

Министерство образования Республики Беларусь
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»

В. А. Новиков

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области обеспечения качества в качестве учебного пособия
для обучающихся по специальности
1-54 01 02 «Методы и приборы контроля качества
и диагностики состояния объектов»*

Могилев
«Белорусско-Российский университет»
2020

УДК 620.179(075.8)
ББК 31.222я73
Н73

Рекомендовано к изданию Ученым советом Белорусско-Российского университета
«27» декабря 2019 г., протокол № 3

Р е ц е н з е н т ы :
кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии»
Белорусского национального технического университета
(зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. *Р. И. Воробей*);
д-р техн. наук *А. П. Гусев*

Новиков, В. А.

Н73 **Магнитный контроль в вопросах и ответах: учебное пособие / В. А. Новиков.** – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – 347 с.: ил.
ISBN 978-985-492-248-5.

Освещены вопросы физики магнитных явлений, физические основы магнитного контроля материалов и изделий, приведены методики расчета режима намагничивания и оптимизации размеров намагничивающих устройств для магнитографической дефектоскопии, представлен ряд методических указаний к лабораторным работам, дано краткое руководство по разработке технологической карты по магнитопорошковому контролю, приведены тесты для подготовки к сдаче экзаменов по магнитному контролю.

Рекомендовано для студентов высших и средних специальных учебных заведений, инженерно-технических работников лабораторий неразрушающего контроля предприятий, а также слушателей курсов, проводимых с целью сертификации специалистов по магнитному контролю.

**УДК 620.179(075.8)
ББК 31.222я73**

ISBN 978-985-492-248-5

© Новиков В. А., 2020
© Межгосударственное образовательное
учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский
университет», 2020

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние годы всевозрастающее внимание в передовых странах мира уделяется качеству выпускаемой продукции. Важную роль в этом вопросе занимает неразрушающий контроль (НК). Высокая эффективность НК достигается не только правильным выбором методов контроля, применением современных средств его реализации и использованием эффективных методик, но и высокой профессиональной подготовкой операторов-дефектоскопистов. В связи с этим в Республике Беларусь организована Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики, осуществляется подготовка инженеров по специальности «Методы и приборы неразрушающего контроля и диагностики состояния объектов», проводится обучение и сертификация специалистов организаций и предприятий. По вопросам неразрушающего контроля периодически проходят научно-технические конференции и семинары, организуются конкурсы на получение грантов, защищаются диссертации, издаются научные журналы и книги, разрабатываются новые способы и средства неразрушающего контроля.

Повышению качества выпускаемой продукции и ее конкурентоспособности на мировом рынке, по мнению автора, будет способствовать и настоящая книга. При написании учебного пособия автор преследовал несколько целей: побудить интерес учащихся к специальным знаниям и облегчить усвоение ими учебного материала; сделать более популярными знания по магнитной дефектоскопии материалов и изделий среди широкого круга читателей; повысить профессиональную культуру и квалификацию будущих специалистов по неразрушающему контролю.

Несмотря на то, что материал в книге излагается в виде вопросов и ответов, сообщаемые сведения носят системный характер. Чтобы обострить интерес читателя, некоторые вопросы имеют занимательное содержание. Предполагается, что читатель будет время от времени обращаться к книге после ее первого прочтения, останавливаясь на тех местах, которые им слабо усвоены.

ВВЕДЕНИЕ

Важными задачами народного хозяйства являются увеличение надежности и повышение срока эксплуатации машин и объектов, предотвращение аварий энергетических установок и транспортных средств, экономия трудовых ресурсов и материальных затрат. Этому во многом способствует применение неразрушающих методов контроля материалов и изделий.

Современные высокотехнологичные производства используют широкий спектр неразрушающих методов контроля. В настоящее время существует девять видов неразрушающего контроля, каждый из которых подразделяется на ряд методов. Всякий метод контроля имеет область наиболее эффективного применения, определяемую его физическими особенностями и возможностями.

Среди видов неразрушающего контроля достойное место занимает магнитный, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий. В частности, магнитопорошковая дефектоскопия осуществляется путем регистрации магнитных полей рассеяния, создаваемых дефектами, с помощью частиц магнитного порошка. Этот метод предназначен для обнаружения дефектов в виде узких наружных (поверхностных и подповерхностных) трещин, непроваров, расслоений, закатов, надрывов и т. д. При благоприятных условиях могут быть выявлены поверхностные несплошности шириной 0,001 мм и длиной 0,5 мм. Благодаря высокой чувствительности и наглядности получения результатов испытаний метод получил широкое распространение в промышленности. Часто ему отдают предпочтение при равных условиях и применяют в наиболее ответственных случаях.

Магнитографический метод контроля (МГК) не требует тщательной и трудоемкой зачистки контролируемой поверхности объекта и позволяет обнаруживать нарушения сплошности в металле толщиной от 2 до 25 мм. В последние годы благодаря разработке высокоэффективных способов и средств МГК этот метод по своим возможностям приблизился к методам акустической и радиационной дефектоскопии. В настоящее время его возможности в промышленности до конца не использованы.

В условиях серийного и массового производства незаменимы феррозондовые и индукционные дефектоскопы. Обнаружение дефектных мест изделий осуществляется ими с помощью феррозондовых и индукционных преобразователей.

Все большее применение в промышленности находят методы магнитного контроля, использующие для регистрации магнитных полей рассеяния, создаваемых дефектами, другие средства. В частности, для обнаружения дефектов, их идентификации, определения величины и глубины залегания

дефекта, для выявления измененных номеров кузовов автомобилей нашла применение визуализирующая магнитные поля пленка.

В пособии освещены общие вопросы физики магнитных явлений, физические основы магнитного контроля материалов и изделий, рассмотрены способы намагничивания и размагничивания объектов. Приведены методики расчета режима намагничивания и определения размеров намагничивающих устройств для магнитографической дефектоскопии, дано краткое руководство по разработке технологической карты по магнитопорошковому контролю, представлен ряд методических указаний к лабораторным работам. Разработаны тесты и ответы на них, охватывающие индукционный, магнитопорошковый, феррозондовый и магнитографический методы контроля, для подготовки к общему и специальным экзаменам по магнитному контролю с целью сертификации специалистов по СТБ ЕН 473–95.

1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Магнитное поле и его характеристики. Краткие сведения о ферромагнетизме. Свойства ферромагнетиков. Парамагнетики и диамагнетики. Физические величины, характеризующие магнитные свойства вещества. Кривая намагничивания. Напряженность магнитного поля, намагниченность, магнитная индукция, индукция технического насыщения, магнитная проницаемость. Домены. Особенности намагничивания ферромагнетиков. Петля гистерезиса. Коэрцитивная сила. Частные циклы гистерезиса. Намагничивание ферромагнитного тела и вещества. Образование поля дефекта при намагничивании объекта контроля. Область режимов намагничивания. Обнаружение полей дефектов при различных методах контроля. Классификация методов и средств магнитного контроля. Первичные магнитные преобразователи. Определение статических магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

1.1. Магнитное поле и его характеристики

В чем отличие электромагнитного, магнитного и электрического полей?

Электромагнитное поле представляет собой совокупность изменяющихся во времени, взаимно связанных и обуславливающих друг друга электрического и магнитного полей. *Электромагнитными* называют переменные поля, в которых электрическая и магнитная составляющие соизмеримы. Электромагнитное поле – это физическое поле, посредством которого осуществляется взаимодействие между *движущимися* электрически заряженными объектами. Электромагнитное поле характеризуется напряженностью электрического поля \vec{E} и напряженностью магнитного поля \vec{H} .

При малых токах и высоких напряжениях в создаваемом поле преобладает электрическая составляющая. Такое поле называется *электрическим* (электростатическим). *Электрическое поле* – это одна из форм проявления электромагнитного поля. Электрическое поле, как и магнитное, является одним из видов материи. Оно действует как на неподвижные, так и на движущиеся электрические заряды. Эта сила не зависит от скорости движения заряда. *Источниками электрического поля* являются электрические заряды и изменяющиеся во времени магнитные поля. Существование электрического поля в пространстве может быть обнаружено по его силовому действию на *неподвижные* заряды.

Если в проводнике протекает ток большой величины при малых значениях напряжения, то в поле преобладает магнитная составляющая, а поле называется *магнитным*. *Магнитное поле* – также одна из форм проявления электромагнитного поля. *Источниками магнитного поля* являются проводники с током, частицы или тела, обладающие магнитным моментом (магнитные частицы), а также движущиеся электрически заряженные объекты. Магнитное поле возникает при изменении во времени электрического поля. *Наличие магнитного поля* в пространстве может быть обнаружено по его силовому действию на магнитную стрелку, перемещаемый пробный электрический заряд, проводник с током при соответствующем его расположении. Силовые линии магнитного поля обнаруживаются с помощью магнитного порошка, частицы которого намагничиваются в магнитном поле и выстраиваются в цепочки. Сила, действующая в магнитном поле на движущиеся электрические заряды (сила Лоренца), пропорциональна скоростям движения зарядов и направлена перпендикулярно этим скоростям:

$$F_{л} = qvB\sin\alpha,$$

где q – заряд частицы; v – ее скорость; α – угол между направлением скорости и вектором магнитной индукции \vec{B} .

Следует отметить, что электрическое и магнитное поля в других инерциальных системах отсчета (в которых источники этих полей неподвижны) уже не будут ни чисто магнитными, ни чисто электрическими. Поэтому деление электромагнитного поля на электрическое и магнитное условно.

Назовите основные характеристики магнитного поля.

Основными характеристиками магнитного поля являются *индукция* и *напряженность*.

Магнитная индукция \vec{B} характеризует магнитное поле в веществе. Индукция – векторная величина, за ее направление принимают направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки. Если некоторое тело поместить в магнитное поле, например, созданное находящимся рядом проводником с током (макроток), то под действием этого поля микроскопические токи атомов тела повернутся и создадут в теле дополнительное магнитное поле. Магнитная индукция будет определяться суперпозицией этих полей. Следовательно, вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое макро- и микротоками. Другими словами, при намагничивании индукция результирующего поля равна сумме индукции внешнего поля и индукции молекулярных токов. Если тело будет изготовлено из другого материала, то величина индукции, как правило, будет

другой. *Магнитная индукция* B определяется отношением максимального вращающего момента M_{\max} , действующего на контур с током в магнитном поле, к магнитному моменту этого контура p_m :

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}.$$

Поток Φ вектора магнитной индукции через площадку S (или просто *магнитный поток*) определяется из выражения

$$\Phi = BS \cos\alpha,$$

где α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к площадке.

В неоднородном магнитном поле поток через площадку S конечных размеров

$$\Phi = \int_S B_n dS,$$

где B_n – нормальная составляющая магнитной индукции.

Интенсивность *внешнего магнитного поля* характеризуют *вектором напряженности \vec{H}* . Напряженность поля *не зависит от свойств среды*, и в *однородной среде* она совпадает по направлению с вектором магнитной индукции. Вектор напряженности магнитного поля связан с вектором магнитной индукции соотношением

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; \vec{M} – вектор намагниченности среды.

Для изотропного материала

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r},$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость (показывает, во сколько раз магнитная индукция в данной среде больше, чем в вакууме).

Как графически изображают магнитное поле?

Графически магнитное поле изображают с помощью силовых линий. Силовые линии магнитного поля (или линии магнитной индукции) – это линии, проведенные так, что касательные к ним в каждой точке указывают направление поля в этой точке, т. е. направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки. Другими словами, магнитная стрелка ориентируется вдоль силовых линий магнитного поля, а острие ее северного полюса указывает направление поля. Силовые линии магнитного поля являются непрерывными. В отличие от силовых линий электрического поля они замкнуты. Их плотность (густота) равна индукции магнитного поля, а магнитный поток равен всему числу силовых линий, пронизывающих данный контур. Магнитные силовые линии не пересекают друг друга. Они проходят по пути наименьшего магнитного сопротивления. Вдоль силовых линий магнитного поля располагаются оси маленьких магнитных стрелок. Цепочки, которые образуют в магнитном поле железные опилки, показывают форму силовых линий.

Если магнитное поле однородное, то магнитные силовые линии имеют вид параллельных прямых, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 1.1, *а*). Протекающий по проводнику ток создает неоднородное магнитное поле, убывающее по мере удаления от проводника. Силовые линии такого поля представляют собой концентрические окружности (рис. 1.1, *б*). Расстояние между ними тем больше, чем больше расстояние от источника поля, т. е. чем меньше напряженность поля. Если проводник с током поместить в однородное магнитное поле, то это приведет к искажению поля. Силовые линии поля при этом искривляются. Их плотность становится больше с той стороны проводника, где направление силовых линий проводника совпадает с направлением внешнего поля, и убывает там, где оно противоположно (рис. 1.1, *в*). Минимальная напряженность поля будет в точке *С*.

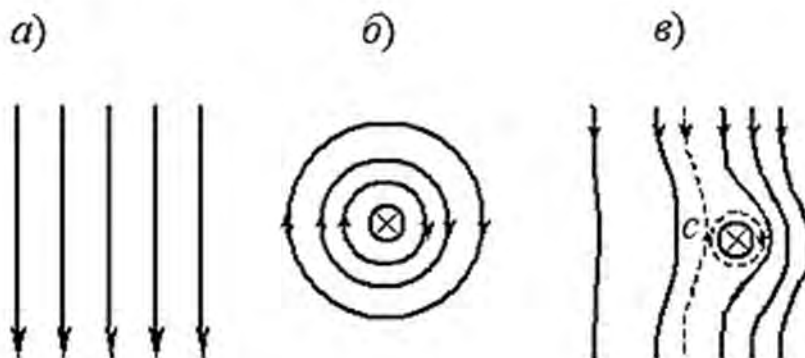


Рис. 1.1. Вид силовых линий магнитного поля: *а* – однородного; *б* – неоднородного (проводника с током); *в* – их суперпозиции

1.2. Краткие сведения о ферромагнетизме. Свойства ферромагнетиков. Парамагнетики и диамагнетики

Назовите известные Вам ферромагнетики.

К ферромагнетикам относят железо, кобальт, никель, гадолиний, их соединения и сплавы, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия, меди и др. При низких температурах ферромагнитны материалы из редкоземельных элементов эрбия и диспрозия. Ферромагнитны некоторые виды ферритовой керамики.

Можно изготовить сплавы, обладающие высокими ферромагнитными свойствами, из парамагнитных и диамагнитных материалов. Например, сплав Гейслера состоит из таких слабомагнитных металлов, как медь (60 %), марганец (25 %) и алюминий (15 %). С другой стороны, некоторые сплавы из ферромагнитных материалов почти немагнитны, например, сплав из 75 % железа и 25 % никеля.

Назовите основные свойства ферромагнетиков.

Все ферромагнетики характеризуются:

- большими положительными значениями магнитной проницаемости, ее нелинейной зависимостью от напряженности магнитного поля и температуры;
- способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах в слабых полях;
- гистерезисом, т. е. зависимостью магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния;
- точкой Кюри – температурой, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства (для железа – 768 °С, никеля – 360 °С, кобальта – 1130 °С); при температурах выше точки Кюри все ферромагнетики становятся парамагнитными.

Все ферромагнетики, кроме аморфных, имеют кристаллическое строение. Магнитное поле внутри ферромагнетиков значительно усиливается.

Чем обусловлены ферромагнитные свойства материалов?

В отличие от диамагнетизма и парамагнетизма, являющихся свойствами отдельных атомов или молекул вещества, ферромагнетизм объясняется свойствами кристаллической структуры вещества. Атомы ферромагнетика, если взять их, например, в парообразном состоянии, диамагнитны или слабо парамагнитны. Ферромагнетизм – это свойство вещества в твердом состоянии, т. е. свойство кристаллов вещества. Его физическую природу объясняет квантовая механика.

Ферромагнетизм возникает благодаря особому взаимодействию электронов незаполненных электронных слоев между соседними атомами. Такое

взаимодействие называется обменным. Силы обменного взаимодействия заставляют магнитные моменты электронов устанавливаться параллельно друг другу. В результате в ферромагнетике появляются области самопроизвольного, или спонтанного, намагничивания. Их называют *доменами*. В пределах домена при обычных температурах ферромагнетик намагничен почти до насыщения. При отсутствии внешнего поля направления магнитных моментов отдельных доменов различны. Суммарный магнитный момент образца равен нулю, поэтому образец в целом не намагничен.

Итак, ферромагнетизм присущ только элементам, у атомов которых есть внутренние незаполненные электронные слои, а отношение диаметра атома $d_{ат}$ в кристаллической решетке к диаметру незаполненного электронного слоя $d_{нэс}$ больше 3 (энергия обменного взаимодействия W положительна) (рис. 1.2).

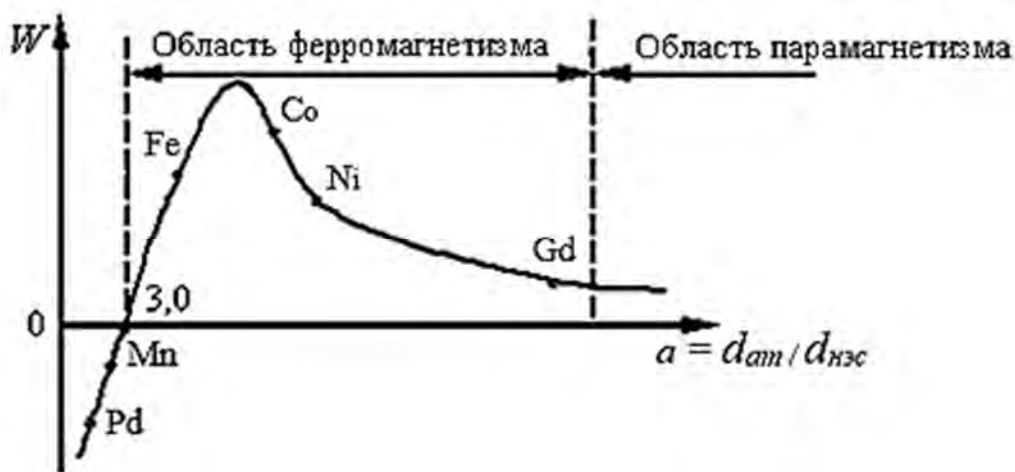


Рис. 1.2. Зависимость энергии обменного взаимодействия от отношения диаметра атома к диаметру незаполненного электронного слоя

$$W = -2A \mu_{s1} \mu_{s2} \cos\varphi,$$

где A – константа обменного взаимодействия, равная разности энергий двух электронов при одинаковом и противоположном направлениях спиновых моментов; μ_{s1} и μ_{s2} – результирующие спиновые магнитные моменты атомов; φ – угол между векторами этих моментов.

В чем отличие диамагнитных и парамагнитных веществ от ферромагнитных?

Магнитные свойства атомов вещества обусловлены движением электронов по орбите вокруг ядра атома (орбитальный магнитный момент), вращением

электронов вокруг собственной оси (спиновой магнитный момент электронов) и вращением атомного ядра вокруг своей оси (спиновой магнитный момент ядра атома).

Диамagnetики – вещества, магнитные моменты атомов (молекул) которых в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю, т. к. магнитные моменты всех электронов атома (молекулы) взаимно скомпенсированы. Такими свойствами обладают, например, вещества, в атомах, молекулах или ионах которых имеются только целиком заполненные электронные слои – инертные газы, водород, азот, хлористый натрий и др. При внесении во внешнее поле атомы (молекулы) диамagnetиков приобретают наведенные магнитные моменты. В *диамagnetике*, помещенном в магнитное поле, возникает дополнительный магнитный момент, направленный *противоположно полю*. Внешнее магнитное поле создает в веществе индукционные токи, которые собственным полем стремятся противодействовать полю в соответствии с правилом Ленца. Возникновение этих токов обусловлено вращением электрона вокруг ядра. В результате этого каждый атом обладает магнитным моментом. В магнитном поле появляются силы, стремящиеся направить магнитный момент электрона по полю (ориентировать плоскость электронной орбиты перпендикулярно полю). Вследствие этого электронная орбита начинает прецессировать вокруг направления поля. Такая прецессия эквивалентна появлению дополнительного вращения электрона, что приводит к дополнительному магнитному моменту, *всегда ориентированному против поля*. Явление диамagnetизма проявляется только тогда, когда все орбитальные и спиновые моменты в атоме скомпенсированы. У диамagnetиков μ_r незначительно меньше единицы. Такие вещества незначительно ослабляют магнитное поле. Диамagnetики – цинк, свинец, золото, серебро и др. Явление диамagnetизма присуще почти всем веществам, однако не всегда оно наблюдается, т. к. перекрывается более сильным парамагнитным или ферромагнитным.

Парамагнетиками называются вещества, атомы (молекулы) которых в отсутствие внешнего магнитного поля имеют отличный от нуля магнитный момент. Это может быть связано как с орбитальным движением электронов в атомах (молекулах) парамагнетика, так и со спиновыми магнитными моментами этих электронов. В отсутствие внешнего магнитного поля векторы магнитных моментов различных атомов (молекул) парамагнетика ориентированы беспорядочно. Намагниченность парамагнетика равна нулю. В магнитном поле магнитные моменты атомов (молекул) прецессируют вокруг направления поля. Совместное действие межатомных столкновений под действием теплового движения и магнитного поля приводит к преимущественной ориентации собственных магнитных моментов атомов по направлению внешнего поля, т. е. парамагнетик намагничивается вдоль поля.

Итак, к *парамагнетикам* относятся вещества с нескомпенсированными магнитными моментами молекул и атомов. Во внешнем магнитном поле парамагнетики приобретают дополнительный магнитный момент, направленный вдоль поля. К парамагнетикам относятся хром, марганец, алюминий, кислород и др. У таких веществ μ_r незначительно больше единицы. Во внешнем магнитном поле напряженность поля в них лишь очень незначительно возрастает.

1.3. Физические величины, характеризующие магнитные свойства вещества. Кривая намагничивания. Напряженность магнитного поля, намагниченность, магнитная индукция, индукция технического насыщения, магнитная проницаемость

Приведите основные физические величины, которые характеризуют ферромагнитные свойства вещества.

Ферромагнитные свойства вещества характеризуются:

– вектором намагниченности, равным плотности магнитного момента в данном объеме, $\vec{M} = \frac{d\vec{P}_m}{dV}$;

– вектором магнитной индукции $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$, где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; H – напряженность магнитного поля;

– абсолютной магнитной проницаемостью $\mu_a = \mu_r \mu_0 \frac{B}{H}$, где μ_r – относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина), для ферромагнетиков $\mu_r = f(H) \gg 1$;

– магнитной восприимчивостью $\chi_a = \frac{M}{H}$.

Из второго и последнего выражений следует $\mu_r = 1 + \chi_a$.

Замечание. При использовании формул $B = \mu_0(H + M)$ и $B = \mu_0 \mu_r H$ следует помнить, что намагниченность M и относительная магнитная проницаемость μ_r являются функцией напряженности поля. Строго говоря, при малых и средних значениях напряженности магнитного поля M является функцией H , а при больших значениях H намагниченность M стремится к постоянному значению. При больших значениях намагничивающего поля μ_r стремится к единице, а $\chi_a = \mu_r - 1$ – к нулю.

