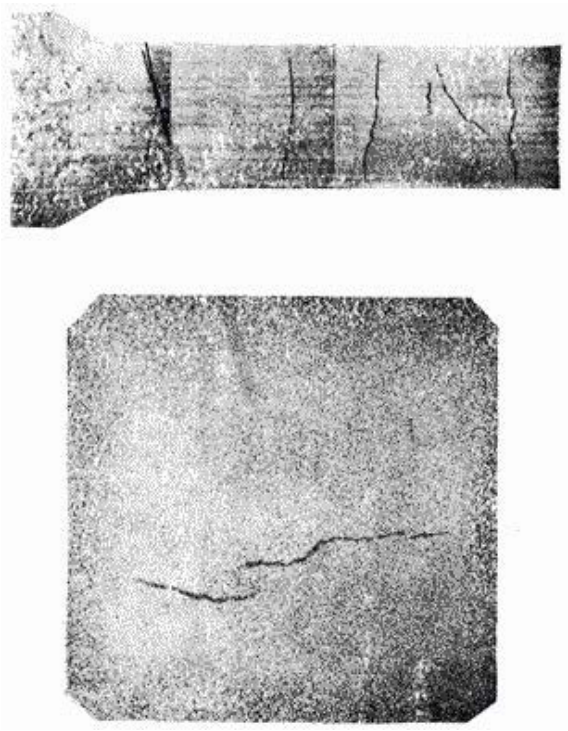
2) горячие трещины и холодные трещины литых деталей;



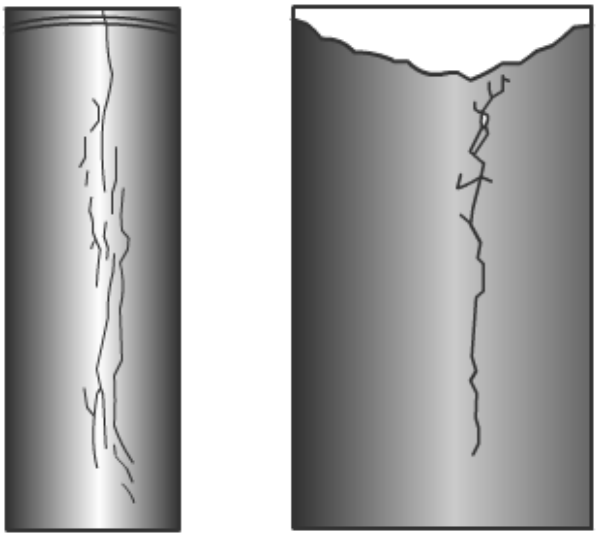




3) трещины, возникшие при обработке давлением;



4) закалочные трещины;



5) шлифовочные трещины;

6) волосовины и расслоения, выходящие на поверхность вследствие деформации литейных дефектов.

Рисунок 54 – Типы поверхностных дефектов, выявляемых магнитопрошковым методом

6.6 Измерители величины магнитного поля

Определение требуемой величины магнитного поля, а также надлежащего направления силовых магнитных линий, являются основой для качественного проведения магнитопорошкового контроля.

Направление линий магнитного поля в контролируемой области должно быть близко к 90^0 по отношению к направлению предполагаемого дефекта. Способность оценивать направление линий магнитного поля и его величину особенно важно при проведении намагничивания в разных направлениях, так как в таких случаях могут образовываться области, не сбалансированные должным образом в которых вектор магнитного поля может располагаться таким образом, что не будет обнаружена часть неблагоприятно ориентированных дефектов.

Фактически не существует «простого метода», с помощью которого были бы произведены точные измерения напряженности поля в данной точке внутри материала.

Для того чтобы измерить напряженность магнитного поля, необходимо прервать линии магнитной индукции.

Это невозможно сделать, не разрезая материал детали. В свою очередь, в разрезанной области материала произойдёт немедленное изменение магнитного поля.

Тем не менее, прорезка небольшой щели или отверстия в материале и измерение поля рассеяния, которое пересекает воздушный зазор с помощью прибора для измерения напряжённости магнитного поля (тесламетра, гауссметра) вероятно лучший способ получить оценку величины фактической напряженности магнитного поля внутри детали.

В настоящее время существует достаточное количество инструментальных средств и удовлетворительных методик для определения наличия и направления магнитного поля на поверхности контролируемого участка детали.

Преобразователи Холла обычно используется, чтобы измерять тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля на поверхности детали.

При этом производится измерение напряженности поля в воздушном зазоре с плотно прилегающей поверхностью детали в приложенном поле.