Что понимают под кривой первоначального намагничивания?

Под кривой первоначального намагничивания понимают график зависимости намагниченности (магнитной индукции) образца от напряженности

поля, полученный при условии монотонного и медленного возрастания намагничивающего поля, в которое помещен полностью размагниченный образец (рис. 1.3). На кривой первоначального намагничивания можно выделить следующие характерные области: начального (обратимого) намагничивания, Релея, наибольших магнитных проницаемостей, приближения к насыщению и парапроцесса (см. рис. 1.3).

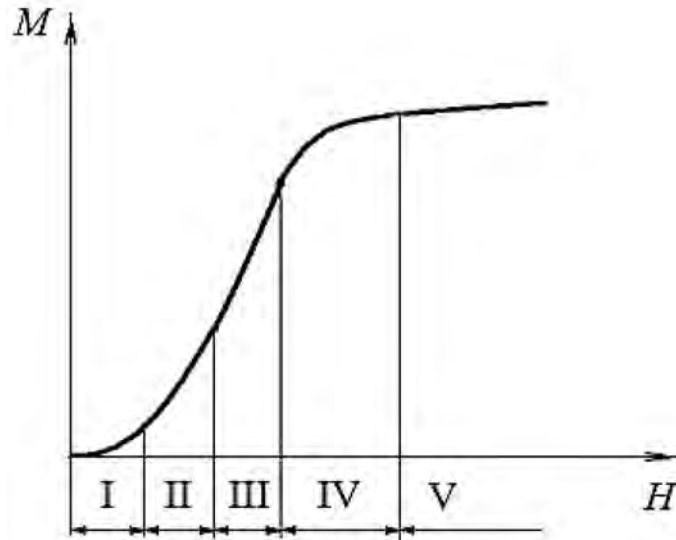


Рис. 1.3. Кривая первоначального намагничивания ферромагнетика: I – область начального (обратимого) намагничивания; II – область Релея; III – область наибольших магнитных проницаемостей; IV – область приближения к насыщению; V – область парапроцесса

Почему кривая первоначального намагничивания не является технической характеристикой материала?

Зависимость намагниченности (или магнитной индукции) полностью размагниченного образца от напряженности поля, монотонно и медленно изменяющегося от 0 до некоторой величины, называется *кривой первоначального намагничивания* (нулевая кривая).

В общем случае кривую первоначального намагничивания можно разделить на пять частей.

Для построения кривой первоначального намагничивания используется полностью размагниченный образец. Однако часто невозможно размагнитить образец так, чтобы в нем было действительно хаотическое расположение векторов магнитных моментов доменов (кроме случая нагревания выше температуры Кюри, когда это допустимо). Нагревание выше точки Кюри может привести к потере механических свойств изделия. То есть получить нужную кривую по этой причине сложно. Поэтому кривая первоначального намагничивания не является технической характеристикой материала, т. е. она непригодна для определения магнитных характеристик материала.

Дайте определение основной кривой намагничивания (индукции).

Основная кривая намагничивания вещества – это кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля (рис. 1.4). Каждая точка основной кривой намагничивания фиксируется после многократного коммутирования намагничивающего тока для получения установившегося цикла. Основная (коммутационная) кривая намагничивания является исходной для получения таких характеристик ферромагнитных материалов, как $\mu_{\text{диф}}$, μ_{max} , $\mu_{\text{обратим}}$ и др.

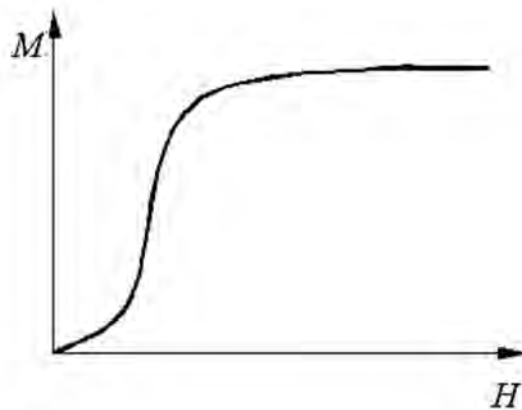


Рис. 1.4. Основная кривая намагничивания вещества

Почему для получения основной кривой намагничивания требуется многократное коммутирование намагничивающего тока?

Если несколько раз изменить напряженность магнитного поля, в которое помещен образец, от $+H_{\text{max}}$ до $(-H_{\text{max}})$ и обратно, то положение вершин петли гистерезиса будет каждый раз несколько изменяться. Только после 10...12 циклов (а для некоторых материалов после 50...100) получается установившийся цикл. То есть положение вершин A и A' петли стабилизируется после многократного коммутирования намагничивающего тока (рис. 1.5).

Какая кривая намагничивания называется безгистерезисной?

Намагничиванию ферромагнитных тел препятствует гистерезис, который можно сравнить с внутренним трением. Экспериментально можно получить кривую намагничивания, на которую гистерезис почти не оказывает влияния, – так называемую безгистерезисную кривую намагничивания (рис. 1.6). Она получается в результате наложения на образец небольшого постоянного намагничивающего поля и переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой.

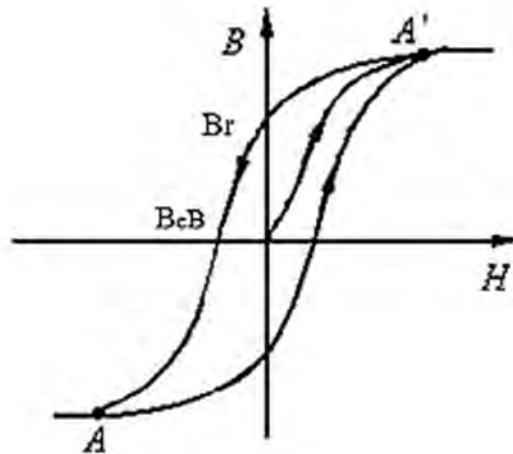


Рис. 1.5. Петля магнитного гистерезиса для симметричного цикла намагничивания

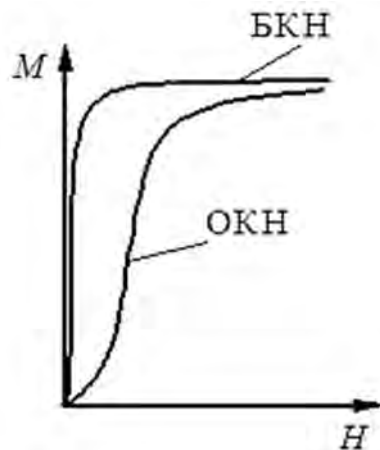


Рис. 1.6. Вид основной (ОКН) и безгистерезисной (БКН) кривой намагничивания

Намагничивание по безгистерезисной кривой может происходить и в результате приложения ударной нагрузки к ферромагнитному образцу, находящемуся в слабом магнитном поле. На практике это часто приводит к тому, что отдельные объекты, находящиеся в слабом магнитном поле, приобретают значительную остаточную намагниченность. Это ведет к трудностям при их эксплуатации. Известно, например, что в поле Земли ферромагнитные объекты намагничиваются слабо, однако если при этом на них воздействуют ударные нагрузки, то остаточная намагниченность может достигать большой величины, т. к. намагничивание происходит по безгистерезисной кривой.

Высокую остаточную намагниченность в слабом поле Земли приобретают, например, длинные стальные трубы для строительства магистральных нефте- и газопроводов, которые в процессе транспортировки подвергаются ударным нагрузкам и тряске. Вследствие этого при их сварке возникают трудности, связанные с так называемым «магнитным дутьем». «Магнитное дутье»

обусловлено взаимодействием сварочной дуги с магнитным полем. Оно вызывает неустойчивость горения, блуждание и даже гашение сварочной дуги. Существуют специальные приемы, повышающие стабильность горения дуги. Однако кардинальный путь – это размагничивание концов труб перед сваркой.

Второй пример – сильное намагничивание корпусов кораблей в поле Земли. Под действием ударов морских волн в слабом магнитном поле Земли стальной корпус судна намагничивается по безгистерезисной кривой. Остаточная намагниченность может достигать значительной величины, несмотря на то, что напряженность поля Земли возле магнитных полюсов достигает 0,54 А/см, на экваторе – 0,27 А/см, а в средних широтах – 0,27 А/см.

Что такое абсолютная и относительная магнитная проницаемость?

Отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля

$\mu_a = \frac{B}{H}$ называется абсолютной магнитной проницаемостью.

Относительная магнитная проницаемость определяется по формуле

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля. Вследствие гистерезиса эта зависимость неоднозначная. На практике чаще всего рассматривают участок кривой $\mu_r = f(H)$ для случая возрастания напряженности магнитного поля от 0 до H (рис. 1.7).

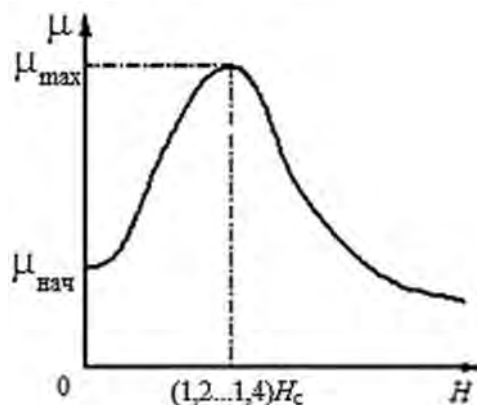


Рис. 1.7. Зависимость магнитной проницаемости материала от напряженности магнитного поля

Как построить график зависимости $\mu_r = f(H)$?

С этой целью для точек основной кривой намагничивания нужно найти отношения $\mu_r = \frac{B_i}{\mu_0 H_i}$ и поставить им в соответствие значения напряженности магнитного поля H_i . Магнитная проницаемость материала достигает наибольшей величины при $H = (1,2...1,4)H_c$, где H_c – коэрцитивная сила (см. рис. 1.7).

Докажите, что если провести касательную из начала координат к основной кривой намагничивания, то точке касания соответствует $\mu_{r\max}$.

Абсолютная магнитная проницаемость определяется по формуле $\mu_a = \frac{B}{H}$, где B и H – координаты точек кривой намагничивания. Отношение $\frac{B}{H}$ можно рассматривать и как тангенс угла наклона к оси абсцисс прямой, проходящей через начало координат и точку с координатами (B_1, H_1) . Так как тангенс – функция возрастающая, то большему углу соответствует большее отношение $\frac{B_1}{H_1}$. Угол наклона максимальный, если рассматриваемая прямая является касательной к кривой намагничивания (рис. 1.8).

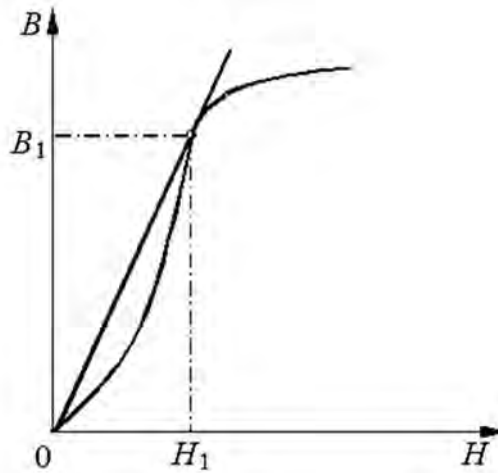


Рис. 1.8. К определению максимальной магнитной проницаемости вещества

Что такое дифференциальная магнитная проницаемость возрастания (убывания)?

Дифференциальной магнитной проницаемостью возрастания называют предел отношения положительного приращения магнитной индукции ΔB

к вызвавшему его малому приращению напряженности магнитного поля ΔH при $\Delta H \rightarrow 0$ (рис. 1.9). Обозначается $\mu_d = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$.

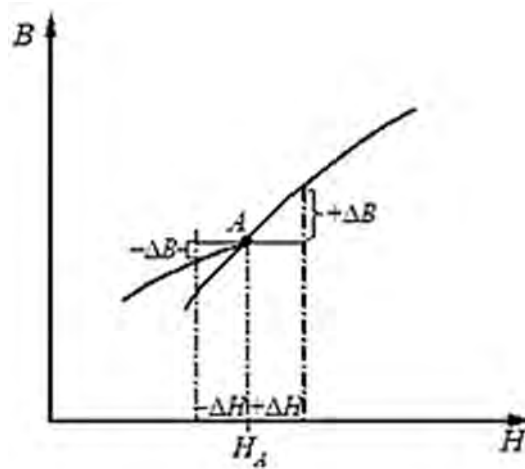


Рис. 1.9. Определение дифференциальной магнитной проницаемости вещества

Предел отношения отрицательного приращения магнитной индукции к вызвавшему его малому приращению напряженности магнитного поля при $\Delta H \rightarrow 0$ называется дифференциальной магнитной проницаемостью убывания μ_{d-} . При возрастании напряженности поля индукция изменяется по кривой намагничивания, при убывании – по ветви петли гистерезиса.

Чем качественно отличаются графики зависимости $B(H)$ от $M(H)$?

После достижения намагниченности насыщения M_s кривая $M(H)$ трансформируется в прямую, параллельную оси абсцисс H (рис. 1.10). Кривая $B(H)$ после достижения намагниченности M_s преобразуется в прямую, направленную под углом к оси H (рис. 1.11). Последнее легко понять из выражения $B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + \mu_0 M$. После того как намагниченность M достигла насыщения M_s , второе слагаемое остается неизменным, а индукция при возрастании H увеличивается за счет первого слагаемого.

Что такое индукция технического насыщения?

Индукция технического насыщения B_m – это значение индукции магнитного материала, определяемое экстраполяцией из области напряженности магнитных полей, соответствующих намагниченности технического насыщения, к нулевому значению напряженности поля.

Изложенному дадим графическую интерпретацию. На рис. 1.12 показан график зависимости магнитной индукции некоторого вещества от напряженности магнитного поля (верхняя кривая).

В соответствии с формулой $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ эту кривую можно рассматривать как полученную графическим сложением прямой $B = \mu_0 H$ и кривой $B = \mu_0 M$ (см. рис. 1.12). Если продлить прямолинейный участок графика зависимости $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ до пересечения с осью ординат, то точка пересечения определит индукцию B_m технического насыщения, которая для большинства контролируемых материалов составит около $0,95 B_{\max}$, где B_{\max} – максимальная индукция, создаваемая молекулярными токами материала, т. е. теоретически возможная индукция насыщения (B_{\max} соответствует намагниченности насыщения материала контролируемого изделия).

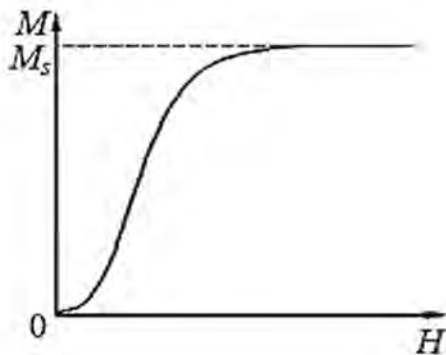


Рис. 1.10. Зависимость намагниченности ферромагнетика от напряженности магнитного поля

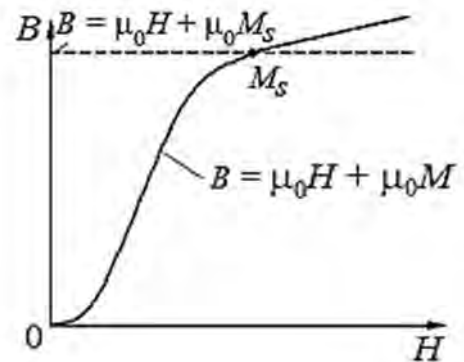


Рис. 1.11. Зависимость магнитной индукции ферромагнетика от напряженности магнитного поля

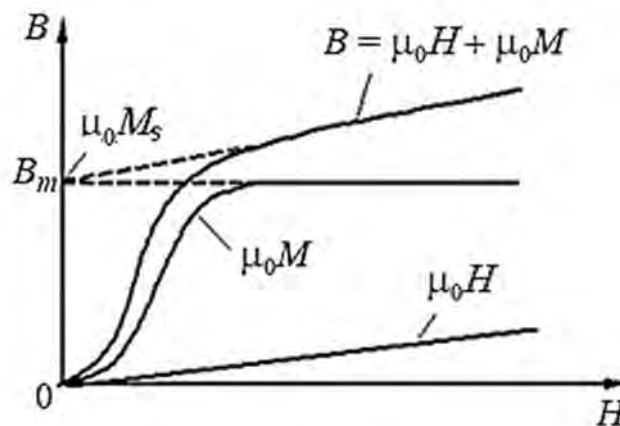


Рис. 1.12. Зависимость магнитной индукции B и ее составляющих от напряженности поля

Как влияет температура ферромагнетика на его магнитные свойства?

На рис. 1.13 показана зависимость остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы H_c , потерь на гистерезис P , начальной $\mu_{rнач}$ и максимальной μ_{rmax} магнитной проницаемости технически чистого железа от температуры.

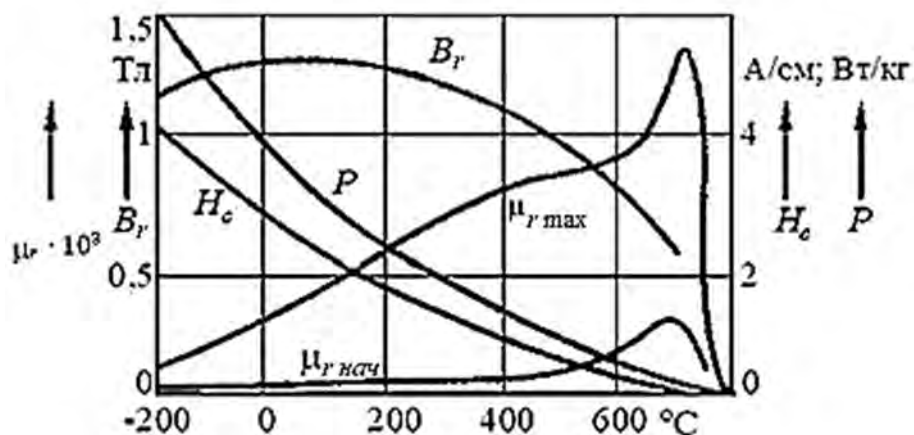


Рис. 1.13. Влияние температуры ферромагнетика на его магнитные свойства: B_r — остаточная индукция; H_c — коэрцитивная сила; $\mu_{rнач}$ — начальная относительная магнитная проницаемость; μ_{rmax} — максимальная магнитная проницаемость; P — потери на гистерезис

Как видно из рисунка, все зависимости нелинейные, причем наиболее резкое падение при приближении к точке Кюри наблюдается у магнитной проницаемости. Монотонно убывают с ростом температуры только коэрцитивная сила и потери на гистерезис. $\mu_{rнач}$ и μ_{rmax} монотонно возрастают до температуры около 700°C , а затем резко убывают, приближаясь к точке Кюри.

1.4. Домены. Особенности намагничивания ферромагнетиков

Что такое домен?

Ферромагнитные свойства вещества определяются не магнитными свойствами отдельных атомов или молекул, а свойствами целых областей, называемых доменами (небольшие объемы вещества, содержащие значительное количество атомов). Взаимодействие магнитных моментов отдельных атомов ферромагнетика приводит к созданию очень сильных внутренних магнитных полей, действующих в пределах каждой такой области и выстраивающих в пределах домена все атомные магнитики параллельно друг другу. Таким образом, даже при отсутствии внешнего магнитного поля ферромагнитное вещество состоит из ряда отдельных областей, каждая из которых при обычных температурах *самопроизвольно намагничена почти до насыщения*. Однако

направление намагниченности разных областей различно, поэтому вследствие хаотичности распределения этих областей тело в целом при отсутствии внешнего поля оказывается ненамагниченным.

Под действием внешнего поля происходит перестройка таких областей, в результате которой преимущество получают те области, которые намагничены вдоль поля и вещество в целом оказывается намагниченным.

Таким образом, *домены* – это макроскопические области ферромагнетика с самопроизвольной намагниченностью, на которые он разделяется при температурах ниже точки Кюри в отсутствие внешнего магнитного поля. Средний размер этих областей составляет от 0,001 до 0,0025 мм, хотя по разным источникам эти данные сильно отличаются. При обычных температурах даже в отсутствие внешнего поля домены намагничены до насыщения. Магнитные моменты в отдельных доменах ориентированы различно, а потому магнитный момент большого объема ферромагнетика равен нулю. При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле сразу целые области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, а не магнитные моменты отдельных атомов, как в парамагнитных телах, начинают поворачиваться и ориентироваться по полю. Поэтому с ростом H магнитная индукция возрастает очень быстро, а магнитная проницаемость имеет большое значение в слабых полях. Так как домены в направлении поля поворачиваются скачком, то кривая намагничивания (в области наибольших магнитных проницаемостей) имеет ступенчатый вид, что можно обнаружить высокочувствительными методами исследования. В достаточно сильных магнитных полях все домены поворачиваются вдоль поля, и наступает магнитное насыщение. При выключении внешнего магнитного поля единственным фактором, влияющим на ориентацию доменов, остается тепловое движение, которое будет дезориентировать домены. Однако вследствие значительной энергии, необходимой для поворота доменов, процесс размагничивания будет затруднен. Этим и вызывается гистерезис.

Что называют монокристаллом?

Монокристалл – это одиночный кристалл, частицы которого расположены единообразно по всему объему. Как и всякий кристалл, монокристалл имеет периодически повторяющееся расположение составляющих его частиц – кристаллическую решетку.

В отличие от аморфных тел, имеющих хаотическое расположение атомов (ионов), в кристаллических телах атомы располагаются в пространстве закономерно и периодически. В поликристаллическом металле отдельные кристаллы не имеют возможности принять правильную форму, такие кристаллы неправильной формы называются зернами или кристаллитами.

Если большинство кристаллов ориентированы в пространстве одинаково, то такая преимущественная ориентировка кристаллов называется текстурой. Текстура может быть получена при затвердевании металла, при его пластической деформации, электролизе и т. д.

Одинаково ли намагничивается монокристалл железа вдоль различных кристаллографических направлений?

Нет, в ферромагнитных кристаллах существует магнитная анизотропия. Железо кристаллизуется в виде кубической объемноцентрированной решетки при температурах до 910 °С (рис. 1.14). На рис. 1.15 представлены кривые намагничивания монокристалла железа вдоль различных кристаллографических направлений: 1 – вдоль ребра куба; 2 – вдоль диагонали грани; 3 – вдоль пространственной диагонали куба.

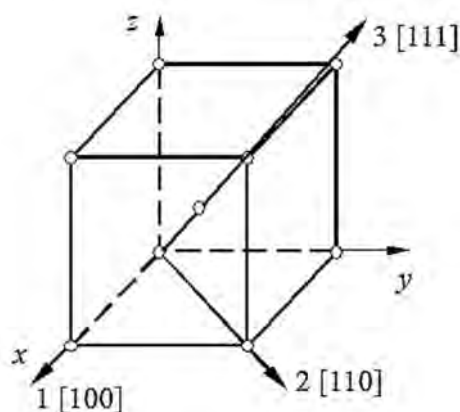


Рис. 1.14. Обозначение осей в кубической объемноцентрированной кристаллической решетке

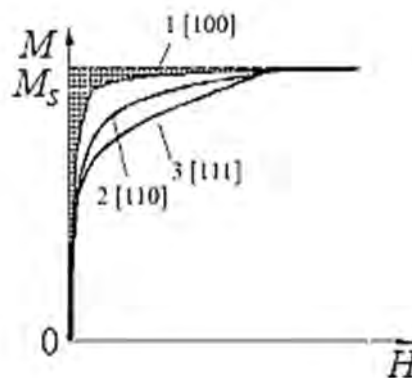


Рис. 1.15. Кривые намагничивания монокристалла железа вдоль различных кристаллографических направлений

Как видно из рис. 1.15, для железа работа намагничивания вдоль ребра куба наименьшая (заштрихованная область), а вдоль пространственной диагонали – наибольшая. Поэтому направление, совпадающее с ребром куба, называют направлением легкого, а с пространственной диагональю – трудного намагничивания.

Изложенное относится к железу с объемноцентрированной решеткой. Следует отметить, что кубическую объемноцентрированную решетку, кроме железа, имеют ванадий, хром, молибден и другие металлы.

Железо при температурах 910...1400 °С имеет гранецентрированную решетку. Гранецентрированную решетку имеют также медь, алюминий, никель, свинец, серебро и другие металлы.

Что происходит в монокристалле железа при намагничивании его сильным полем вдоль направления легкого намагничивания?

Некоторые области самопроизвольной намагниченности (домены) окажутся в более выгодном положении относительно поля, чем другие, т. к. направление намагниченности в них будет совпадать с направлением поля, что соответствует минимуму энергии (рис. 1.16). Эти области начнут расти за счет областей, ориентированных менее выгодно. Рост доменов будет происходить путем смещения границ между ними по направлению к середине областей, намагниченных антипараллельно полю. Смещение границ будет происходить до тех пор, пока не исчезнут домены, намагниченные антипараллельно полю. Останется один домен величиной с монокристалл.

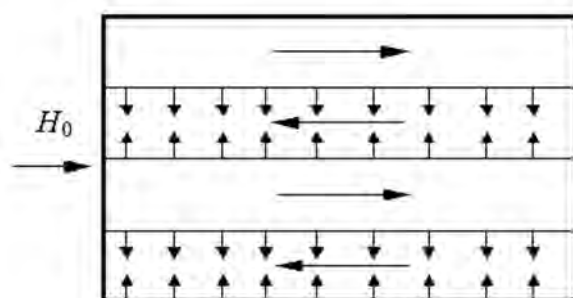


Рис. 1.16. К пояснению роста доменов в монокристалле ферромагнетика, намагниченного вдоль оси легкого намагничивания

Из изложенного следует, что некорректно говорить об объеме, занимаемом доменом, в монокристалле железа.

Что происходит в монокристалле ферромагнетика, если намагничивающее поле направлено под углом к оси легкого намагничивания?

После завершения процесса смещения границ доменов и образования одного домена размером с монокристалл начнется вращение вектора спонтанной намагниченности в кристалле по направлению к вектору намагничивающего поля до совпадения с ним (рис. 1.17).

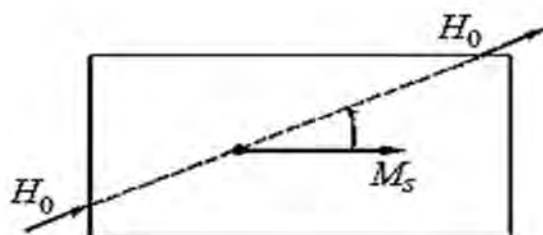


Рис. 1.17. Пояснение процессов, происходящих в монокристалле ферромагнетика, намагниченного вдоль оси легкого намагничивания

Что происходит в монокристалле ферромагнетика при температуре, равной абсолютному нулю?

При температуре, равной абсолютному нулю, все спины в домене будут ориентированы одинаково, параллельно одному из направлений легкого намагничивания (рис. 1.18).

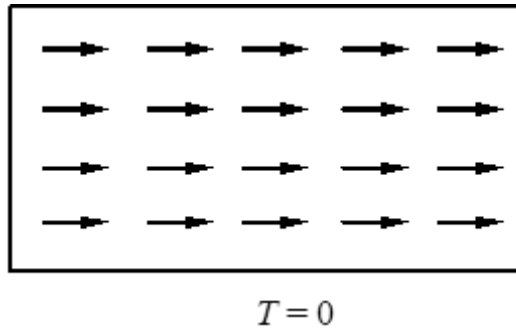


Рис. 1.18. Ориентация спинов в домене ферромагнетика при температуре, равной абсолютному нулю

Что произойдет в монокристалле ферромагнетика, если его температура возрастет от абсолютного нуля до точки Кюри?

С возрастанием температуры величина спонтанной намагниченности будет убывать. Физически это означает, что некоторые спины *внутри домена* будут переходить в положение, антипараллельное спонтанной намагниченности. В точке Кюри число параллельно и антипараллельно намагниченных спинов становится одинаковым (рис. 1.19).

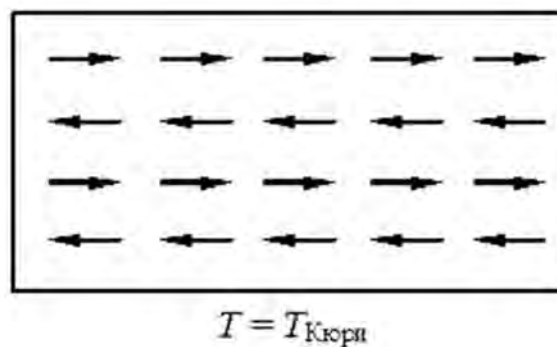


Рис. 1.19. Ориентация спинов в монокристалле ферромагнетика при температуре, равной точке Кюри

Спонтанная намагниченность становится равной нулю. При этом магнитная проницаемость материала резко падает до значения, близкого к единице.

Такая переориентация спинов при повышении температуры обусловлена дезориентирующим действием теплового движения. Ее можно гасить

ориентирующим действием приложенного сильного магнитного поля. Это явление называется *парапроцессом*.

Что происходит в ферромагнетике при намагничивании слабым магнитным полем?

В слабых магнитных полях (область начального, или обратимого, намагничивания) намагниченность и индукция пропорциональны напряженности поля. Особенностью этой области является обратимость процессов намагничивания при убывании или возрастании намагничивающего поля. То есть если под действием намагничивающего поля H магнитная индукция в образце достигнет величины B , а намагниченность – величины M , то после уменьшения напряженности поля до нуля и индукция, и намагниченность станут равными нулю. Обратимость процессов намагничивания при убывании или возрастании намагничивающего поля обусловлена упругим смещением границ доменов.

Какие особенности намагничивания ферромагнетика в области Рэлея?

В области Рэлея наблюдается нелинейная зависимость магнитной индукции B и намагниченности M от напряженности поля. При намагничивании в этой области частично происходит упругое смещение границ доменов. Однако основную роль играют процессы изменения направления вектора M в пределах доменов. Протекающие в этой области процессы не являются полностью обратимыми.

Что происходит в ферромагнетике при намагничивании в области наибольших магнитных проницаемостей?

В этой области наблюдается резкое возрастание намагниченности ферромагнетика. Причем намагниченность изменяется скачками (*скачки Баркгаузена*). Скачки Баркгаузена связаны с необратимым смещением границ между доменами. В конце этой области, наряду с процессами смещения, заметную роль играют процессы вращения вектора намагниченности в домене.

Что происходит в ферромагнетике в области приближения к насыщению?

Увеличение намагниченности в этой области происходит в основном из-за уменьшения угла между вектором намагниченности доменов и вектором внешнего поля. Происходящие в этой области процессы не являются обратимыми.

Что происходит в ферромагнетике при его намагничивании в области парапроцесса?

Незначительное увеличение намагниченности в этой области происходит вследствие уменьшения дезориентирующего действия теплового движения на магнитные домены за счет сильного приложенного магнитного поля.

1.5. Петля гистерезиса. Коэрцитивная сила. Частные циклы гистерезиса

Что такое петля гистерезиса?

Если после достижения в процессе намагничивания образца некоторой величины намагниченности M (или индукции B) уменьшить величину напряженности магнитного поля, то намагниченность (индукция) будет изменяться по кривой, отличной от кривой первоначального намагничивания. Это объясняется тем, что из-за больших по сравнению с атомами размеров доменов процесс их переориентации в магнитном поле происходит с большими затруднениями, чем процесс ориентации (дезориентации) отдельных молекул или атомов, что имеет место в парамагнитных и диамагнитных объектах. Поэтому намагничивание и размагничивание ферромагнетика происходит с отставанием от изменения внешнего поля. То есть происходит гистерезис при намагничивании и размагничивании ферромагнитных материалов. Процесс перемагничивания ферромагнетика является обратимым только в областях начального намагничивания и парапроцесса.

Если напряженность поля изменилась от нуля до некоторого значения H_{\max} , затем до $-H_{\max}$ и снова до H_{\max} , то кривая $B = f(H)$ называется симметричной петлей гистерезиса (рис. 1.20, а). Точки пересечения петли гистерезиса с осью ординат и осью абсцисс определяют значения остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c соответственно. На рис. 1.20, а показана петля для симметричного цикла магнитного гистерезиса, т. е. когда $|H_1| = |-H_2|$.

Если $|+H_{\max}| \neq |-H_{\max}|$, то петля гистерезиса будет построена для несимметричного цикла (рис. 1.20, б). Заштрихован установившийся частный цикл гистерезиса.

За один полный цикл изменения напряженности поля расходуется энергия, пропорциональная площади петли гистерезиса.

Какая петля гистерезиса называется предельной?

Петля гистерезиса, имеющая максимальную площадь, называется предельной. В вершинах A и A' предельной петли гистерезиса все домены ориентированы вдоль вектора напряженности магнитного поля (см. рис. 1.5).

Дальнейшее увеличение напряженности поля приводит лишь к увеличению ее безгистерезисных участков.

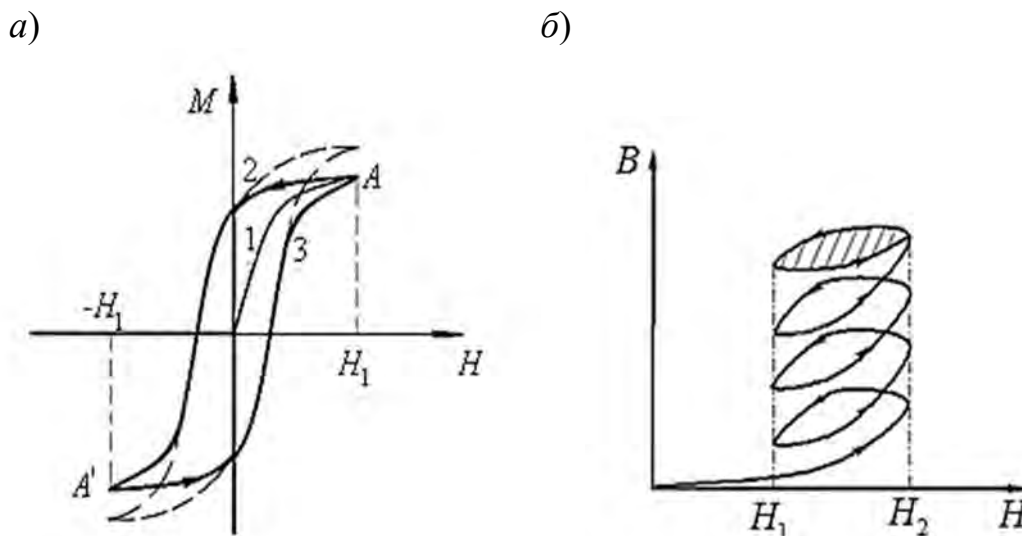


Рис. 1.20. Петля магнитного гистерезиса ферромагнетика для симметричного (а) и несимметричного (б) цикла

Что такое коэрцитивная сила по намагниченности?

Это величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения намагниченности от остаточной намагниченности до нуля. Обозначается $H_{сМ}$.

Коэрцитивная сила ферромагнитного объекта сильно зависит от его структуры. Так, если монокристалл чистого железа имеет $H_c \approx 1$ А/м, то частицы магнитного порошка из того же материала с размером частиц $20 \cdot 10^{-9}$ м имеют $H_c \approx 8 \cdot 10^4$ А/м.

Коэрцитивная сила является одной из наиболее структурно-чувствительных характеристик магнитных свойств ферромагнитных материалов. Поэтому ее используют для контроля качества термической и химико-термической обработки, по ней может быть определено соответствие твердости, глубины цементированного и поверхностно-закаленного слоя токами высокой частоты. По коэрцитивной силе может также проводиться сортировка углеродистых сталей по маркам. В некоторых случаях могут быть определены и отдельные механические характеристики ферромагнитных материалов. Все это возможно только в тех случаях, когда между определяемым параметром и коэрцитивной силой существует однозначная корреляционная зависимость.

Дайте определение коэрцитивной силы по индукции.

Величина, равная напряженности магнитного поля, необходимой для изменения индукции от остаточной индукции до нуля, называется коэрцитивной

силой по индукции. Обозначается H_{cB} . Численно коэрцитивная сила равна напряженности магнитного поля, при которой дифференциальная магнитная проницаемость достигает максимума. Значения коэрцитивной силы по индукции и по намагниченности близки только для магнитно-мягких материалов.

При магнитном контроле в основном используют коэрцитивную силу по индукции.

Какими свойствами обладают магнитно-мягкие и магнитно-жесткие материалы?

Магнитно-мягкие материалы намагничиваются до насыщения в очень слабых полях, имеют высокую магнитную проницаемость, узкую петлю гистерезиса, а значит, малые потери на перемагничивание. Поэтому из магнитно-мягких материалов изготавливают, например, сердечники электрических машин, трансформаторов, дросселей, работающих в переменных магнитных полях.

Магнитно-жесткие (или *магнитотвердые*) материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса. Они имеют большие значения коэрцитивной силы и остаточной намагниченности. Эти материалы применяют для изготовления постоянных магнитов.

Сравнивая характеристики магнитно-мягких и магнитно-жестких материалов, можно прийти к выводу, что индукция насыщения и остаточная индукция для них примерно одинаковы, а отличие коэрцитивной силы достигает очень большой величины. Границы значений коэрцитивной силы, по которым материал можно отнести к магнитно-мягким или магнитно-жестким, являются условными. Можно считать, что если $0,4 \text{ А/м} < H_c < 800 \text{ А/м}$, то материал *магнитно-мягкий*, а если $4 \text{ кА/м} < H_c < 400 \text{ кА/м}$, то *магнитно-жесткий*.

Термины «магнитно-жесткий» и «магнитно-мягкий» не характеризуют механические свойства материала.

Какие циклы гистерезиса называются частными?

Начиная с некоторого значения H_{\max} площадь петли гистерезиса достигает наибольших размеров. Такая петля называется предельной. Дальнейшее увеличение максимальной напряженности поля приводит лишь к удлинению ее безгистерезисных участков.

Все циклы гистерезиса, кроме предельного, называются частными (рис. 1.21).

Они могут быть как симметричными (см. рис. 1.21, а), так и несимметричными (см. рис. 1.21, б). В последнем случае $|H_{\max}| \neq |H_{\min}|$. Частный цикл гистерезиса может находиться в любом квадранте системы

координат MOH или BOH , пересекать оси абсцисс и ординат (см. рис. 1.21, б). На рис 1.21, б заштрихован установившийся частный цикл гистерезиса.

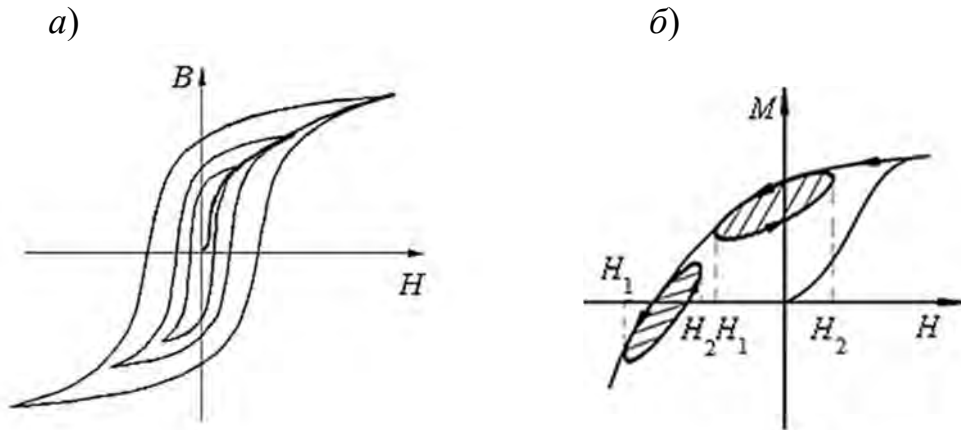


Рис. 1.21. Частные циклы гистерезиса: *a* – для симметричного цикла; *б* – для несимметричного цикла

1.6. Намагничивание ферромагнитного тела и вещества

При каком условии магнитные характеристики можно считать характеристиками вещества?

Магнитные характеристики можно считать характеристиками вещества (материала) при условии, что на ферромагнитный образец воздействует только внешнее магнитное поле. Приблизительно такие условия выполняются в *однородной магнитной цепи замкнутой формы* (без воздушных зазоров), например, в кольцеобразном образце (рис. 1.22).

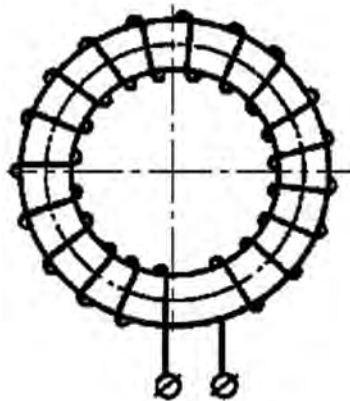


Рис. 1.22. Расположение намагничивающей обмотки на тороидальном образце

Если же во внешнем поле находится образец разомкнутой формы, например, цилиндр, то на его краях образуются магнитные полюсы, создающие

внутри образца магнитное поле $H_{\text{вн}}$ противоположного направления по отношению к внешнему полю H_0 (рис. 1.23).

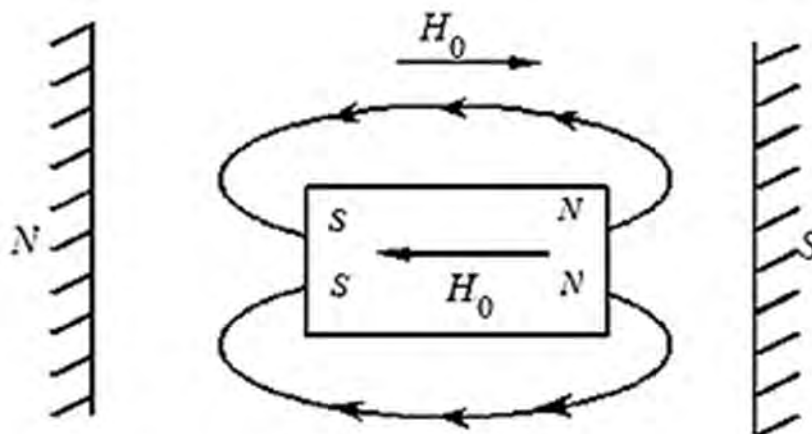


Рис. 1.23. Намагничивание ферромагнитного тела

Размагничивающее поле пропорционально намагниченности образца и определяется из выражения $H_{\text{вн}} = N_p M$, где N_p – коэффициент размагничивания по намагниченности (иногда его называют размагничивающим фактором). Истинное значение напряженности магнитного поля в образце будет меньше внешнего поля $H_i = H_{\text{вн}} - N_p M$. Численное значение коэффициента размагничивания зависит главным образом от геометрической формы и относительных размеров образца. Точное значение N_p имеет только для однородно намагниченных тел, к которым относятся эллипсоиды вращения. Например, для шара $N_p = 1/3$, для бесконечно длинного цилиндра, продольная ось которого перпендикулярна внешнему полю, $N_p = 1/2$, а если параллельна, то $N_p = 0$. Для бесконечно тонкой пластины, плоскость которой перпендикулярна вектору напряженности намагничивающего поля, $N_p = 1$, т. е. тонкую пластину сложно намагнитить в направлении, перпендикулярном ее поверхности.

Как определяют размагничивающий фактор объектов, не имеющих формы эллипсоида вращения?

На практике чаще всего встречаются тела, форма которых отличается от эллипсоида. Такие тела намагничиваются неоднородно. Для них коэффициент размагничивания N_p в разных точках имеет разное значение. В этом случае используют усредненные значения N_p , полученные по приближенным формулам или справочным таблицам.

В чем отличие кривых намагничивания вещества и тела?

Кривая намагничивания *тела* имеет более пологий вид (рис. 1.24, кривая 2). Причем чем короче и толще образец, тем больше N_p и тем более пологий вид имеет кривая намагничивания тела.

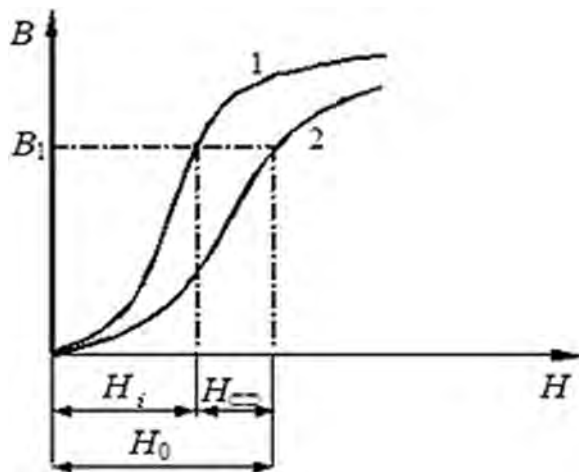


Рис. 1.24. Кривая намагничивания: 1 — для вещества; 2 — для тела

Если магнитная проницаемость вещества определяется по формуле $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H_i}$, где H_i — истинная напряженность магнитного поля, то магнитная проницаемость тела — по формуле $\mu_{\square} = \frac{B}{\mu_0 H_0} = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)}$.

Ферромагнитный объект находится в вакууме. Вблизи некоторой точки A, находящейся на границе раздела сред, в вакууме вектор магнитной индукции равен B_0 и направлен под углом α к поверхности (рис. 1.25). При этом относительная магнитная проницаемость материала объекта равна μ_r . Чему равно значение магнитной индукции в ферромагнетике в окрестностях той же точки A?

Искомое значение индукции определяется по формуле $B = \sqrt{B_n^2 + B_\tau^2}$, где B_n и B_τ — нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции в ферромагнетике соответственно. Воспользуемся граничными условиями $B_{n2} = B_{n1}$, $H_{\tau 2} = H_{\tau 1}$. Индексы 1 и 2 относятся к вакууму и ферромагнетику соответственно.