Сущность эффекта Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов (ЭДС Холла) в прямоугольной полупроводниковой пластинке в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под действием силы Лоренца (сила, действующая со стороны электромагнитного поля на движущуюся частицу).

Преобразователи Холла выполняют в виде тонких (10-20 мкм) пластинок. Выпускаются кремниевые, германиевые и арсенид-галлиевые преобразователи Холла. Пластинки, доведенные шлифовкой до указанной толщины, наклеивают на подложку из радиотехнической слюды, ультрафарфора (рисунок 55).

В качестве единиц отображаемых измеряемых величин на индикаторе прибора (рис.56) могут быть:

– кА/м, А/см;
– Тесла, Тл;
– Гаусс, Гс;
– Эрстед, Э.

Преимущества приборов с преобразователями Холла:

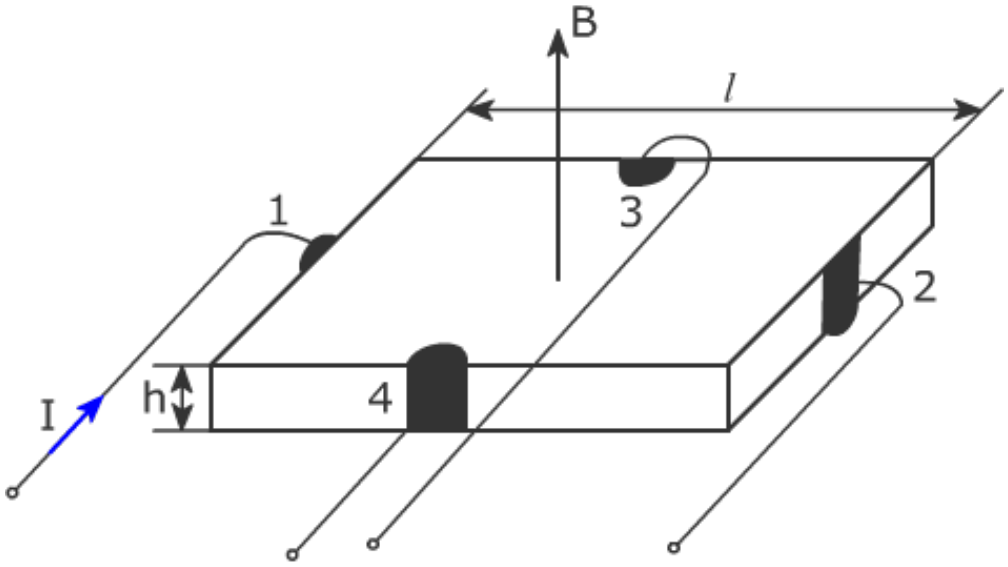


Рисунок 55 – Преобразователь Холла

Рисунок 56 – Магнитометр

– дают количественную меру величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности участка контролируемой детали;

– могут использоваться для измерения постоянного, переменного и импульсного поля;

– могут использоваться для измерения величины остаточных магнитных полей;

– могут использоваться многократно.

Их основными недостатками являются:

– должны периодически проходить поверку (калибровку);

– не могут использоваться, для установки равновесия величин напряжённости полей при комбинированном намагничивании.

Существует несколько типов преобразователей Холла для измерения величины магнитного поля. Как правило, для измерений используются преобразователи поперечного типа. В преобразователях поперечного типа преобразователь Холла установлен в тонком, плоском корпусе в виде пластины, и используются для проведения измерений между магнитными полюсами. В осевых преобразователях чувствительный элемент устанавливается таким образом, чтобы магнитный поток измерялся вдоль оси корпуса преобразователя (рисунок 57).

Для проведения измерений преобразователем Холла с поперечным расположением, его необходимо расположить таким образом, чтобы плоская поверхность элемента Холла пересекала силовые линии магнитного потока. Напряжение на преобразователе Холла зависит от угла, под которым магнитные линии потока проходят через чувствительный элемент. Самое большое напряжение на преобразователе Холла возникнет тогда, когда силовые линии магнитного потока проходят перпендикулярно через чувствительный элемент.