Тогда $B_n = B_0 \sin \alpha$.

$$B_\tau = \mu_r \mu_0 H_\tau = \mu_r B_0 \sin \alpha_0.$$

$$B = B_0 \sqrt{\cos^2 \alpha + \mu_r \sin^2 \alpha}.$$

Частный случай: если $\mu_r = 1$, то $B = B_0$ (см. рис. 1.25).

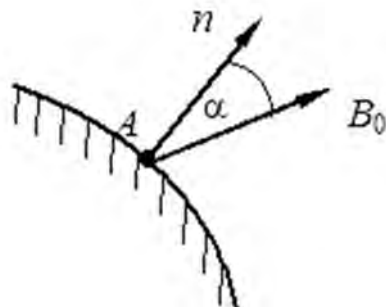


Рис. 1.25. Расчетная схема

1.7. Определение статических магнитных характеристик ферромагнитных материалов

Какие требования предъявляют к образцам, которые предназначены для определения основных магнитных параметров ферромагнитных материалов, а также кривой первоначального намагничивания, основной кривой намагничивания, петли гистерезиса?

Для измерений применяют образцы замкнутой формы в виде кольца (ГОСТ 8.377–80). Кольцевые образцы из листовых и ленточных материалов изготавливают в виде пакета, а образцы из проволоки получают навивкой. Для материалов, обладающих магнитной анизотропией, следует применять витые образцы. Отношение наружного диаметра кольцевого образца к его внутреннему диаметру не должно превышать 1,3.

Как наносят намагничивающую и измерительную обмотки на поверхность кольцеобразного образца при определении магнитных характеристик материалов?

Число витков измерительной обмотки зависит от чувствительности веберметра или баллистического гальванометра и на практике обычно составляет от 1 до 3. Отводимые от обмотки провода должны быть перевиты.

Число витков намагничивающей обмотки вычисляют по формуле

$$w_1 \geq \frac{\pi H (D_H + D_в)}{2I},$$

где H – максимальное значение напряженности магнитного поля, которое требуется создать в образце; I – максимальный ток, вызывающий допустимое нагревание обмотки.

Намагничивающая обмотка должна быть расположена равномерно по длине окружности образца поверх измерительной обмотки. Обмотки друг от друга и от образца изолируют лакотканью.

Приведите принципиальную электрическую схему устройства для определения статических магнитных характеристик материала.

Принципиальная электрическая схема изображена на рис. 1.26.

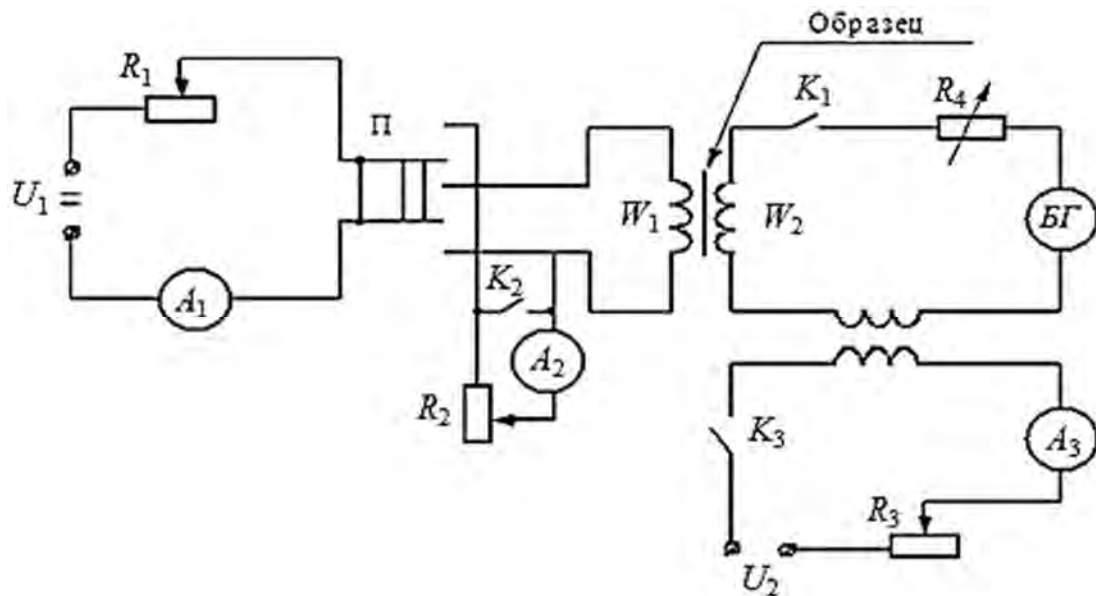


Рис. 1.26. Принципиальная электрическая схема устройства для определения статических магнитных характеристик магнитомягких материалов: R_1 и R_2 – переменные сопротивления; R_3 – магазин сопротивлений; A_1 , A_2 , A_3 – амперметры; M – образцовая катушка взаимной индуктивности; БГ – баллистический гальванометр или веберметр; W_1 – намагничивающая обмотка образца; W_2 – измерительная обмотка

Как определяют кривую первоначального намагничивания материала?

Устанавливают значения напряженности магнитного поля H_i , при которых будет определяться магнитная индукция B_i . Затем, используя формулу $H = \frac{w_1 I}{l_{cp}}$, рассчитывают значение тока I_1 , соответствующее напряженности поля в образце H_1 (w_1 – число витков намагничивающей обмотки; l_{cp} – средняя длина силовой линии в образце). Скачком подают в обмотку w_1 ток I_1 , соответствующий напряженности поля в образце H_1 (рис. 1.27). По значению α_1 – показанию

баллистического гальванометра – по формуле $B = \frac{C_0 \alpha}{w_2 S}$ находят соответствующее значение индукции B_1 при установившемся значении напряженности поля H_1 . В последней формуле C_0 – баллистическая постоянная гальванометра, S – площадь сечения образца, α – величина отброса стрелки гальванометра.

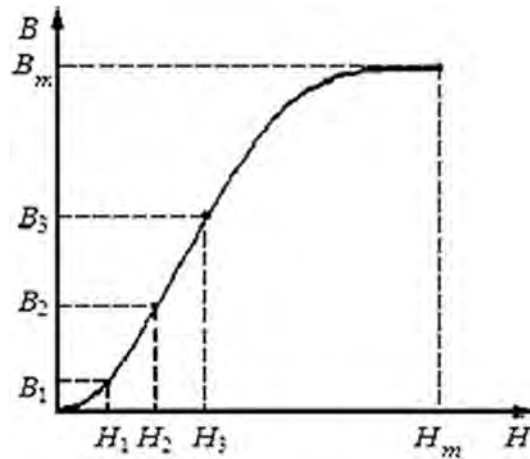


Рис. 1.27. К определению кривой первоначального намагничивания

Затем ток в намагничивающей обмотке увеличивают скачком до значения I_2 , соответствующего напряженности поля H_2 , и наблюдают отброс стрелки гальванометра α_2 , пропорциональный изменению индукции $\Delta B_1 = B_2 - B_1$. Добавляя к B_1 значение ΔB_1 , рассчитанное по приведенной выше формуле, находят величину индукции B_2 при напряженности поля в образце H_2 . Аналогично определяют все значения магнитной индукции, включая B_m . Соединяя точки плавной линией, получают кривую первоначального намагничивания.

Как определяют основную кривую намагничивания?

Основную кривую намагничивания материала снимают на баллистической установке. С этой целью устанавливают ток I_1 в намагничивающей обмотке, затем производят 10–15-кратное коммутирование направления тока через намагничивающую обмотку. К измерительной обмотке кольцеобразного образца подключают измерительный прибор (при этом тумблер прибора находится в положении «нуль»), а после установки стрелки прибора на нуль переводят тумблер в положение «измерение» и перебрасывают переключатель направления тока в намагничивающей обмотке из одного крайнего положения во второе.

Величину магнитной индукции определяют по формуле $B = \frac{C_\sigma \alpha}{2w_2 S}$. Число 2 в знаменателе появилось по той причине, что при измерении индукция изменялась от $-B$ до $+B$.

Затем увеличивают намагничивающий ток до значения I_2 и весь процесс повторяют. Соответствующие значения напряженности магнитного поля определяют по формуле $H = \frac{w_1 I}{\pi(R_g + R_n)}$. Строят график зависимости магнитной индукции от напряженности поля, получая основную кривую намагничивания материала.

Опишите методику построения петли гистерезиса.

Определение точек петли гистерезиса производят для одной ее ветви AB, B (рис. 1.28).

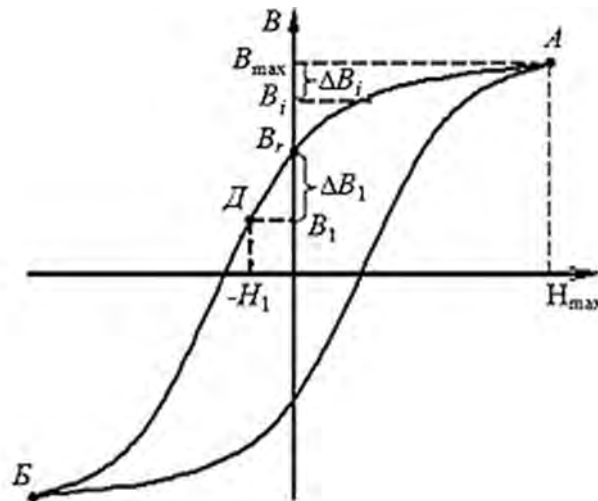


Рис. 1.28. К определению петли магнитного гистерезиса

Сначала находят точки кривой AB, B . Для этого по формуле $H = \frac{w_1 I}{\pi(R_g + R_n)}$ определяют значения токов I_i , соответствующих напряженности поля H_i , при которых будут выполнять измерения. Всякий раз начинают измерения от точки A .

С этой целью в намагничивающей обмотке кольцеобразного образца устанавливают ток I_{\max} , соответствующий H_{\max} . Затем, уменьшая скачком ток до значения I_i , определяют изменение индукции по формуле $\Delta B_i = \frac{C_\sigma \Delta \alpha}{w_2 S}$ и находят значение индукции в искомой точке $B_i = B_{\max} - \Delta B_i$ и т. д. Остаточную

индукцию B_r определяют по измеренному значению ΔB_r при выключении намагничивающего тока ($B_r = B_{\max} - \Delta B_r$). Значение ΔB_r равно отрезку $B_{\max} B_r$.

Чтобы определить точки участка $B_r B$ изменяют направление тока в намагничивающей обмотке. Скачком увеличивают ток до значения, соответствующего приращению напряженности магнитного поля в образце

$$\Delta H_1 = -H_1 = \frac{w_1 I_1}{\pi(R_g + R_n)}. \text{ Находят соответствующее приращение индукции } \Delta B_1$$

по формуле $\Delta B_i = \frac{C_g \Delta \alpha}{w_2 S}$. Величина индукции в искомой точке определяется

как $B_1 = B_r - \Delta B_1$ (см. рис. 1.28). Аналогичные измерения выполняют и для других точек участка $B_r B$ кривой AB .

Вторая ветвь петли получается отражением полученной кривой $AB_r B$ вначале относительно оси ординат, а затем – абсцисс.

Как измеряют коэрцитивную силу по намагниченности?

Коэрцитивной силой *по намагниченности* называется величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения намагниченности от остаточной намагниченности до нуля.

Для измерения коэрцитивной силы по намагниченности материалов с H_{CM} не менее 25 А/м применяют прямолинейные образцы в виде прутка круглого или прямоугольного сечения либо в виде пакета, набранного из полос. Отношение длины образца к корню квадратному из площади поперечного сечения должно быть не менее 10. Измерительная катушка должна наматываться медным изолированным проводом на полый цилиндрический или прямоугольный каркас из изолирующего материала. Измерительная катушка должна быть короче образца не менее чем в 3 раза. Площадь поперечного сечения катушки не должна превышать площадь поперечного сечения образца более чем в 2 раза.

На рис. 1.29 изображено устройство для измерения коэрцитивной силы по намагниченности. Оно состоит из намагничивающей катушки 1, обмотка которой подключена к источнику питания постоянного тока.

В центр катушки помещают испытуемый образец, на котором размещена измерительная обмотка, соединенная с баллистическим гальванометром. Образец намагничивают в поле соленоида до насыщения (с учетом его размагничивающего фактора). Ток *медленно* уменьшают до нуля, меняют полярность, а затем подбирают такое значение напряженности поля в соленоиде 1, при котором стрелка в баллистическом гальванометре не отклоняется при сдергивании с образца измерительной обмотки. Значение напряженности поля H_s в соленоиде, необходимое для намагничивания образца до технического насыщения, вычисляют по формуле

$$H_s \geq H_{\max} + N \left(\frac{B_s}{\mu_0} - H_{\max} \right),$$

где H_{\max} – значение напряженности магнитного поля, необходимое для намагничивания материала образца до технического насыщения, принимаемое в соответствии с нормативно-технической документацией; B_s – магнитная индукция технического насыщения материала; N – коэффициент размагничивания образца.

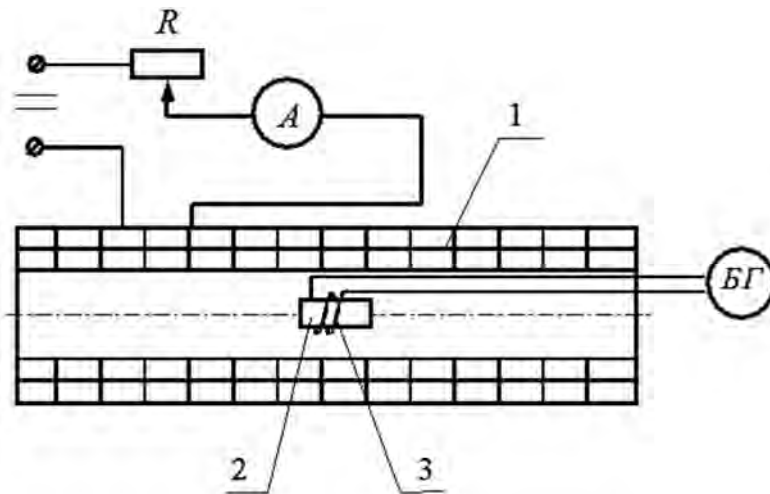


Рис. 1.29. Устройство для измерения коэрцитивной силы по намагниченности: 1 – намагничивающий соленоид; 2 – образец; 3 – измерительная обмотка; $БГ$ – баллистический гальванометр

Для прямолинейного образца $N = \frac{0,42d}{l}$, где l – длина образца; d – сторона квадрата или диаметр сечения.

1.8. Основные источники магнитных полей

1.8.1. Магнитное поле проводника с током

Силовые линии проводника с током представляют собой концентрические окружности. Направление силовых линий определяется по правилу буравчика: если при вращении буравчик перемещается в направлении тока, то направление его вращения укажет направление силовых линий. С увеличением расстояния от проводника напряженность магнитного поля уменьшается.

К вершинам A и B проволочного ромба подведены провода от источника постоянного тока (рис. 1.30). Какова напряженность поля в центре ромба, если сечение проволоки, из которой изготовлен ромб, одинаковое?

Напряженности магнитных полей, создаваемые в центре ромба токами, протекающими по ветвям ACB и ADB , имеют равную величину (т. к. $ACB = ADB$) и противоположное направление (по правилу буравчика).

Поэтому напряженность результирующего магнитного поля в центре ромба будет равна нулю.

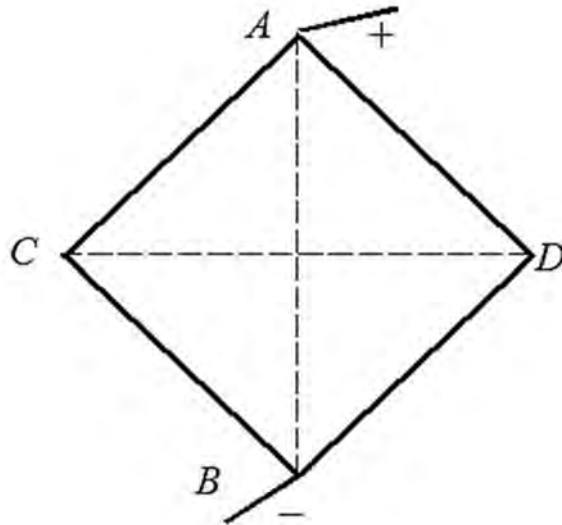


Рис. 1.30. К определению напряженности магнитного поля в центре проволочного ромба

Два проводника расположены параллельно друг другу. Что произойдет с проводниками, если по ним пропустить ток: а) в одном направлении; б) в противоположных направлениях?

Вокруг проводника при пропускании по нему тока возникает магнитное поле. Поэтому на находящийся рядом второй проводник с током со стороны поля, создаваемого первым проводником, действует сила Лоренца

$$F = B_1 I_2 l,$$

где $B_1 = \mu_a H_1$; l – длина проводов; I_2 – сила тока во втором проводе; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды.

Поскольку напряженность магнитного поля H_1 на расстоянии r от провода определяется из выражения $H_1 = \frac{I_1}{2\pi r}$, где I_1 – сила тока в первом проводе; r – расстояние между проводниками, то получим следующую формулу для определения силы взаимодействия двух проводников с токами I_1 и I_2 :

$$F = \frac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi r}.$$

Ее направление определяется *по правилу левой руки*: руку располагают так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а все пальцы, кроме большого, были ориентированы в направлении тока, тогда отставленный на 90° большой палец укажет направление действия силы. Аналогичная сила действует и на первый проводник со стороны второго проводника.

Нетрудно определить, что в первом случае проводники будут притягиваться друг к другу, а во втором – отталкиваться.

Постоянный электрический ток I течет вдоль неферромагнитного проводника, который имеет форму цилиндра радиусом R . Определите напряженность поля на произвольном расстоянии X от центра проводника, считая, что ток равномерно распределен по сечению цилиндра.

Если $X \geq R$, то из закона полного тока $Hl = \sum I_i$, где H – искомая напряженность магнитного поля; l – длина замкнутого контура; I_i – ток, пронизывающий контур. Имеем $H = \frac{I}{2\pi X}$.

Если $X < R$, то $H = \frac{I'}{2\pi X}$. Значение $I' = jS$, где j – плотность тока в сечении; S – площадь, охватываемая контуром.

$$I' = \frac{I}{\pi R^2} \pi X^2 = \frac{IX^2}{R^2}.$$

Тогда

$$H = \frac{I'}{2\pi X} = \frac{IX^2}{R^2} \frac{1}{2\pi X} = \frac{IX}{2\pi R^2}.$$

Таким образом, внутри проводника по мере удаления от его оси напряженность поля изменяется по линейному закону, а вне проводника – по закону, обратно пропорциональному (рис. 1.31). Для лучшего восприятия материала следует подставить в формулы, описывающие характер изменения напряженности поля внутри и вне цилиндра, значения $X = 0; R/4; R/2; 3R/4; R; 2R; 3R; 4R$.

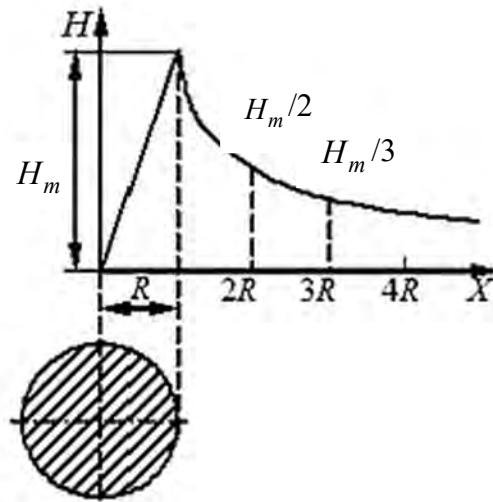


Рис. 1.31. Распределение напряженности поля внутри и вне неферромагнитного цилиндрического проводника с током

Изменится ли напряженность магнитного поля в некоторой точке A вблизи проводника с током (см. условие предыдущей задачи), если к проводнику приблизить массивный ферромагнитный объект с плоской поверхностью?

Напряженность поля возрастет. Расчет магнитного поля в этом случае можно выполнить методом зеркальных изображений. Дадим краткое пояснение метода. Пусть в среде с магнитной проницаемостью μ_1 параллельно плоскости раздела сред $\frac{\mu_1}{\mu_2}$ проходит провод с током I_1 (рис. 1.32, а). Требуется найти напряженность поля в произвольной точке пространства. Введем фиктивные токи I_2 и I_3 . Провод с током I_2 поместим зеркально по отношению к проводу с током I_1 , а провод с током I_3 расположим там, где находится провод с током I_1 (рис. 1.32, б, в).

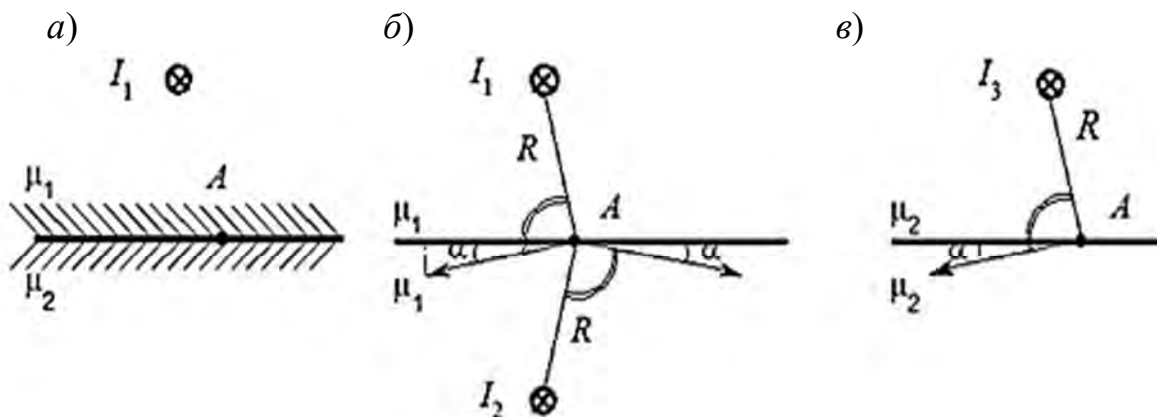


Рис. 1.32. К объяснению метода зеркальных изображений

Поле в верхнем полупространстве, где расположен ток I_1 (см. рис. 1.32, б), будет определяться действием реального тока I_1 и фиктивного тока I_2 при условии, что все пространство заполняет среда с магнитной проницаемостью μ_1 . Поле в произвольной точке нижнего полупространства будет определяться действием тока I_3 , если все пространство имеет магнитную проницаемость μ_2 (см. рис. 1.32, в).

Для определения величин этих токов воспользуемся граничными условиями $H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$, $B_{n1} = B_{n2}$. Точку A на границе раздела сред можно считать принадлежащей как первой, так и второй средам. Тогда из первого граничного условия на основании рис. 1.32, б, в можно записать

$$\left(\frac{I_1}{2\pi R} - \frac{I_2}{2\pi R} \right) \cos \alpha = \frac{I_3}{2\pi R} \cos \alpha \quad (1.1)$$

или

$$I_1 - I_2 = I_3. \quad (1.2)$$

Из второго граничного условия имеем

$$\left(\frac{I_1}{2\pi R} + \frac{I_2}{2\pi R} \right) \mu_1 \sin \alpha = \frac{I_3}{2\pi R} \mu_2 \sin \alpha \quad (1.3)$$

или

$$I_1 + I_2 = I_3 \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (1.4)$$

Решая совместно уравнения (1.2) и (1.4), получим

$$I_2 = I_1 \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2}; \quad (1.5)$$

$$I_3 = I_1 \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}. \quad (1.6)$$

Зная значения этих токов, можно определить напряженности полей в произвольной точке пространства.

Пример. По проводнику, который находится в среде с магнитной проницаемостью $\mu_1 = 1$, течет постоянный ток $I_1 = 10 \text{ A}$. Проводник расположен на расстоянии $a = 2 \text{ см}$ от границы второй среды с $\mu_2 = 999$. Определить напряженность поля в точках M и N , которые находятся на расстоянии $a = 2 \text{ см}$ от границы раздела сред (рис. 1.33).

Решение.

По формулам (1.5) и (1.6) определяем фиктивные токи I_2 и I_3 :

$$I_2 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} I_1 = \frac{999 - 1}{1 + 999} \cdot 10 = 9,98 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} I_1 = \frac{2 \cdot 1}{1 + 999} = 0,02 \text{ A}.$$

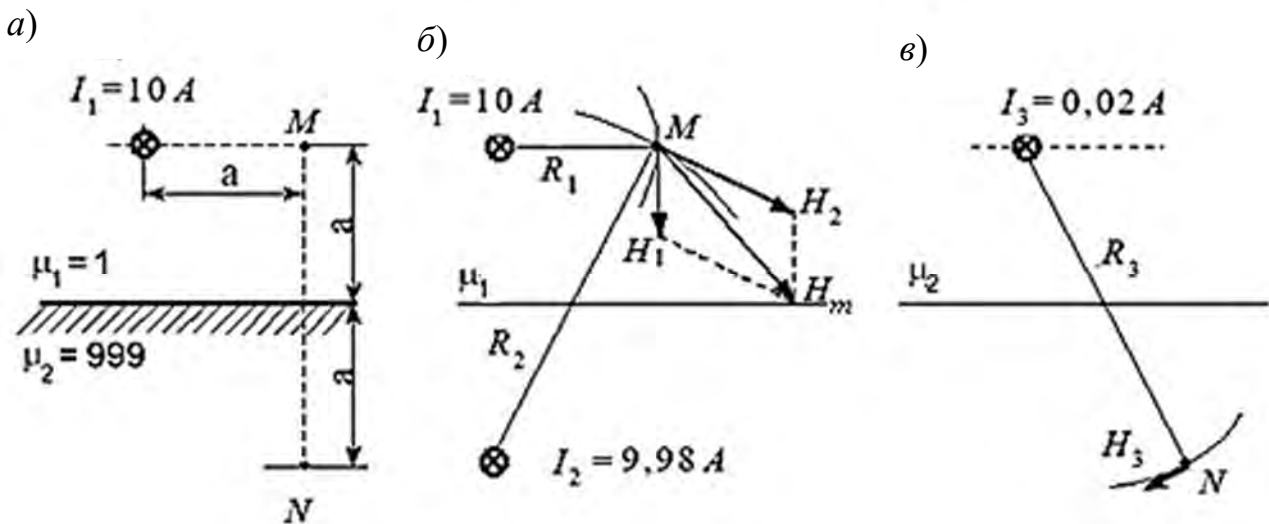


Рис 1.33. К определению напряженности магнитного поля методом магнитных изображений

Напряженность поля в точке M , расположенной в том же полупространстве, что и ток I_1 , $\vec{H}_M = \vec{H}_1 + \vec{H}_2$.

Из закона полного тока

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi a} = \frac{10}{2\pi \cdot 0,02} = 79,5 \text{ A/м};$$

$$H_2 = \frac{I_2}{2\pi\sqrt{a^2 + (2a)^2}} = \frac{I_2}{2\pi a\sqrt{5}} = \frac{9,98}{2\pi \cdot 2 \cdot 2,24 \cdot 10^{-2}} = 35,4 \text{ А/м.}$$

Напряженность поля в точке M находим графическим путем $H_M = 101 \text{ А/м.}$ Это значительно больше напряженности поля в той же точке при отсутствии массивного тела ($79,5 \text{ А/м.}$): $H_M = \frac{I_1}{2\pi a} = \frac{10}{2\pi \cdot 0,02} = 79,5 \text{ А/м.}$

Напряженность поля в точке N

$$H_N = H_3 = \frac{I_3}{2\pi a\sqrt{5}} = \frac{0,02}{2\pi \cdot 2 \cdot 2,24 \cdot 10^{-2}} = 0,0715 \text{ А/м.}$$

На рис. 1.34 изображена картина силовых линий магнитного поля для случая, когда провод с током проходит в воздухе параллельно поверхности ферромагнитной плиты.

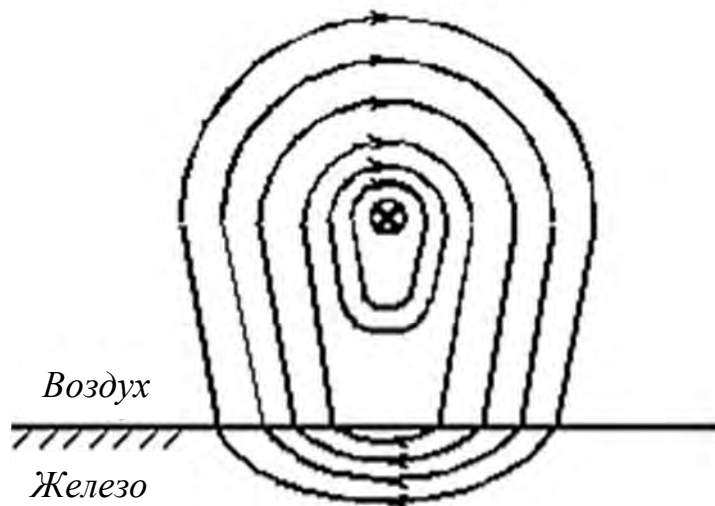


Рис. 1.34. Картина силовых линий магнитного поля проводника с током, находящегося вблизи ферромагнитного объекта

Как видно из рисунка, в ферромагнитной плите густота силовых линий магнитного поля больше, чем в воздухе. Это свойство ферромагнетиков используется при изготовлении электромагнитов. В них электрическая катушка наносится на сердечник, что увеличивает мощность электромагнита.

Постоянный ток течет вдоль тонкой оси ферромагнитного цилиндра радиусом R . Определите напряженность и индукцию магнитного поля внутри и вне цилиндра.

По закону полного тока напряженность поля $H = \frac{I}{2\pi X}$. Магнитная индукция

$$B = \mu_r(H)\mu_0 H = \mu_r(H)\mu_0 \frac{I}{2\pi X} = \mu_0 H + \mu_0 M(H) = \mu_0 H + \mu_0 M(X).$$

Графики зависимости $H(X)$ и $B(X)$ показаны на рис. 1.35 и 1.36.

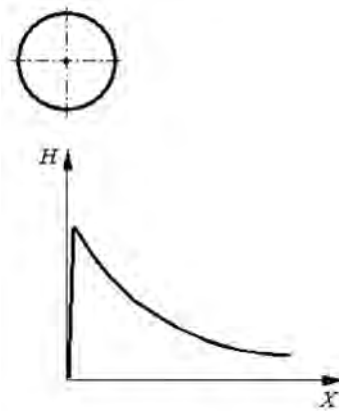


Рис. 1.35. Изменение напряженности магнитного поля при протекании электрического тока вдоль продольной оси ферромагнитного цилиндра

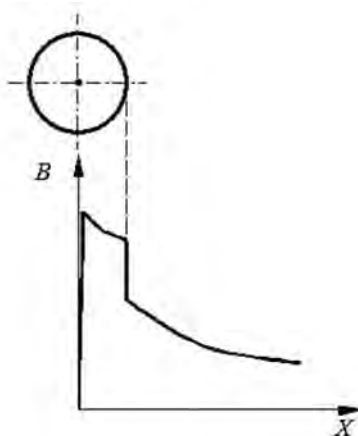


Рис. 1.36. Изменение магнитной индукции при протекании электрического тока вдоль оси ферромагнитного цилиндра

Из рисунков видно, что напряженность поля монотонно убывает по мере удаления от оси цилиндра, а магнитная индукция претерпевает скачок конечной величины на границе раздела сред.

Постоянный ток I пропускают по сечению трубки с внутренним радиусом R_1 и наружным радиусом R_2 . Определите напряженность поля в произвольной точке в отверстии трубки, в металле и снаружи трубки, считая, что ток равномерно распределен по сечению трубки.

Из закона полного тока следует $H = \frac{\sum I_i}{l}$, где I_i – i -й ток, проходящий через поверхность, ограниченную некоторым замкнутым контуром; l – длина замкнутого контура.

Если очертить окружность радиусом R_1 с центром на оси трубки, то ток внутри окружности будет равен нулю. Поэтому при $X < R_1$ напряженность магнитного поля $H = 0$, т. е. внутри трубки магнитное поле отсутствует (рис. 1.37).

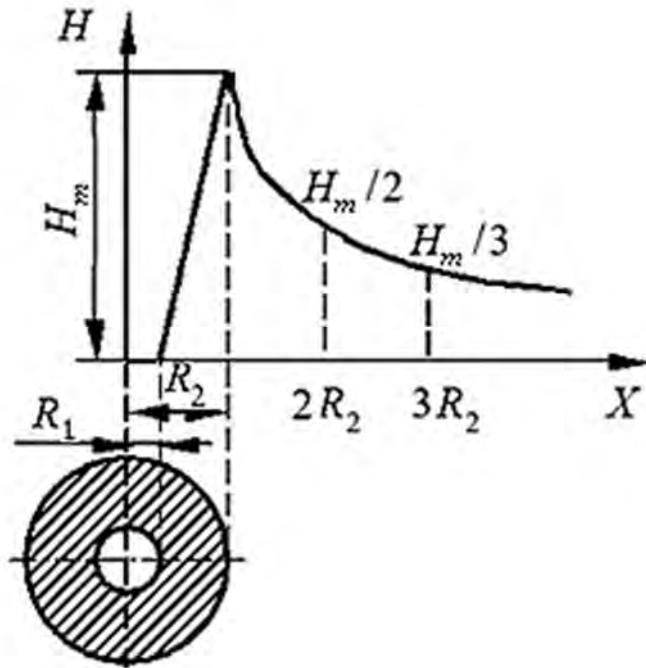


Рис. 1.37. Изменение напряженности магнитного поля вне и внутри трубки, намагничиваемой пропусканием тока по ее сечению

Если начертить окружность, радиус которой равен наружному радиусу R_2 трубки, то она охватит ток $I = j\pi(R_2^2 - R_1^2)$. Отсюда плотность тока $j = \frac{I}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$. Если исследуемая точка находится на окружности радиусом X с центром на оси трубки ($R_1 < X < R_2$), то охватываемый ею ток

$$I' = jS = \frac{I}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \pi(X^2 - R_1^2),$$

где S – сечение трубки, охватываемое контуром.

$$\text{Тогда } H = \frac{I'}{2\pi X} = \frac{I(X^2 - R_1^2)}{2\pi X(R_2^2 - R_1^2)}.$$

При $X > R_2$ охватываемый круговым контуром ток равен I и напряженность поля можно вычислить по формуле $H = \frac{I}{2\pi X}$.

Изменение напряженности магнитного поля вне и внутри трубки, намагничиваемой пропусканием тока по ее сечению, изображено на рис. 1.37.

Как распределяется магнитная индукция внутри и вне сплошного цилиндрического проводника радиусом R с током? Электрический ток постоянный и распределен равномерно по сечению проводника.

1. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока I вдоль немагнитного цилиндра:

$$\text{– при } X \leq R \text{ магнитная индукция } B = \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2};$$

$$\text{– при } X > R \quad B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}.$$

Изменение магнитной индукции при протекании тока вдоль немагнитного цилиндра иллюстрируется рис. 1.38.

2. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока I вдоль магнитного цилиндра:

$$\begin{aligned} \text{– при } X \leq R \text{ магнитная индукция } B &= \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2} + \mu_0 M(H) = \\ &= \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2} + \mu_0 M(X); \end{aligned}$$

$$\text{– при } X > R \quad B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X},$$

где M – намагниченность материала объекта.

Изменение магнитной индукции при протекании тока вдоль ферромагнитного цилиндра представлено на рис. 1.39.

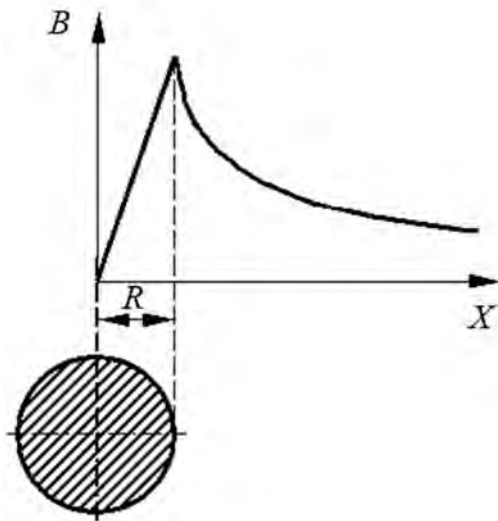


Рис. 1.38. Изменение магнитной индукции при протекании тока вдоль немагнитного цилиндра

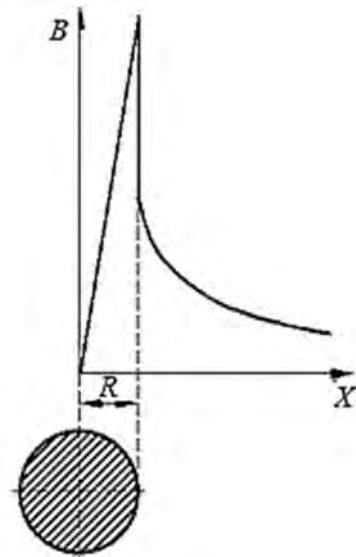


Рис. 1.39. Изменение магнитной индукции при протекании тока вдоль сплошного ферромагнитного цилиндра

Как изменяется магнитная индукция внутри и вне трубки, по которой протекает постоянный электрический ток?

Пусть внутренний радиус трубки R_1 , а наружный R_2 (рис. 1.40).

1. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока вдоль *немагнитной* трубки по ее сечению:

– при $0 \leq X < R_1$ магнитная индукция $B = 0$;

– при $R_1 \leq X \leq R_2$ $B = \mu_0 \frac{I(X^2 - R_1^2)}{2\pi X(R_2^2 - R_1^2)}$;

– при $X > R_2$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$.

Изменение магнитной индукции внутри и вне *немагнитной* трубки, по которой течет электрический ток, показано на рис. 1.40.

2. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока вдоль *магнитной* трубки по ее сечению:

– при $0 \leq X < R$ магнитная индукция $B = 0$;

– при $R_1 \leq X \leq R_2$ $B = \mu_0 \frac{I(X^2 - R_1^2)}{2\pi(R_2^2 - R_1^2)} + \mu_0 M = \mu_0 \frac{I(X^2 - R_1^2)}{2\pi(R_2^2 - R_1^2)} + \mu_0 M(X)$;

– при $X > R_2$ индукция $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$.

Характер изменения магнитной индукции при протекании электрического тока вдоль ферромагнитной трубки показан на рис. 1.41.

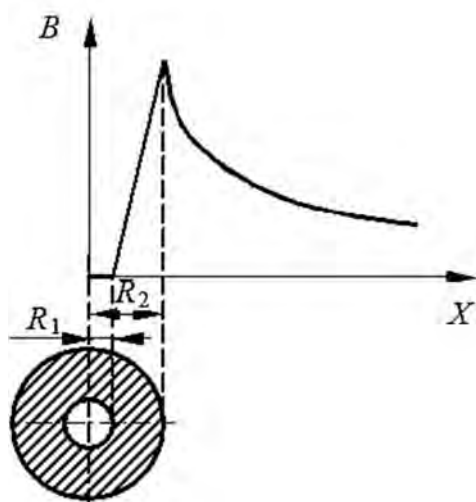


Рис. 1.40. Изменение магнитной индукции внутри и вне немагнитной трубки, по которой течет электрический ток

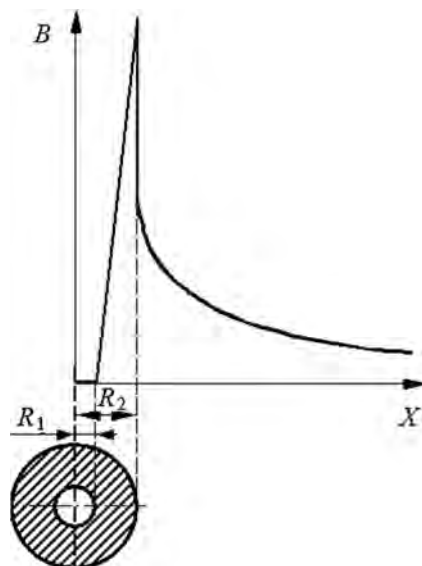


Рис. 1.41. Изменение магнитной индукции при протекании электрического тока вдоль ферромагнитной трубки

Как изменяется магнитная индукция вне и внутри трубки, намагничиваемой проводником радиусом R с постоянным током, равномерно протекающим по всему сечению проводника?

1. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока вдоль немагнитного проводника, находящегося внутри магнитной трубки:

– при $X \leq R$ магнитная индукция $B = \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2}$;

– при $R < X < R_1$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$;

– при $R_1 \leq X \leq R_2$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X} + \mu_0 M(X)$;

– при $X > R_2$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$,

где M – намагниченность материала объекта контроля; R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиус трубки соответственно.

Характер изменения магнитной индукции изображен на рис. 1.42.

2. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока вдоль немагнитного проводника радиусом R , находящегося внутри немагнитной трубки:

– при $X \leq R$ магнитная индукция $B = \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2}$;

– при $X > R$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$.

Графическая иллюстрация полученных результатов дана на рис. 1.43.

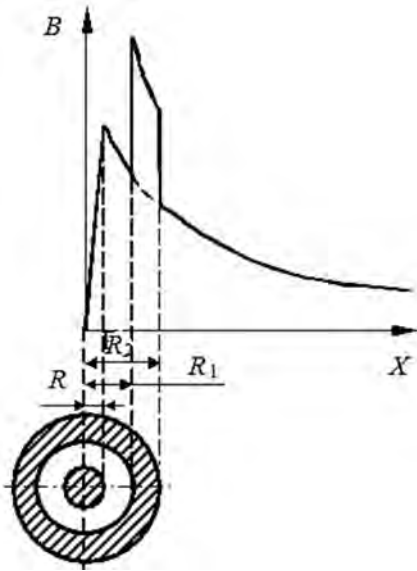


Рис. 1.42. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока вдоль немагнитного проводника, находящегося внутри магнитной трубки

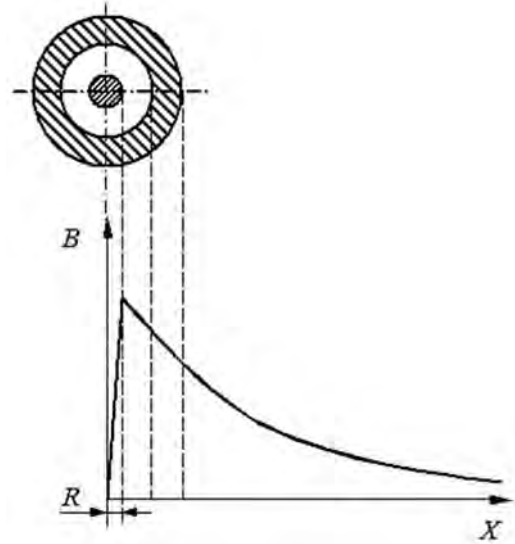


Рис. 1.43. Изменение магнитной индукции внутри и в окрестностях магнитной трубки, намагничиваемой пропусканием тока через немагнитный проводник, расположенный вдоль оси трубки

3. Изменение магнитной индукции при протекании постоянного тока вдоль магнитного проводника радиусом R , находящегося внутри магнитной трубки:

– при $X \leq R$ магнитная индукция $B = \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2} + \mu_0 M_1(H) =$
 $= \mu_0 \frac{IX}{2\pi R^2} + \mu_0 M_1(X)$;

– при $R \leq X \leq R_1$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$;

– при $R_1 \leq X \leq R_2$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X} + \mu_0 M_2(X)$;

– при $X > R_2$ $B = \mu_0 \frac{I}{2\pi X}$,

где M_1 и M_2 – намагниченность материала проводника и трубки соответственно; R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиус трубки соответственно.

Графически характер изменения магнитной индукции изображен на рис. 1.44.

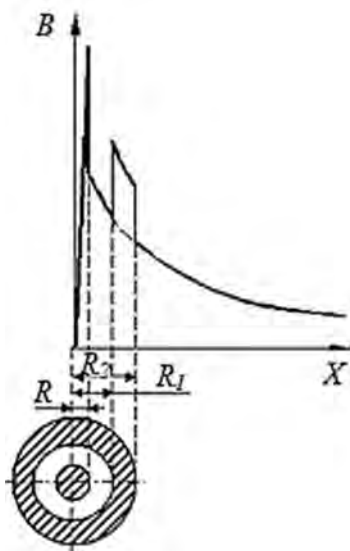


Рис. 1.44. Изменение магнитной индукции внутри и в окрестностях магнитной трубки, намагничиваемой пропусканием тока через магнитный проводник, расположенный вдоль оси трубки

1.8.2. Виток с током

По какой формуле определяется напряженность магнитного поля в центре витка с током?

Формула для расчета напряженности магнитного поля в центре витка с током имеет следующий вид:

$$H = \frac{I}{D},$$

где H – напряженность магнитного поля в центре витка с током (в направлении, перпендикулярном его плоскости); I – сила тока в проводнике; D – средний диаметр витка.

Как определить магнитный момент контура с током?

Магнитным моментом контура с током называется величина, равная произведению силы тока на площадь, охватываемую контуром: $M = IS$. Единицей его измерения является ампер-квадратный метр ($A \cdot m^2$). Магнит-

ный момент нескольких контуров тока равен векторной сумме их магнитных моментов.

На плоский контур тока, помещенный в магнитное поле, действует момент сил M :

$$M = ISB \sin\alpha,$$

где B – индукция поля; α – угол между нормалью к плоскости витка и вектором \vec{B} .

Виток из эластичного тонкого провода имеет форму квадрата и располагается в горизонтальной плоскости (рис. 1.45). Что произойдет с витком, если по нему пропустить ток в направлении, указанном стрелкой, и поместить в однородное магнитное поле, направленное вертикально вниз? Что изменится, если поменять направление тока или поля на противоположное?

Если по проводнику пропустить ток в направлении, указанном стрелкой, и поместить в однородное магнитное поле, направленное вертикально вниз, то виток примет форму окружности, а его площадь станет максимальной. Деформация проводника произойдет под действием силы Лоренца. Направления силы Лоренца, действующей на различные участки проводника с током, определяются по правилу левой руки и указаны на рис. 1.45.