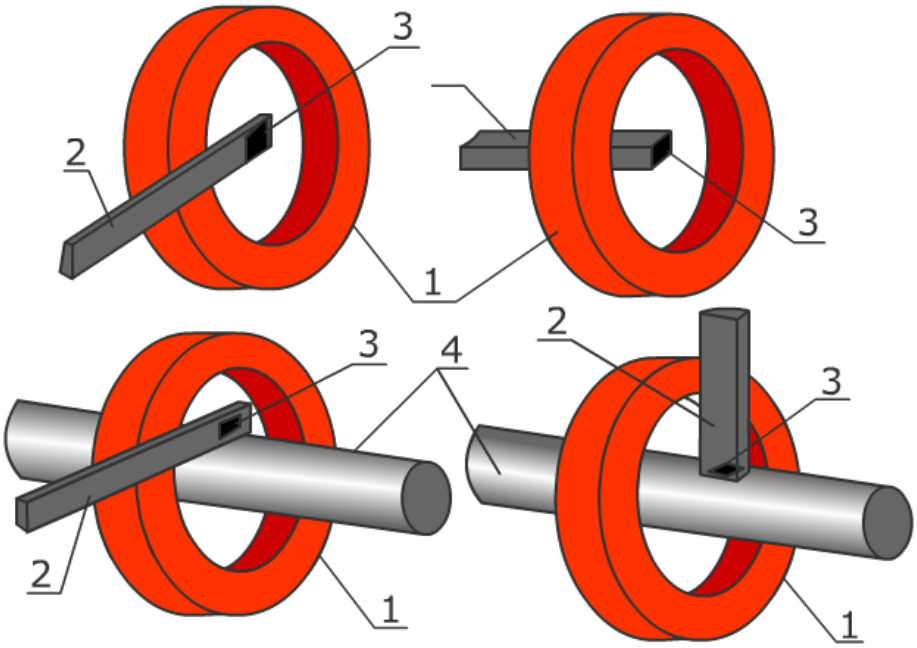


Рисунок 57 - Схемы измерения напряжённости магнитного поля в соленоиде поперечными (а) и продольными (б) преобразователями Холла: 1 – соленоид; 2 – преобразователь; 3 – чувствительный элемент Холла; 4- деталь.

Число точек, в которых измеряют напряженность магнитного поля, и их местоположение на контролируемой поверхности зависят от формы детали, а также от типа и конструкции применяемого устройства для намагничивания. При проведении измерений преобразователь с чувствительным элементом Холла должен касаться поверхности детали в точке, в которой проводят измерение.

Тангенциальную H_t, и нормальную H_n составляющие вектора напряженности магнитного ноля измеряют в одной и той же точке.

Область эффективной намагниченности (по ГОСТ Р 56512-2015) или зона достаточного намагничивания *(ДН)* – это часть детали, находящаяся внутри соленоида и с двух его внешних сторон (рисунок 58).

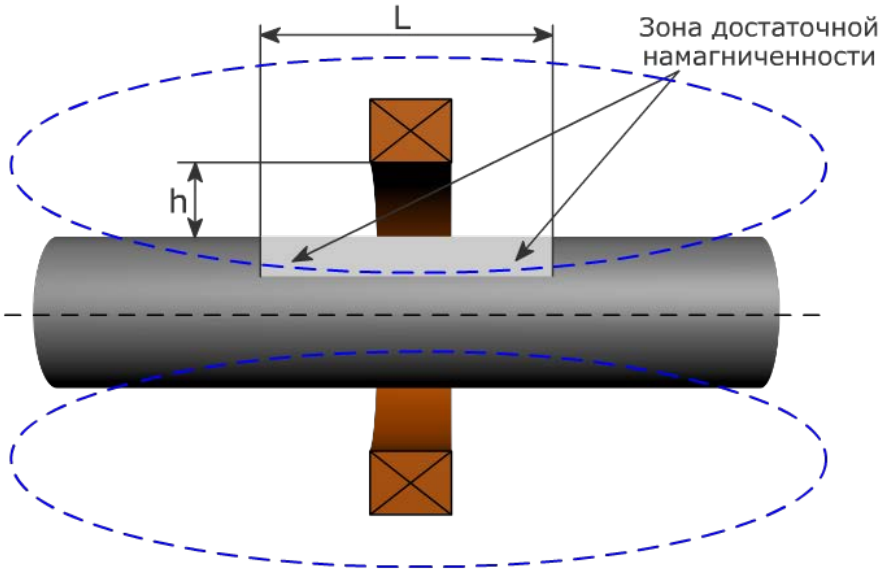


Рисунок 58 – Зона достаточной намагниченности

Длина *L* зоны достаточного намагничивания (ДН) зависит при этом от формы и размеров детали, положения соленоида относительно делали и величины зазора между корпусом соленоида и контролируемой поверхностью.

6.7 Размагничивание деталей

Намагниченные детали после осмотра и разбраковки должны быть размагничены, так как остаточная намагниченность может вызвать нежелательные последствия. Такие как, ускоренный износ поверхности плохо размагниченных трущихся деталей. Во избежание этого контролируемые детали тщательно размагничивают и проверяют степень размагниченности. Размагничивание как этап контроля часто присутствует в магнитном контроле, но не влияет на его достоверность, т. е. это скорее не контроль, а приведение детали в состояние, пригодное для дальнейшего использования.