Если направление тока или вектора напряженности поля, в котором находится виток с током, изменится на противоположное, то виток сожмется и примет вид двух параллельных прямых.

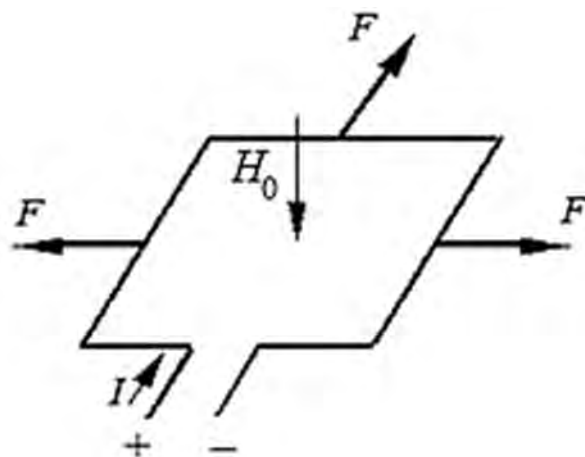


Рис. 1.45. Прямоугольный виток провода с током в магнитном поле

1.8.3. Цилиндрическая катушка индуктивности (соленоид)

Какая электрическая катушка называется бесконечно длинной?

Бесконечно длинной называется электрическая катушка, у которой длина много больше среднего диаметра обмотки. Внутри такой катушки магнитное поле однородно. Его напряженность может быть определена по формуле

$$H = \frac{Iw}{l},$$

где I – сила тока в катушке; w – число витков провода; l – длина катушки.

Магнитное поле катушки получается в результате сложения (суперпозиции) полей, создаваемых отдельными витками. Силовые линии магнитного поля, естественно, замкнутые. Они направлены *снаружи катушки* от северного полюса к южному, а *внутри* – от южного к северному (рис. 1.46).

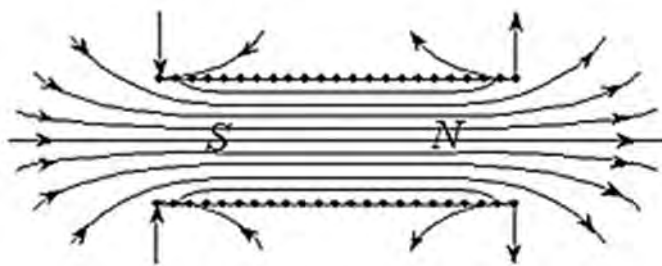


Рис. 1.46. Направление силовых линий магнитного поля внутри и вне соленоида

Силовые линии, создаваемые магнитным полем соленоида, показаны на рис. 1.46. Если приставить справа от изображенного на этом рисунке соленоида такой же соленоид, то поле снаружи правого конца первого соленоида исчезнет. Это следует из принципа суперпозиции.

Как вычислить напряженность магнитного поля в центре соленоида небольшой длины?

Напряженность поля имеет наибольшую величину вблизи внутренней поверхности соленоида и уменьшается к его оси.

Напряженность поля в центре электрической катушки небольшой длины (рис. 1.47) определяется по формуле

$$H = \frac{Iw}{\sqrt{l^2 + D^2}},$$

где I – ток в соленоиде; w – число витков катушки; l – длина соленоида; D – средний диаметр катушки.

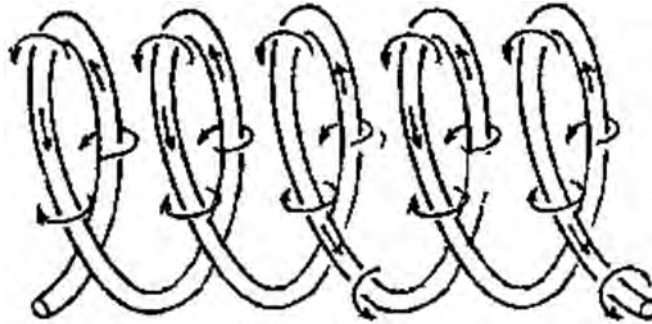


Рис. 1.47. Направление силовых линий магнитного поля вокруг отдельных витков соленоида с током

Из этой формулы можно получить формулу для определения напряженности магнитного поля в центре витка с током, приняв допущение $l \rightarrow 0$:

$$H = \frac{Iw}{D}.$$

Как вычислить напряженность магнитного поля в произвольной точке оси соленоида небольшой длины?

Напряженность поля в точке A оси соленоида небольшой длины можно определить по формуле

$$H = \frac{Iw}{l} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{2},$$

где I – ток в обмотке соленоида; w – число витков.

Остальные параметры соленоида указаны на рис. 1.48.

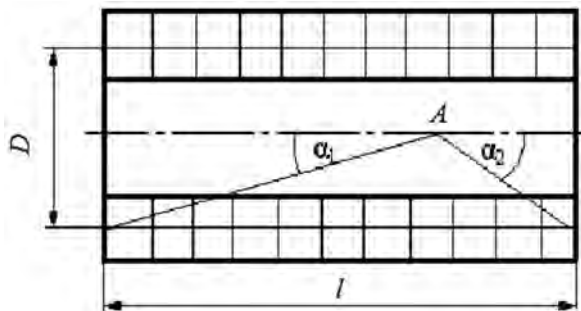


Рис. 1.48. К определению напряженности магнитного поля в произвольной точке центральной оси соленоида с током

Напряженность магнитного поля у края соленоида конечной длины определяется по формуле

$$H = \frac{1}{2} \frac{Iw}{\sqrt{l^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2}},$$

где D – средний диаметр соленоида.

Для наблюдателя, смотрящего на конец соленоида, ток в обмотке идет по направлению движения часовой стрелки. Каким полюсом (северным или южным) обращен к наблюдателю соленоид?

Южным. Внутри соленоида силовые линии магнитного поля направлены от южного полюса к северному, снаружи – от северного к южному (рис. 1.49). Направление силовых линий магнитного поля определяется по правилу буравчика.

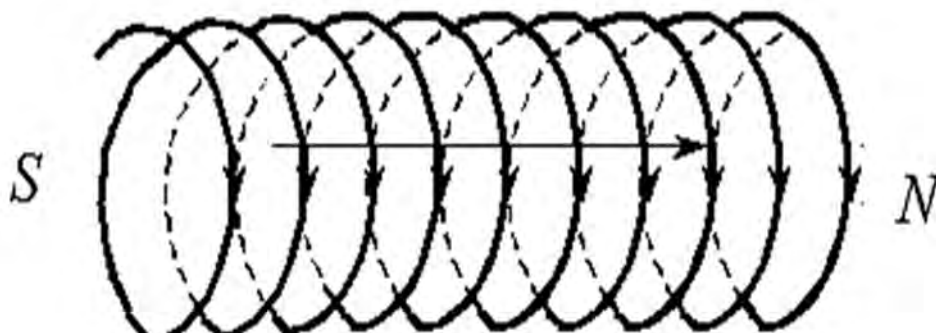


Рис. 1.49. Направление силовых линий магнитного поля внутри соленоида

Зная направление тока в витках катушки, полюсы соленоида можно определить по правилу буравчика. Вращая ручку буравчика по току, по направлению движения его острия определяем направление силовых линий магнитного поля катушки, а следовательно, и полюсы катушки. Северным полюсом катушки будет тот ее конец, на котором ток в витках катушки для наблюдателя, смотрящего на этот конец, будет течь против часовой стрелки (рис. 1.50, а). Другой конец катушки будет южным полюсом, ток здесь будет обходить витки по часовой стрелке (рис. 1.50, б).

Для перемены полюсов катушки достаточно изменить направление тока в ней.

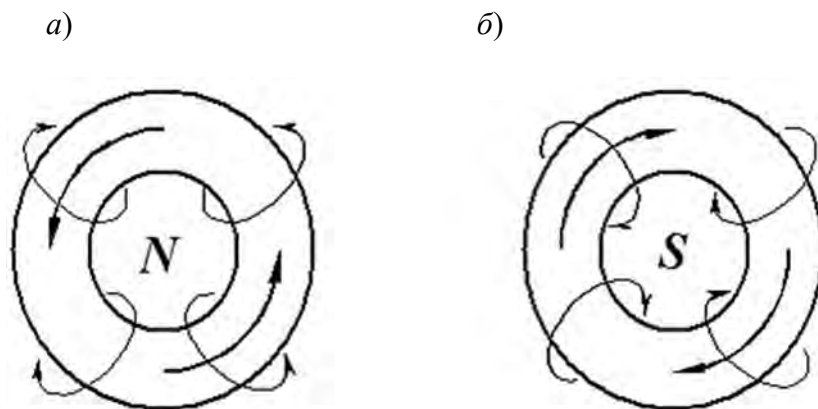


Рис. 1.50. К определению положения магнитных полюсов соленоида с током

Что произойдет, если рядом с внутренним отверстием соленоида, по обмотке которого проходит постоянный или переменный ток, расположить небольшую ферромагнитную деталь?

Деталь намагнитится и втянется в соленоид. Силы, вызывающие поступательное движение детали, возникают только в неоднородном поле. На более близком к соленоиду конце детали будет индуцироваться полюс, противоположный ближайшему полюсу соленоида. Поэтому на более близкий к соленоиду конец детали действует затягивающая сила F_3 , а на более удаленный – выталкивающая. Второй полюс соленоида расположен на значительном удалении от детали, а потому его влияние невелико. Так как градиент напряженности магнитного поля выше у края соленоида, то затягивающая сила будет превосходить выталкивающую. Их равнодействующая будет направлена внутрь соленоида. По мере втягивания детали магнитный полюс, противоположный ближайшему полюсу соленоида, начнет индуцироваться внутри детали. Поэтому равнодействующая этих сил все равно будет направлена внутрь соленоида. В однородном поле градиент напряженности магнитного поля равен нулю, а потому деталь будет перемещаться внутри катушки по инерции. Если ток будет включен все время, то у второго конца катушки деталь попадет в область, где напряженность поля меньше, чем в центре катушки. Так как пондеромоторная сила стремится втянуть тело в область наибольшей напряженности поля, то деталь остановится, а затем начнет двигаться в противоположном направлении. Деталь стремится занять такое положение в середине катушки, чтобы проходящий через нее магнитный поток имел максимальное значение.

Если через обмотку соленоида пропустить кратковременный импульс тока большой величины, то деталь может по инерции улететь на расстояние в несколько метров. Ток нужно выключить в момент, когда деталь приобрела

максимальную скорость, т. е. когда она находится в области однородного поля, где действующая на нее со стороны поля сила равна нулю.

Работа, производимая при перемещении объекта, и увеличение энергии магнитного поля происходят за счет энергии источника питания соленоида.

Длинный изолированный медный провод сложили вдвое и им намотали катушку. Будет ли такая катушка при включении ее в электрическую цепь притягивать железные детали?

Обмотка в этом случае называется бифилярной. При таком способе намотки ток в двух соседних витках имеет противоположное направление, магнитное действие одного витка компенсируется магнитным действием другого. Поэтому катушка не будет проявлять магнитных свойств.

1.8.4. Магнитное поле тороидальной катушки

По каким формулам определяют напряженность магнитного поля и индукцию в ферромагнитном образце, который имеет форму тора и расположен внутри тороидальной катушки?

Тороид образует провод, навитый на каркас в виде тора (см. рис. 1.22). Пусть R_1 – внутренний радиус, R_2 – наружный радиус тора, d – диаметр провода. Рассмотрим контур в виде окружности радиусом $R_1 - d$, центр которой лежит на оси тороида. Если рассматриваемый контур расположен в плоскости симметрии тороида, перпендикулярной его оси, то линии тока не пересекают контур. Следовательно, по закону полного тока напряженность магнитного поля в пространстве $R < R_1 - d$ вне тороида равна нулю $\left(H = \frac{\sum I_i}{2\pi R} \right)$.

Пусть радиус контура равен $R_2 + d$. Линии тока пересекают этот контур, причем по наружному и внутреннему кольцам в противоположных направлениях. Алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур, равна нулю. Следовательно, напряженность магнитного поля в пространстве $R > R_2 + d$ также равна нулю. Можно показать, что и в других точках пространства, окружающего тороид, напряженность поля, создаваемого обмоткой тороида, равна нулю.

Пусть радиус контура $R_1 < R < R_2$. Алгебраическая сумма токов, пронизывающих такой контур, равна Iw , где I – величина тока в обмотке, w – число витков обмотки. Тогда напряженность поля внутри тороидальной катушки $H = \frac{Iw}{2\pi R}$. Из последней формулы видно, что напряженность поля имеет большее или меньшее значение в зависимости от расстояния R от точки наблюдения до центра кольца.

Напряженность поля, создаваемого в тороидальной обмотке на ее средней линии, и магнитная индукция в образце, находящемся в ней, определяются соответственно по формулам

$$H_{cp} = \frac{Iw}{l_{cp}} = \frac{Iw}{2\pi R_{cp}} = \frac{Iw}{\pi(R_1 + R_2)};$$

$$B_{cp} = \mu_0 \mu_r \frac{Iw}{\pi(R_1 + R_2)},$$

где l_{cp} – длина средней линии обмотки; R_{cp} – радиус средней линии обмотки.

Минимальные значения напряженности поля и магнитной индукции имеют место на наружной поверхности кольца внутри тороидальной катушки (плотность обмотки там меньше). Максимальное значение напряженности магнитного поля (индукции) – на внутренней поверхности кольца:

$$H_{max} = \frac{Iw}{2\pi R_1}; \quad B_{max} = \mu_0 \mu_r \frac{Iw}{2\pi R_1}.$$

1.8.5. Постоянные магниты

Охарактеризуйте постоянные магниты.

Постоянный магнит выполнен из материала, в котором магнитные домены находятся в фиксированных положениях с преимущественной ориентацией в определенном направлении. Самый простой постоянный магнит имеет два полюса – северный и южный (рис. 1.51).

Магнитный полюс – это часть поверхности магнита, на которой нормальная к поверхности составляющая намагниченности максимальна. По отдельности магнитные полюсы не существуют.

Одноименные полюсы магнитов отталкиваются, а разноименные – притягиваются. Сила притяжения или отталкивания магнита максимальна у его полюсов.

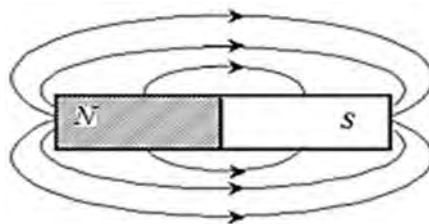


Рис. 1.51. Распределение силовых линий магнитного поля полосового магнита

Силовое действие магнитов обусловлено существованием магнитного поля. Магнитные силовые линии поля вне магнита направлены от северного полюса к южному, а внутри магнита – от южного к северному. Их плотность уменьшается с увеличением расстояния от полюсов. Сечение постоянного магнита, перпендикулярное его оси и находящееся на одинаковом расстоянии от полюсов, называется нейтральным сечением.

Свойства постоянного магнита характеризуются кривой размагничивания гистерезисного цикла, показанной на рис. 1.52.

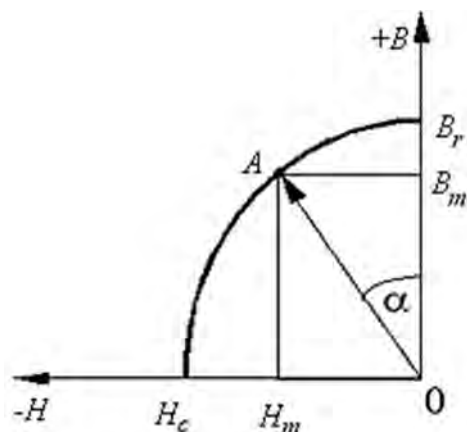


Рис. 1.52. Кривая размагничивания цикла постоянного магнита

Эта кривая может быть получена при намагничивании до насыщения магнита с последующим размагничиванием до нуля. Качество материала, применяемого для изготовления постоянных магнитов, в некоторой степени определяется произведением остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c . Чем больше это произведение, тем больше этот материал подходит для изготовления постоянных магнитов.

Обычно постоянный магнит имеет незамкнутую форму. Магниту можно придать другую форму, присоединяя к его полюсам арматуру из магнитно-мягкого материала. Наличие воздушного зазора между полюсами магнита приводит к уменьшению магнитной индукции по сравнению с остаточной индукцией в замкнутом сердечнике.

Для изготовления постоянных магнитов применяют магнитотвердые материалы. Магнитные цепи устройств с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т. к. используется магнитная энергия, возникающая между полюсами магнита.

На рис. 1.53 представлен ряд зависимостей, характеризующих свойства магнитотвердых материалов.

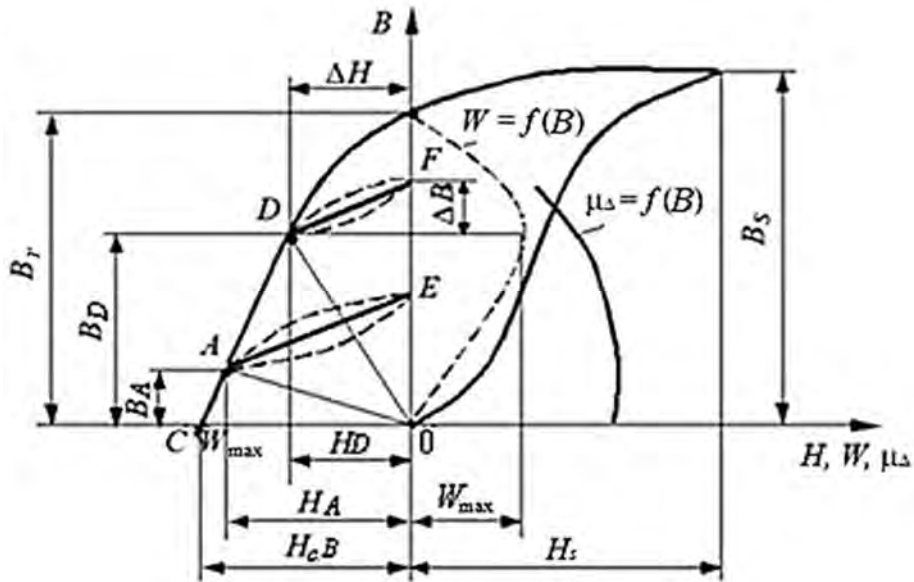


Рис. 1.53. Зависимости, характеризующие свойства магнитотвердых материалов

Магнитные свойства материала после снятия внешнего магнитного поля характеризуются частью петли гистерезиса, расположенной во втором квадранте. Форма магнитной цепи определяет положение рабочей точки A на этой кривой. Соответствующую ей индукцию B_A называют кажущейся остаточной индукцией (остаточная индукция в разомкнутой цепи). Кроме того, свойства магнитотвердого материала характеризуются удельной магнитной энергией $W_A = \frac{B_A H_A}{2}$ (Дж/м³). Как видно из рис. 1.53, точке D соответствует наибольшее значение удельной магнитной энергии. Иногда вместо W_{max} используют пропорциональную ей величину $(BH)_{max}$, которая называется энергетическим произведением.

Максимальная энергия тем больше, чем больше коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r и коэффициент выпуклости кривой размагничивания материала:

$$\gamma = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c}.$$

С течением времени и под влиянием различных факторов положение рабочей точки магнита изменяется. Это изменение происходит по кривым возврата, представляющим собой частные петли гистерезиса, одна из вершин которых лежит на кривой размагничивания. Так как кривые возврата достаточно узкие, то их обычно заменяют прямыми возврата AE , DF (см. рис. 1.53). Ход прямых возврата оценивают коэффициентом возврата

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H},$$

где ΔB – изменение индукции, соответствующее изменению напряженности поля ΔH (см. рис. 1.53).

Чем меньше коэффициент возврата, тем меньше изменение кажущейся остаточной индукции в результате смещения положения рабочей точки. Следовательно, коэффициент возврата определяет в некоторой степени стабильность магнитной цепи.

Что такое старение магнита?

Постоянные магниты могут изменять свои магнитные свойства во времени, т. е. подвержены старению. Это может происходить при воздействии внешних магнитных полей, температуры, механических нагрузок, радиации, из-за влияния соседних ферромагнитных масс, изменений магнитного сопротивления. Старение может быть обратимым и необратимым. Обратимое старение обусловлено перестройкой доменной структуры под влиянием внешних магнитных полей, изменений температуры, вибраций и т. д. Повторное намагничивание приводит к восстановлению (регенерации) первоначальных магнитных свойств.

Необратимое магнитное старение вызывается изменением кристаллической структуры. Для повышения магнитной стабильности магниты подвергают искусственному старению. Их выдерживают при повышенной температуре, частично размагничивают переменным полем. Таким образом, различают магнитную и структурную нестабильность.

Магнитная нестабильность объясняется изменением доменной структуры вещества. Она может быть обратимой и необратимой. Необратимые изменения можно устранить повторным намагничиванием.

Изменение магнитных свойств материала вследствие магнитного старения зависит от формы кривой размагничивания, относительных размеров магнита (т. е. положения рабочей точки характеристики) и таких внешних факторов, как температура, механические напряжения и т. д.

Поясним, как магнитная нестабильность может быть вызвана изменением внешних условий. Проанализируем действие возмущающего поля $\pm H$ на магнит, характеризующийся рабочей точкой A . Ей соответствует кажущаяся магнитная индукция B_A (рис. 1.54). Под действием поля $+H$ изменение магнитного состояния магнита произойдет по прямой возврата AC , кажущаяся магнитная индукция станет B_c . После прекращения действия поля магнитное состояние объекта изменится по прямой CA и индукция придет к исходному значению B_A .

В случае действия на магнит поля напряженностью $-H$ рабочей точкой станет точка F . После устранения внешнего воздействия магнитное состояние объекта, изменяясь по прямой возврата EF , будет определяться точкой F и индукцией B_F , т. е. произошли необратимые изменения.

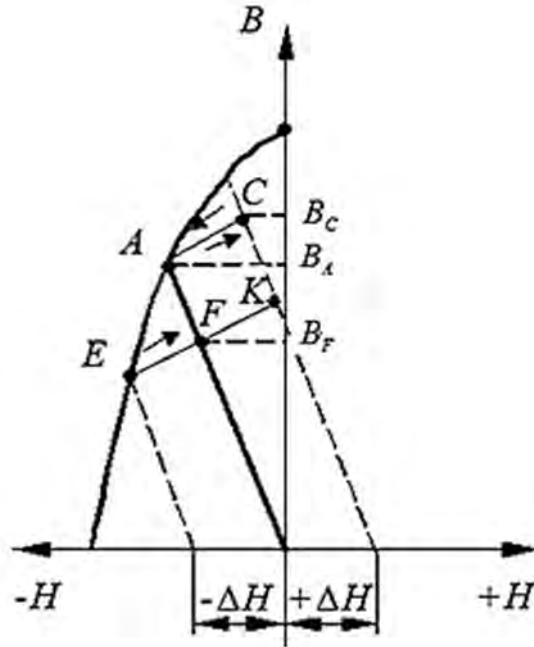


Рис. 1.54. К пояснению устранения магнитной нестабильности постоянного магнита

Одним из основных путей магнитной стабилизации является частичное размагничивание объекта путем воздействия переменного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой. Из рис. 1.54 видно, что при воздействии на объект убывающего переменного магнитного поля с начальной амплитудой $\pm H$ магнитное состояние, определяемое точкой A , изменится, перейдя на прямую возврата EK , и после снятия внешнего поля будет определяться точкой F . Если теперь на магнит будут воздействовать магнитные поля, меньшие $\pm H$, то они вызовут только обратимые изменения. Следует отметить, что такого рода стабилизация вызывает уменьшение индукции от B_A до B_F .

Структурная нестабильность связана с кристаллическим строением, фазовыми превращениями, уменьшением внутренних напряжений и т. д. Изменяющиеся в результате структурной нестабильности (старение) магнитные свойства могут быть восстановлены только регенерацией структуры. С этой целью выполняют, например, повторную термическую обработку металла.

Структурное старение различных материалов протекает по-разному. Искусственное старение *мартенситных сталей* выполняют, например, путем длительного выдерживания магнита при повышенной температуре. Магнит

на 10...15 ч помещают в кипящую воду. Это равносильно естественному старению в течение 10...15 лет.

Магниты из железоникельалюминиевых сталей искусственному старению чаще всего не подвергаются.

Для повышения стабильности магнитов из сплавов Fe–Ni–Al–Co они подвергаются отпуску с последующим медленным охлаждением.

Постоянный магнит имеет U-образную форму. Его полюсы соединили пластиной (якорем) из магнитно-мягкого материала. Докажите, что если увеличить зазор l_0 между пластиной и полюсами магнита, то это приведет к уменьшению магнитной индукции по сравнению с остаточной индукцией B_r в сердечнике, когда воздушный зазор между полюсами и якорем отсутствует.

По закону полного тока имеем (рис. 1.55)

$$H_m l_m + 2H_0 l_0 + H_y l_y = 0, \quad (1.7)$$

где H_m – напряженность поля в сердечнике магнита; H_0 – напряженность поля в воздушном зазоре; H_y – напряженность поля в пластине (якоре); l_m , l_0 , l_y – длины участков магнитной цепи вдоль средней линии «магнит – якорь».

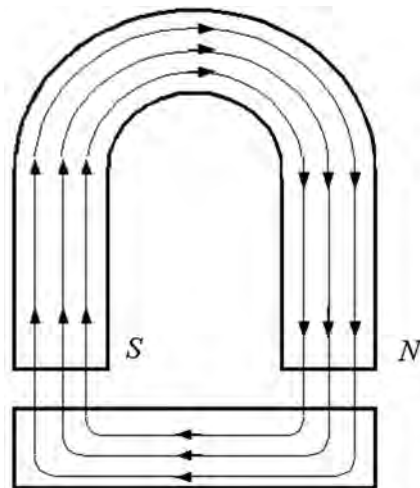


Рис. 1.55. Взаимное расположение постоянного магнита и ферромагнитного якоря

Пусть якорь выполнен из материала с высокой магнитной проницаемостью. Тогда падением магнитного напряжения $H_y l_y$ можно пренебречь. В этом случае

$$H_m l_m + 2H_0 l_0 = 0; \quad (1.8)$$

$$H_m = -H_0 \frac{2l_0}{l_m}. \quad (1.9)$$

Из выражения (1.9) видно, что направление вектора напряженности поля в сердечнике противоположно направлению поля H_0 в зазоре, т. е. противоположно вектору магнитной индукции в сердечнике. Таким образом, воздушный зазор оказывает размагничивающее действие на постоянный магнит.

Выберем произвольную точку A на кривой размагничивания гистерезисного цикла (см. рис. 1.52). Соединим эту точку с началом координат. Обозначим угол между этим лучом и осью ординат через α .

Тангенс этого угла называют коэффициентом размагничивания.

$$N = \operatorname{tg} \alpha = \frac{|H_m|}{B_m}. \quad (1.10)$$

Из (1.9) следует, что

$$|H_m| = H_0 \frac{2l_0}{l_m} = \frac{B_m}{\mu_0} \frac{2l_0}{l_m}. \quad (1.11)$$

Откуда

$$N = \operatorname{tg} \alpha = \frac{|H_m|}{B_m} = \frac{1}{\mu_0} \frac{2l_0}{l_m}. \quad (1.12)$$

Из выражения (1.12) следует, что коэффициент размагничивания тем больше, чем короче магнит и больше зазор l_0 .

По какой формуле определяют силу взаимодействия магнитных полюсов?

Два одноименных полюса отталкиваются, а два разноименных полюса притягиваются друг к другу с силой, которая прямо пропорциональна количеству магнетизма, сосредоточенному в этих полюсах, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = k \frac{Mm}{r^2},$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

Закон Кулона выражается так просто только в том случае, когда полюсы можно считать точечными, т. е. если расстояние между взаимодействующими полюсами велико по сравнению с размерами полюсных областей.

В каких единицах измеряется количество магнетизма (магнитная масса, магнитный заряд)?

Единицей измерения количества магнетизма в СИ является

$$\frac{\text{Дж}}{\text{А}} = \text{В} \cdot \text{с} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{А}}.$$

Можно ли изготовить магнит с двумя одноименными полюсами?

Магнит может иметь несколько полюсов. Например, стержневой или полосовой магнит может иметь четыре полюса, расположенные как $N - SS - N$ (N – северный полюс, S – южный). Кроме того, один или несколько полюсов могут быть сосредоточены, а другие распределены в пространстве, и обнаружить это можно с помощью чувствительных приборов. Один же магнитный полюс (монополь) в природе не существует.

Шар разрезали плоскостями, проходящими через его центр. Полученные объемные фигуры в виде пирамид, основаниями которых являются шаровые сегменты, по отдельности намагнитили так, что на шаровой поверхности оказался один полюс, а на вершине пирамиды – второй. Затем из этих намагниченных фрагментов составили шар. Будет ли в центре такого ферромагнитного шара находиться один полюс магнита, а на поверхности шара – второй?

После составления шара из отдельных объемных секторов, содержащих два полюса, поверхность шара окажется полностью размагниченной, т. к. магнитные полюсы окажутся полностью скомпенсированными.

Почему постоянные магниты рекомендуют хранить, складывая их в пары, разноименными полюсами друг к другу?

Это позволяет более длительно сохранить остаточную намагниченность магнитов, т. к. для строгого выстраивания молекул внутри магнита необходимо создать замкнутую магнитную цепь. Поэтому при хранении магнитов их разноименные полюсы целесообразно еще замкнуть шунтами из магнитомягкого материала.

Имеются два одинаковых стержня. Известно, что один из них – постоянный магнит, а другой изготовлен из магнитного материала. Как определить без вспомогательных средств (нити, магнитных опилок, магнитных измерительных приборов и т. д.), который из них магнит?

Стержни можно расположить перпендикулярно друг к другу в виде буквы *T*. Тогда, если они притягиваются, то магнитом будет тот, который является стойкой перпендикуляра (\perp), в противном случае – основанием. Последнее явление объясняется следующим. Максимум напряженности магнитного поля наблюдается у полюсов магнита. По мере приближения к середине магнита напряженность магнитного поля уменьшается, в самой же середине величина ее равна нулю. Поэтому если основанием перпендикуляра будет магнит, то стержни не притянутся. Если же основанием будет пластина, изготовленная из магнитного материала, то она притянется к полюсу магнита.

Почему стрелка компаса располагается в направлении с севера на юг?

Стрелка компаса является постоянным магнитом. Земля – это огромный магнит. Она также имеет северный и южный магнитные полюсы. Разноименные полюсы этих магнитов притягиваются друг к другу. Поэтому стрелка компаса (и любой подвижно установленный магнит) ориентируется с севера на юг. Магнитная стрелка указывает на магнитный полюс, а не на географический.

Совпадают ли магнитные полюсы Земли с ее географическими полюсами?

Магнитные полюсы Земли не совпадают с географическими полюсами. Южный магнитный полюс Земли расположен в *северном* полушарии, а северный полюс – в *южном* полушарии (рис. 1.56). Поэтому стрелка компаса своим северным полюсом указывает на север, а южным – на юг. Вертикальная плоскость, в которой располагается продольная ось магнитной стрелки, называется плоскостью магнитного меридиана данной точки земной поверхности. Угол между географическим и магнитным меридианом данной местности называется *магнитным склонением*.

Специалисты отмечают, что со времени своего открытия в 1831 г. северный магнитный полюс переместился на 2250 км.

Около 50 лет назад южный магнитный полюс Земли был расположен в *северном* полушарии примерно под 74° северной широты и 100° западной долготы, а северный полюс – в *южном* полушарии под 60° южной широты и 143° восточной долготы.

В настоящее время северный полюс находится на значительном расстоянии от северного географического полюса и мигрирует со скоростью от 10 до рекордных 55 км/год в 2019 г.

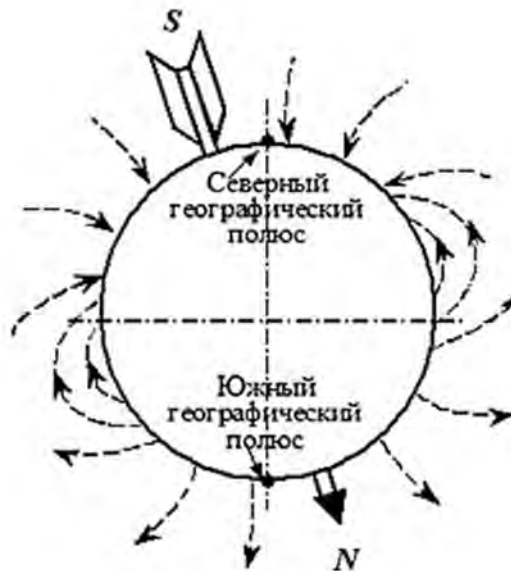


Рис. 1.56. Картина магнитного поля Земли

Напряженность магнитного поля на экваторе Земли составляет около 0,27 А/см, а у полюсов – 0,53 А/см, в наших широтах – около 0,3 А/см.

Если магнитную стрелку прикрепить к пробке, плавающей в сосуде с водой, то под действием магнитного поля Земли стрелка повернется и расположится вдоль магнитного меридиана, однако перемещаться в южном или северном направлении не будет. Если же недалеко от стрелки расположить полюс полосового магнита, то под действием поля магнита стрелка не только повернется в сторону магнита, но и начнет к нему двигаться. Почему?

Магнитное поле Земли на отрезке, равном длине магнитной стрелки, почти однородно (напряженность постоянна по величине и направлению). Однородное поле действует на оба полюса стрелки равными, параллельными и противоположно направленными силами, образующими пару сил. Такое поле, действуя на магнитную стрелку, может создать только вращающие моменты, но не может создать равнодействующей силы, отличной от нуля, т. е. не может вызвать ее поступательного перемещения (рис. 1.57). Вращающий момент пары сил определяется по формуле

$$P = Fl \sin \alpha,$$

где F – силы, действующие на полюсы (в однородном магнитном поле они равны по величине и противоположны по направлению).

Поле постоянного магнита на расстояниях, равных длине стрелки, неоднородно (его напряженность у одного конца стрелки больше, чем у другого).

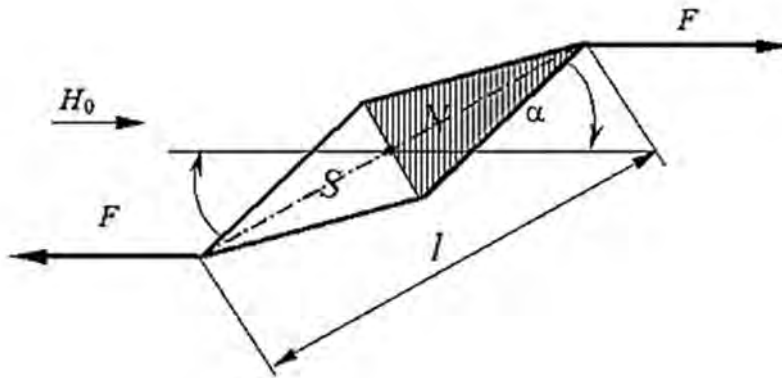


Рис. 1.57. Силы, действующие на магнитную стрелку в однородном магнитном поле: l – длина стрелки; α – угол между направлением стрелки и направлением поля.

Сила, действующая на один полюс стрелки, больше силы, действующей на второй ее полюс. Равнодействующая сил уже не будет равна нулю. Поэтому поле постоянного магнита вызывает не только вращение стрелки, но и ее поступательное движение.

Аналогично можно объяснить скопление магнитного порошка над трещинами при магнитопорошковом контроле и отсутствие перемещения частиц порошка к полюсам намагничивающего устройства.

Полосовой магнит разрезали по нейтральному сечению, получив таким образом два одинаковых магнита. Будет ли сила притяжения одного такого магнита вдвое меньше силы притяжения исходного магнита?

Нет, такой магнит будет притягивать предметы почти с такой же силой. Это обусловлено тем, что количество магнетизма полюса магнита изменилось незначительно, а действием второго его полюса можно пренебречь.

Один из двух одинаковых ферромагнитных шариков поместили в слабое магнитное поле, а второй – в сильное. При этом во втором случае на него действовала меньшая сила, чем в первом. Объясните причину.

Причина в том, что во втором случае магнитное поле более однородное, чем в первом. На шарике, находящемся в магнитном поле, вследствие индукции образуются два противоположных полюса – северный и южный. Если поле однородно, то силы, действующие на полюсы, одинаковые и направлены противоположно. Они способны только повернуть шарик, т. к. равнодействующая этих сил равна нулю. В неоднородном поле эти силы различны. Их равнодействующая уже не будет равна нулю. Парадокс состоит в том, что во втором случае магнитное поле оказалось более однородным, чем в первом.

Вблизи двух полосовых магнитов, которые расположены в одной плоскости и образуют друг с другом угол α , находится ферромагнитный шарик (рис. 1.58). Если бы не было второго магнита, то первый действовал бы на шарик с силой F_1 , а если бы не было первого магнита, то второй действовал бы на шарик с силой F_2 . Будет ли сила F , с которой действуют на шарик оба магнита, равна геометрической сумме сил F_1 и F_2 ?

Нет. Когда шарик находится вблизи двух магнитов, он намагничивается сильнее, чем каждым из магнитов в отдельности. Поэтому сила, действующая на шарик со стороны каждого магнита «в связке», становится больше сил F_1 и F_2 . Следовательно, сила F будет больше геометрической суммы сил F_1 и F_2 (см. рис. 1.58).

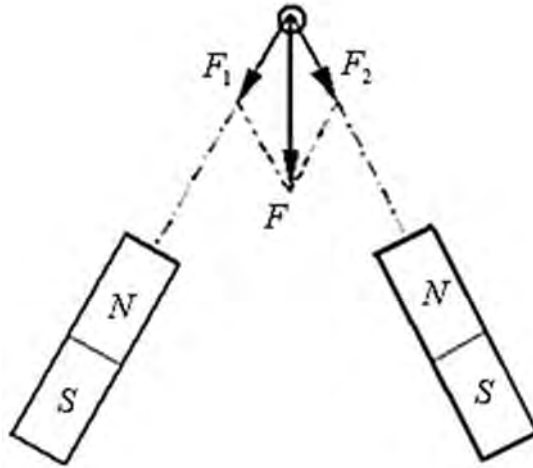


Рис. 1.58. Силы, действующие на ферромагнитный шарик вблизи двух полосовых магнитов

Два одинаковых ферромагнитных стержня расположены на широте Могилева в плоскости магнитного меридиана: один – горизонтально, другой – вертикально. Через некоторое время они намагничиваются под действием поля Земли. Какой из стержней намагнитится сильнее? На каком конце вертикального стержня возникнет северный полюс и на каком южный?

Сильнее намагнитится вертикальный стержень, т. к. вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли на широте Могилева больше, чем горизонтальная. В северном полушарии ближе к нижней части стержня расположен южный магнитный полюс. Он находится недалеко от северного географического полюса. Поэтому на нижнем конце индуцируется северный полюс. Если поднести компас к нижней части стержня, то к стержню повернется южный полюс магнитной стрелки. Из изложенного выше следует, что

окружающие нас ферромагнитные предметы под влиянием поля Земли приобретают остаточную намагниченность.

Как объяснить намагничивание ферромагнитных тел в магнитном поле?

В большинстве веществ магнитные поля, создаваемые атомами, ориентированы хаотически. Поэтому их действие внешне не проявляется. В ферромагнетиках – по-другому. При обычных температурах они состоят из областей спонтанной (самопроизвольной) намагниченности – *доменов*. В каждом домене все атомы расположены так, что создаваемые ими магнитные поля совпадают по направлению. То есть домен является магнитиком. В ненамагниченном ферромагнетике домены расположены хаотически, их поля направлены в разные стороны и суммарный магнитный момент равен нулю. Если же ферромагнетик попадает во внешнее магнитное поле, то домены выстраиваются (более или менее строго в зависимости от напряженности поля) в направлении поля и магнитные поля доменов начинают себя проявлять, например, притягивать железные опилки.

Как используется способность ферромагнитных тел намагничиваться в магнитном поле Земли на производстве?

Способность ферромагнитных объектов намагничиваться в магнитном поле Земли используют на производстве. Установлена зависимость коэрцитивной силы от уровня действующих напряжений и накопления повреждений в металле, определяющих остаточный ресурс действующей конструкции. На основе многочисленных экспериментов выделены режимы надежной эксплуатации объекта, контролируемой эксплуатации и критический режим.

Назовите основные магнитные характеристики постоянных магнитов.

Основными магнитными характеристиками постоянных магнитов являются остаточная магнитная индукция B_r , коэрцитивная сила по намагниченности H_{cM} , коэрцитивная сила по индукции H_{cB} , энергетическое произведение BH , Дж/м³.

Как осуществляют намагничивание и размагничивание постоянных магнитов?

Намагничивание ферромагнетика, выполненного из магнитотвердого материала, с целью получения постоянного магнита осуществляют до его насыщения. Считают, что в этом случае должно выполняться условие $H_{\max} \geq 5 H_c$, где H_{\max} – максимальная величина намагничивающего поля,

H_c – коэрцитивная сила материала магнита. При этом чаще всего, если это возможно, будущий магнит зажимают между полюсами электромагнита постоянного тока. Если материал является магнитно-анизотропным, то поле должно действовать в направлении текстуры. Минимальную продолжительность импульса Δt определяют по следующей приближенной формуле:

$$\Delta t = \sigma \frac{B}{H} D^2 \cdot 10^{-9} \text{ с},$$

где B – индукция в магните, Тл; H – напряженность намагничивающего поля, кА/м; D – эффективный диаметр магнита, м; σ – удельная электрическая проводимость, См/м.

Для обработки заготовки, предназначенной для изготовления магнита, удобства транспортировки, сборки систем перед повторным намагничиванием магниты полностью размагничивают. Обычно размагничивание осуществляют, воздействуя на магнит низкочастотным переменным магнитным полем с убывающей до нуля амплитудой.

1.8.6. Электромагниты

Как устроены электромагниты?

Электромагнит представляет собой ферромагнитный сердечник из магнитно-мягкого материала, на который нанесена электрическая обмотка. В качестве материала сердечника с учетом требований технического, технологического и экономического характера обычно используют низкоуглеродистые стали – сталь Ст 3, сталь 10, сталь 20, сталь Армко и др.

Форма сердечника может быть разная: в виде параллелепипеда, П-образная, Ш-образная и т. д. Как правило, обмоточный провод должен быть хорошо изолирован от сердечника. Он может быть нанесен на лакоткань или жесткий диэлектрический каркас.

С какой целью в электромагнитах применяют ферромагнитные сердечники?

Магнитное поле катушки с ферромагнитным сердечником значительно сильнее, чем поле катушки без сердечника, т. е. ферромагнетик внутри катушки сильно намагничивается и поле его складывается с полем катушки ($B = \mu_0 H + \mu_0 M$). Приведенная формула определяет величину магнитной индукции в сердечнике электромагнита. Однако, как следует из приведенной выше формулы, применение ферромагнитных сердечников в электромагнитах для усиления поля полезно только до известного предела. После достижения

намагниченности насыщения $M = M_s$ (все домены сориентировались вдоль поля) второе слагаемое этой формулы стало постоянным и индукция возрастает только за счет роста первого слагаемого. Поле, создаваемое обмоткой, может оказаться много больше поля насыщенного ферромагнитного сердечника, так что сердечник становится почти бесполезным и лишь усложняет конструкцию электромагнита. Поэтому самые мощные электромагниты изготавливают без сердечников. Такие электромагниты имеют огромные размеры и для магнитной дефектоскопии не применяются.

По какой формуле рассчитывается отрывная сила электромагнита или постоянного магнита?

Отрывную силу рассчитывают по формуле

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S,$$

где B – величина магнитной индукции в магнитном полюсе, контактирующем с деталью; μ_0 – магнитная постоянная; S – сечение полюса.

Определите отрывную силу электромагнита, у которого сечение внутреннего полюса S_1 , м², магнитная индукция в нем B_1 , Тл, а сечение внешнего цилиндрического кольцевого полюса S_2 , м².

Магнитная индукция во внешнем полюсе $B_2 = B_1 \frac{S_1}{S_2}$, отрывная сила

$$F = F_1 + F_2 = \frac{B_1^2}{2\mu_0} S_1 + \frac{B_2^2}{2\mu_0} S_2 = \frac{B_1^2}{2\mu_0} S_1 \left(1 + \frac{S_1}{S_2} \right) = F_1 \left(1 + \frac{S_1}{S_2} \right).$$

Сердечник электромагнита состоит из двух полюсов и перемычки, выполненных из магнитно-мягкого материала. На полюсах находятся одинаковые электрические катушки, по которым течет постоянный ток. Однако электромагнит не притягивает ферромагнитный стержень, касающийся обоих полюсов. Один же полюс магнита притягивает железные тела. В чем причина?

Катушки расположены таким образом, что протекающий по ним ток создает магнитные потоки такого направления, что на концах полюсов электромагнита образуются одинаковые магнитные полюсы. Если железные тела касаются только одного полюса, то большая часть магнитного потока замыкается через

объект. Однако сила притяжения такого электромагнита будет невелика вследствие большого магнитного сопротивления такой магнитной цепи.

Исправить такой электромагнит можно, повернув одну катушку к переключке другим концом. В этом случае направления магнитных потоков, создаваемых катушками, будут одинаковыми.

Можно ли электромагнитным краном переносить раскаленные ферромагнитные объекты?

Нет, потому что с увеличением температуры и приближением ее к точке Кюри магнитная проницаемость ферромагнетика уменьшается. Поэтому раскаленный объект слабо намагничивается и слабо притягивается электромагнитом.

Как изготовить сильный электромагнит, если поставлено условие, чтобы ток в его обмотке был сравнительно слабым?

Обмотку электромагнита нужно нанести тонким электрическим проводом с большим числом витков. В этом случае можно достичь высокого значения намагничивающей силы обмотки Iw при малом токе в обмотке, т. к. электрическое сопротивление обмотки будет значительным, а ток в ней при таком сопротивлении небольшим.