Способы размагничивания:

1) Нагревание объекта до точки Кюри (для ферромагнетиков она лежит в

большом диапазоне, у железа – 768 °С);

2) Однократное приложение встречного поля «большой силы»;

3) Воздействие знакопеременным полем с уменьшением его амплитуды во времени.

Первые два способа, в отличие от последнего, в практике магнитного НК не применяются в силу ряда технологических и технических ограничений.

Сущность третьего способа размагничивания состоит в следующем. Деталь подвергают циклическому перемагничиванию переменным полем, напряженность которого по амплитуде с каждым полупериодом уменьшается до нуля (рисунок 59). К моменту, когда она достигнет почти нулевого значения, остаточная индукция также будет близка к нулю.

Существуют две процедуры исполнения данного способа размагничивания, когда величину размагничивающего поля уменьшают, либо удаляя соленоид от ОК, либо снижая ток в его обмотке. Некоторые дефектоскопы имеют режимы автоматического снижения тока в намагничивающих устройствах, но в большинстве случаев детали помещают в соленоид, включают его и плавно в течение не менее 5 с, осуществляют их относительное удаление на расстояние не менее 0, 5 м, после чего соленоид выключают.

Независимо от путей исполнения данного способа процесс размагничивания идет по частным петлям гистерезиса, видно, что остаточная индукция уменьшается от цикла к циклу. Число периодов размагничивания обычно не менее 40 – 50, т. е. уменьшение амплитуды напряженности должно быть достаточно плавным. Полного размагничивания достичь, конечно, не удается, поскольку все детали находятся в магнитном поле Земли.

Детали необходимо размагничивать до уровня, при котором остаточная намагниченность не нарушает нормальной работы машин и механизмов.

На подвижном составе железнодорожного транспорта установлены предельные уровни остаточного поля: для колец буксовых подшипников – не более 3 А/см; для всех остальных деталей – не более 5 А/см.

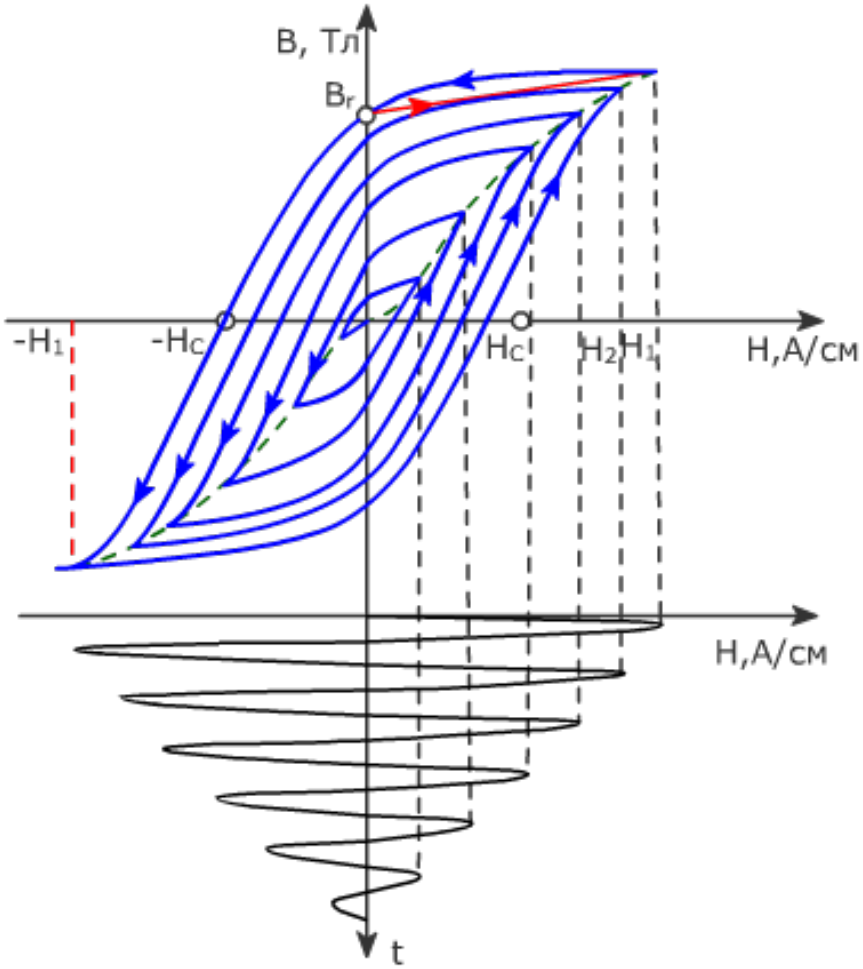


Рисунок 59 – Процесс размагничивания в переменном поле

Контрольные вопросы

1. *Какие подготовительные операции необходимы перед проведением магнитопорошкового контроля*
2. *От чего зависит выбор вида намагничивания?*
3. *Перечислите способы полюсного намагничивания?*
4. *Перечислите способы циркулярного намагничивания?*
5. *В каких случаях используется комбинированное намагничивание?*
6. *Какие требовании предъявляются к освещению контролируемых в видимом свете поверхностей?*
7. *Какие требовании предъявляются к освещению контролируемых в ультрафиолетовом свете поверхностей?*

8. Какой способ циркулярного намагничивания полых деталей наиболее надежен?

9. Что такое область эффективного намагничивания?

10. В чем достоинства и недостатки намагничивания тороидальной обмоткой?

11. В чем принцип индукционного намагничивания?

12. Какие условия надо соблюдать при намагничивании детали в соленоиде?

13. Какими вариантами можно обеспечить комбинированное намагничивание?

14. Для чего производят измерение характеристик магнитного поля?

15. Объясните физический принцип работы датчика Холла.

16. Можно ли контролировать детали, на которых нанесено немагнитное покрытие и при каких условиях?

17. Что такое сухой способ?

18. В чем преимущества мокрого способа контроля?

19. Какие способы размагничивания вы знаете?

20. Какой способ размагничивания чаще всего используется в производственных условиях?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитопорошковая дефектоскопия занимает важную роль в обеспечении надежности качественного изготовления и эксплуатации большинства деталей подвижного состава, ряда опасных производственных объектов. Поэтому, специалисты, занимающиеся обеспечение качества работы таких объектов неизбежно сталкиваются с проведением магнитопорошкового контроля, а в ряде случаев и других магнитных методов. Поэтому инженерный и рабочий персонал, занятый в технологических процессах обеспечения надежности выпускаемых деталей и единиц подвижного состава при производстве, ремонте и периодической диагностике, должен иметь базовые знания и навыки работы магнитопорошковым и другими методами магнитного контроля, как составной частю производственного процесса.

Описанные в данном методическом пособии физические и технологические основы магнитных методов контроля, и в частности – магнитопорошкового направленны на получение первичных знаний в этой области технического контроля. Приводимый материал позволяет его использовать как основу для подготовки к сертификации на I и II уровни квалификации специалистов по магнитопорошковому контролю объектов железнодорожного транспорта.

Более развернуто физические принципы, справочные сведения о магнитных материалах и примеры технологических операций контроля ферромагнитных объектов магнитными методами изложены в библиографическом списке, приведенном ниже.

Библиография

1. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия в рисунках и фотографиях. Практическое пособие. – М.: ИД «Спектр», 2002. – 324 с.
2. Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитный контроль. Учебное пособие. – М.: ИД «Спектр», 2015. – 192 с.
3. Александров А.Г., Глазков Ю.А. Технологические карты по магнитопорошковому контролю деталей авиационной техники. Методические рекомендации по составлению. – Люберцы: ГНИИ МО РФ, 1995. - 76 с.
4. Ахмеджанов Р.А. Физические основы магнитного неразрушающего контроля: Конспект лекций. – Омск: ОмГУПС, 2004г. - 80 с.
5. Марцинкевич А. Курс лекций по магнитопорошковому методу НК. – Минск: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2010, - 148с.
6. Толмачев И.И. Физические основы и технология магнитопорошкового контроля. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 125 с.
7. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 218 с.
8. Неразрушающий контроль: Справочник: 8 т. / Под ред. В.В. Клюева. Т 4: В 3 кн. Кн 1. В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н.Куценко и др. Акустическая тензометрия. Кн. 2. Г.С. Шелихов. Магнитопорошковый метод контроля. Кн. 3. М.В. Филинов. Капиллярный метод. – М.: Машиностроение, 2006. – 736 с.

Учебное издание

ОСНОВЫ МАГНИТНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
Учебное пособие

Авторы: Бобров Алексей Леонидович,
Лесных Елена Владимировна

Редактор: к. т. н. доц. Е. В. Бояркин

Технический редактор:
Корректор:

Компьютерная верстка:

Изд. лиц. ЛАР № 021277 от 06.08.98

Подписано в печать

Заказ № _____ Тираж 100 экз. Объем 6,3 п. л.

Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения

630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.

Тел./факс: (383-2) 287-381. E-mail: press@stu.ru