Два электромагнита с П-образными сердечниками отличаются только тем, что имеют разные полюсные наконечники (башмаки): первый сужающийся, а второй – расширяющийся. Какой из электромагнитов имеет большую подъемную силу?

Большую подъемную силу имеет второй электромагнит. Объясняется это следующим. Принцип действия электромагнитов основан на свойствах магнитной цепи. Из закона полного тока следует, что магнитное напряжение цепи «электромагнит – поднимаемый груз» определяется по формуле $U_m = Iw = \Phi(R_m + R_\sigma + R_3 + R_2)$, где I – ток в обмотках; w – число витков обмоточного провода; Φ – магнитный поток; R_m, R_σ, R_3, R_2 – магнитные сопротивления магнитопровода электромагнита, башмака, воздушных зазоров между полюсами и ферромагнитным грузом и груза соответственно.

Откуда

$$\Phi = \frac{Iw}{R_m + R_\sigma + R_3 + R_2}.$$

С уменьшением сечения полюсного наконечника общее магнитное сопротивление возрастает, а магнитный поток убывает. Следовательно, уменьшается и магнитная индукция под полюсом электромагнита.

Таким образом, подъемная сила электромагнита с сужающимися полюсными наконечниками, которая определяется по формуле

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S,$$

будет меньше за счет уменьшения магнитной индукции и площади соприкосновения полюсного наконечника с ферромагнитным грузом.

Медицинский прибор для извлечения неферромагнитных металлических опилок из глаза содержит электрическую катушку с заостренным сердечником и источник питания. Как должен изменяться ток, питающий катушку, чтобы прибор отвечал своему назначению?

Сила, действующая на неферромагнитные металлические опилки, возникает вследствие появления в них индукционных токов при изменении магнитного поля возле острия сердечника катушки. При нарастании тока в катушке опилки в соответствии с правилом Ленца будут выталкиваться из поля, а при убывании тока – притягиваться к сердечнику. Поэтому ток должен медленно возрастать, а затем быстро спадать до нуля.

Катушка электромагнита подключена к источнику постоянного тока. Почему при включении тока его максимальная величина устанавливается не сразу?

В катушке электромагнита вследствие большой индуктивности в момент включения тока в цепи возникает электродвижущая сила индукции, которая препятствует мгновенному установлению максимальной величины тока в цепи.

2. ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Классификация дефектов в сталях. Дефекты сварки, литья, механической обработки, пластической деформации металла, химико-термической обработки.

2.1. Классификация дефектов в сталях

Что такое дефект?

Под дефектом понимают каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией.

Дефектом может быть нарушение сплошности материала выше допустимых пределов, занижение толщины защитного покрытия, глубины цементированного слоя, глубины закаленного слоя деталей, закаливаемых токами высокой частоты, повышенная шероховатость поверхности, несоответствие линейных размеров деталей параметрам, указанным в чертежах и т. д.

По каким признакам классифицируют дефекты?

Дефекты классифицируют по следующим признакам:

- по степени влияния дефектов на работоспособность изделий;
- по использованию правил, методов и средств контроля;
- по геометрическим признакам и массовости;
- по природе возникновения;
- в зависимости от этапа возникновения.

Как классифицируют дефекты по природе возникновения?

По природе возникновения различают такие дефекты, как трещины, непровары, подрезы, поры, металлические и неметаллические включения и т. д.

Как классифицируют дефекты по степени их влияния на работоспособность изделия?

По степени влияния на работоспособность изделия дефекты подразделяют на:

- *критические* (использование продукции по назначению с такими дефектами почти невозможно или недопустимо);
- *значительные* (значительно снижающие долговечность продукции);
- *малозначительные* (существенно не влияющие на использование продукции по назначению и на ее долговечность).

Как классифицируют дефекты по использованию правил, методов и средств контроля?

По использованию правил, методов и средств контроля различают:

- *явные* дефекты, для выявления которых в нормативной документации предусмотрены соответствующие правила, методы и средства;
- *скрытые* дефекты, их выявление не предусмотрено нормативной документацией. Например, сварные швы лонжеронов скрепера, согласно ТУ, контролируют визуально-измерительным методом. При этом в сварном соединении могут находиться внутренние дефекты сплошности, обнаружение которых не предусмотрено.

Как подразделяют дефекты по геометрическим признакам и массовости?

По геометрическим признакам и массовости различают следующие типы дефектов:

- *по характеру залегания*: внутренние, наружные (поверхностные и *подповерхностные*), сквозные;
- *по расположению*: компактные и протяженные;
- *по форме*: плоские и объемные;
- *по остроте*: острые (с надрезом) и округлые;
- *по величине*: мелкие, средние и крупные;
- *по массовости*: единичные, групповые и распространенные.

Как подразделяют дефекты в зависимости от этапа их возникновения?

По этому признаку дефекты можно разделить на:

- *конструктивные*, обусловленные несовершенством конструкторской документации (например, неверно указали габаритный размер детали, место приварки патрубка);
- *производственно-технологические*, связанные с отклонением в технологическом процессе;
- *эксплуатационные*, образовавшиеся в процессе эксплуатации объекта;
- *аварийные*, появившиеся из-за резких отклонений в режиме эксплуатации изделия.

2.2. Дефекты сварки, литья, механической обработки, пластической деформации металла, химико-термической обработки

Какие могут быть дефекты формы сварных швов?

Дефекты формы сварных швов – это несоответствие параметров конструктивных элементов сварных швов значениям, указанным в чертежах на изделие. Сварные швы могут иметь неодинаковые ширину и высоту по длине, бугристость, седловины и т. д. Такие дефекты могут быть вызваны неправильной подготовкой кромок свариваемых деталей, неправильной сборкой под сварку, а также нарушениями технологии сварки.

Приведите примеры наружных дефектов сварных соединений. Какие причины их возникновения?

К наружным дефектам сварных соединений относят наплывы, подрезы, незаваренные кратеры, прожоги, ожоги.

Подрезы – это углубления в основном металле. Такие дефекты расположены вдоль границ шва. Они образуются, когда сварка происходит при повышенной тепловой мощности источника тепла (например, при повышенном токе), вследствие низкой квалификации сварщика и т. д. Подрезы вызывают концентрацию напряжений и уменьшают рабочее сечение шва. Они являются недопустимыми дефектами. Неблагоприятное влияние подрезов особенно усиливается, если изделие испытывает динамические нагрузки.

Прожоги – сквозные проплавления свариваемых деталей. Такие дефекты могут образоваться вследствие чрезмерных зазоров между свариваемыми деталями, завышенной тепловой мощности электрической дуги, низкой скорости сварки, неплотного прилегания флюсовой подушки или металлической подкладки.

Наплывы и натеки – это расплавленный металл, наплывший или натекавший на непрогретый основной металл, вследствие чего не произошло сплавление с ним. Причины образования наплывов – смещение электрода на одну из свариваемых кромок, неправильно выбранный режим сварки, большая скорость плавления электрода и т. д.

Кратер – это углубление, образующееся в конце шва при внезапном прекращении сварки. При ручной дуговой сварке диаметр кратера может составлять от 3 до 20 мм, при автоматической – кратер имеет удлиненную форму в виде канавки.

Ожоги – небольшие участки подвергнувшегося расплавлению металла электрода или электрододержателя на основном металле вне шва. Они возникают при выводе кратера за пределы шва, при случайном касании

держателем основного металла, при освобождении конца электрода от обмазки. Такие дефекты являются концентраторами напряжений, металл в месте ожога имеет пониженную пластичность. Поэтому дефектное место зачищают.

Если дефект проходит сквозь наплавленный или основной металл, то он называется сквозным. Такими дефектами могут быть свищи, прожоги, трещины и др. Сквозные дефекты приводят к потере прочности и герметичности сварного соединения.

Назовите внутренние дефекты сварных соединений и основные причины их образования.

Основными внутренними дефектами сварных соединений являются *газовые поры, шлаковые и другие включения, непровары, трещины*. *Поры* – это полости сферической, цилиндрической формы или полости в форме усеченного конуса, заполненные газами. Они возникают вследствие образования газа в металле сварочной ванны и большой скорости затвердевания расплавленного металла. *Причины* – резкое уменьшение растворимости газов в расплавленном металле при снижении температуры сварочной ванны в процессе кристаллизации металла. Поэтому газы не успевают выйти из металла сварного шва и образуют внутренние поры или выходящие на поверхность шва свищи. *Факторы, способствующие образованию пор*: загрязнение кромок изделия, наличие ржавчины на поверхности сварочной проволоки, попадание влаги во флюс, наличие вредных примесей и влаги в защитных газах, плохая защита зоны сварочной дуги от окружающей среды. Этому способствуют высокая скорость сварки, приводящая к нерациональным размерам сварочной ванны, насыщение металла сварочной ванны водородом в результате нарушения технологии сварки и т. д. Поры уменьшают рабочее сечение шва. Более опасны поры, выходящие на поверхность, т. к. создают в швах концентрацию напряжений. Поры снижают прочность и плотность сварных соединений, но при малом количестве часто являются допустимыми дефектами и почти не снижают работоспособности сварных соединений.

В *шлаковых и других включениях* полости заполнены шлаками, окислами, частицами вольфрама. *Основные причины образования шлаковых включений* – слишком большая скорость охлаждения металла шва, плохая очистка поверхности металла от шлака при многослойной сварке, загрязненность свариваемых кромок. Шлаковые включения могут быть сферической, игольчатой, плоской формы. Влияние шлаковых включений на работоспособность сварных соединений более сильное, чем пор. Шлаковые включения могут стать очагом образования самых опасных дефектов – трещин.

Металлические (вольфрамовые) включения образуются при аргоно-дуговой сварке, как правило, в местах обрыва сварочной дуги и располагаются внутри

металла шва. На наружной поверхности частицы вольфрама могут находиться в виде брызг.

Еще большее влияние на работоспособность сварных соединений, чем *шлаковые включения*, оказывают *окисные включения*. Они могут возникнуть из-за плохой очистки кромок и недостаточной защиты сварочной ванны от воздействия окружающей среды.

Непровары – это несплошности на границах между основным и наплавленным металлом, а также незаполненные металлом полости в сечении шва. Они образуются при недостаточной тепловой мощности сварочной дуги, т. е. занижении сварочного тока, завышенной скорости сварки, неправильной разделке свариваемых кромок, плохой зачистке свариваемых кромок от грязи, ржавчины, масел, при низкой квалификации сварщика и т. д. Непровар является одним из опасных дефектов сварки. Он ослабляет рабочее сечение сварного шва, снижая его работоспособность. Особенно сильно он ухудшает работоспособность конструкции при воздействии вибрационных нагрузок.

Несплавления (склейки, слипания) – это несплошности, имеющие очень малую ширину, а потому являющиеся сильными концентраторами напряжений. Несплавления весьма трудно выявляются современными методами дефектоскопии.

Трещины – это частичное местное разрушение сварного соединения в виде разрыва. Они могут быть микроскопическими (протяженностью в несколько микрометров) и макроскопическими (обнаруживаемые с помощью оптических средств с небольшим увеличением и даже невооруженным глазом). В зависимости от происхождения трещины могут быть горячими и холодными. **Горячие трещины** образуются при сварке в процессе затвердевания расплавленного металла. *Причины образования* – резкое снижение пластических свойств металла, находящегося в твердо-жидком состоянии в этом интервале температур, и действие на него растягивающих напряжений, возникающих в процессе кристаллизации. *Факторы, способствующие образованию горячих трещин*: неудовлетворительная защита зоны горения дуги от окружающей атмосферы, нерациональная форма сварочной ванны, повышенное содержание в металле шва вредных примесей, завышение значения сварочного тока, нерациональное расположение сварных швов в изделии, чрезмерно жесткое закрепление изделия в процессе сварки, повышенное содержание углерода в сварочной ванне.

Холодные трещины возникают в результате образования хрупких закалочных структур и действия в зоне соединения напряжений, вызванных изменением объема структурных составляющих и превращением водорода из атомарного в молекулярный, т. е. протекания фазовых превращений, которые приводят к снижению прочностных свойств металла и действия сварочных напряжений. Они могут образовываться как на этапе завершения охлаждения,

так и во время вылеживания сварных конструкций в течение некоторого времени после завершения сварки. Трещины могут возникнуть в процессе эксплуатации изделия вследствие раскрытия сварочных микротрещин. Они могут развиваться под действием концентраторов напряжений в местах непроваров, шлаковых включений и прочих дефектов. *Факторы, способствующие образованию холодных трещин*, – загрязнение свариваемых кромок, наличие ржавчины на поверхности сварочной проволоки. Этому способствует, помимо прочего, повышенное содержание влаги в сварочных материалах, завышенное значение сварочного тока, нерациональное расположение сварных швов. Способствовать их образованию могут чрезмерно жесткое закрепление изделия в процессе сварки, завышенное содержание углерода в сварочной проволоке, неоднородность химического состава основного металла и металла шва. Образованию холодных трещин способствуют быстрое охлаждение металла шва после сварки, насыщение сварочной ванны водородом в результате нарушения технологии сварки.

Макротрещины – наиболее опасные несплошности, поэтому по действующим нормативно-техническим документам они являются недопустимыми дефектами любого объекта и подлежат исправлению.

Микроскопические и субмикроскопические трещины по степени их влияния на работоспособность изделия, как правило, считаются допустимыми дефектами.

Как влияют дефекты на работоспособность сварных соединений?

При *вибрационной нагрузке* уменьшение прочности сварных соединений изделий из низкоуглеродистых сталей из-за наличия *незаваренных кратеров* достигает 25 %, а сварных соединений объектов из низколегированных сталей – 50 %.

При *статической нагрузке* и пластичном металле снижение прочности сварного соединения примерно пропорционально относительной величине *непровара*. Если же металл малопластичный, то *при динамической нагрузке* даже небольшие дефекты этого вида могут существенно снизить прочность.

Поры и шлаковые включения мало влияют на *статическую прочность* соединений, когда их относительная суммарная площадь составляет не более 5...10 % сечения шва.

Значительно снижают прочностные характеристики сварных соединений *остаточные напряжения* при воздействии на объекты *переменных нагрузок*.

Назовите основные дефекты литья.

Основными дефектами литья являются *усадочные раковины*, *неметаллические включения*, *неслитины*, *ликвации*, *газовые поры*, *горячие и холодные трещины*, *рыхлоты*, *флокены* и др.

Усадочные раковины – это пустоты, образующиеся вследствие нарушения процесса усадки металла в отливках. Они могут образоваться, например, в случае неравномерного охлаждения отливки при недостаточном ее питании в процессе кристаллизации. Усадочные раковины обычно образуются в верхней части отливки, которую удаляют.

Неметаллические (шлаковые) включения могут возникнуть из-за нарушения технологии плавки (залитка беспокойным металлом, неудовлетворительная очистка форм).

Неслитины – это тонкие прослойки окислов между зернами металла. Они могут образоваться, например, из-за нарушения режима разливки: прерывистой струи металла при его заливке в форму, при встрече струй недостаточно нагретого металла.

Ликвация – это неоднородность химического состава сплава в различных зонах слитка. В местах ликвации прочность металла занижена. Это приводит иногда к разрушению металла.

Газовые раковины возникают в процессе кристаллизации металла отливки. Причины – плохая газопроницаемость формовочной земли, высокая температура заливки металла в форму и т. д.

Горячие трещины – это обычно хорошо видимые разрывы поверхности отливки, распространяющиеся по границам кристаллов и имеющие неровную окисленную поверхность, на которой при увеличении видны дендриты. Они появляются в отливках при затруднении кристаллизации металла в процессе его охлаждения, в случае нерациональной конструкции отливок и при неравномерном охлаждении отливки в местах перехода от больших к малым сечениям (под влиянием термических и усадочных напряжений). Трещины образуются в процессе кристаллизации металла вследствие действия растягивающих напряжений, превышающих прочность наружных слоев слитка. Горячие трещины представляют собой извилистые окисленные разрывы металла. Характерными признаками горячих трещин являются их неровные (рваные) края и значительная ширина.

Холодные трещины – это очень тонкие разрывы поверхности отливки, имеющие обычно чистую, светлую или с цветами побежалости зернистую поверхность. Они образуются из-за внутренних напряжений или механического воздействия и возникают в слитке после его затвердевания. Разрушение отливки может произойти при относительно низкой температуре. Образуются транскристаллические холодные трещины со светлыми неокисленными поверхностями. В отличие от горячих трещин холодные распространяются по зернам, а не по их границам, преимущественно в местах концентрации напряжений.

Плены – это пленки на поверхности или внутри отливки, состоящие из окислов. Иногда они имеют включения формовочного материала. Плены

возникают в результате химического взаимодействия составляющих расплавленного металла с атмосферой и материалом формы. Продукты реакции при этом образуют на поверхности тугоплавкую и плотную пленку.

Рыхлоты (скопление усадочных пор) – это дефекты, образующиеся в результате уменьшения объема металла при его затвердевании. Они представляют собой несплошности металла неопределенных очертаний. Рыхлоты чаще всего бывают при крупнозернистой структуре металла.

Флокены представляют собой тонкие разрывы металла округлой или овальной формы. Они располагаются в средней зоне слитков, у поверхности поковок и прутков. Обычно флокены появляются при повышенном содержании в сталях водорода, который при охлаждении жидкого металла и фазовых превращениях стремится выделиться из-за уменьшения растворимости.

Пузыри представляют собой округлые, овальные или продолговатые полости в металле. В зависимости от расположения в слитке различают внутренние, подкорковые (имеющие вид тонких извилистых каналов) и поверхностные пузыри.

Пригар – это неравномерные утолщения из формовочной или стержневой смеси. Обычно они располагаются в местах соприкосновения смеси с наиболее горячими участками литейной формы.

Дефектом является и *несоответствие материала отливки заданному химическому составу*. Это может произойти вследствие ошибок при расчете шихты, нарушении технологии плавки, вследствие чего изменяются свойства сплава.

К дефектам литья относятся и отклонения геометрических размеров отливки от заданных в чертежах.

Назовите дефекты механической обработки.

Основные дефекты механической обработки – прижоги, шлифовочные и отделочные трещины, надирь, риски, надрезы, забоины и др.

Прижоги – это дефекты, образующиеся при локальном перегреве металла. Наличие прижогов устанавливается при металлографическом анализе по белым, нетравящимся участкам на поверхности шлифа.

Трещины отделочные представляют собой тончайшие разрывы поверхностного слоя металла. Такие дефекты наиболее характерны для металла повышенной твердости.

Шлифовочные трещины – это зоны небольшой площади с сеткой трещин или в виде отдельных линий на поверхности изделия. Эти дефекты появляются вследствие сильного нагрева и последующего охлаждения поверхностного слоя металла, обладающего малой теплопроводностью, высокой твердостью и хрупкостью при механической обработке. Такие дефекты имеют глубину от 0,01 до 2 мм.

Следует отметить, что дефекты металла, допустимые для одних условий работы, могут быть недопустимы для других. Например, *риски* от резца допустимы для статически нагруженной детали и недопустимы для деталей, подверженных циклическим нагрузкам.

Назовите основные дефекты, возникающие в процессе пластической деформации металла.

Основные дефекты, появляющиеся при пластической деформации, – это волосовины, флокены, расслоения, заковы, закаты, зажимы и др.

Волосовины – это нарушения сплошности в виде тонких вытянутых вдоль направления деформаций закатов с прослойкой включений. В деформированном металле газовые пузыри и загрязнения вытягиваются вдоль направления деформации и образуют нитевидные дефекты. Они имеют сплошной или прерывистый вид длиной от 1 до 100 мм и более.

Заковы – нарушения сплошности и формы металла в виде расслоений и складок. *Заковы* представляют собой нарушение сплошности на поверхности заготовки, проникающее на большую глубину. На поверхности металла образуются расплюснутые складки. *Заковы* начинаются с поверхности кованных элементов и распространяются на глубину до 5 мм. Площадь заковов составляет от нескольких до десятков квадратных миллиметров, они располагаются преимущественно на больших плоскостях. Причиной образования заковов является неправильный режимковки.

Закаты являются нарушением сплошности и формы металла в виде расслоений и складок. Они возникают в результате загиба и развальцовки кромки, образующейся при переполнении предыдущего калибра (дефект калибровки или неправильного поступления прутка во время прокатки). Другой причиной образования закатов является локальное разрушение прокатных заготовок в местах расположения раковин.

Зажим – это заштампованная складка, появляющаяся в результате неправильного заполнения фигуры штампа металлом.

Плены прокатанного металла представляют собой сравнительно тонкие плоские отслоения на его поверхности. Чаще всего плены имеют вид «языка», у которого уширенный и утолщенный конец составляет одно целое с основным металлом. Размеры плен бывают разные: от мелких и едва заметных чешуек до 100 мм и более в толстых листах. Толщина плен колеблется от десятых долей миллиметра до 3...5 мм и более. Причинами плен может быть неудовлетворительное качество металла слитков (пузырчатость и плохая раскисленность металла), а также нарушение режимов прокатки (неправильная насечка валков, неудовлетворительная калибровка).

Трещины. Они могут быть одиночными и групповыми, разноориентированными и вытянутыми в одном направлении. В зависимости размеров

проката, причин и условий возникновения их глубина может достигать 10...15 мм, а длина – нескольких метров.

Рванины представляют собой разрывы или надрывы металла разнообразного очертания с рваными краями. Они чаще всего располагаются по кромкам листов. Как правило, рванины возникают в листах проката из высоколегированных сталей с крупнозернистой структурой.

Внутренние разрывы – это сравнительно крупные нарушения сплошности внутренней части заготовки, периодически повторяющиеся по длине. Они наблюдаются при прокатке высоколегированных сталей. Разрывы возникают под действием растягивающих сил вследствие неодинаковой деформации наружных и внутренних слоев прокатываемого металла, имеющего малую пластичность. Те разрывы, которые образуются на начальной стадии прокатки в результате дальнейшей деформации могут вызвать расслоения металла.

Какие дефекты возникают в процессе термической и химико-термической обработки?

Основные дефекты термической и химико-термической обработки деталей возникают из-за несоблюдения режимов: скорости нагрева и охлаждения детали, температуры, времени выдержки. Такими дефектами могут быть термические и водородные трещины, обезуглероживание и науглероживание металла.

Термические трещины – это различные по величине и ориентации несплошности, появляющиеся при резком нагреве и охлаждении (закалочные трещины), когда вследствие перепада температур по сечению объекта, а также структурных напряжений в металле возникают термические напряжения.

Водородные трещины – микротрещины на поверхности детали, возникающие вследствие насыщения поверхностного слоя водородом под действием кислот, щелочей при травлении и электрохимической обработке.

Обезуглероживание и науглероживание – это изменение химического состава и структуры металла при его нагревании. Они приводят к охрупчиванию поверхностных слоев металла и образованию трещин.

3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ

Классификация методов и средств магнитного контроля. Первичные магнитные преобразователи и индикаторы магнитных полей. Виды, способы и схемы намагничивания объектов. Способы размагничивания объектов. Демагнетизаторы. Контроль размагниченности. Образование поля рассеяния дефекта при намагничивании объекта контроля.

3.1. Классификация методов и средств магнитного контроля

Что такое магнитный неразрушающий контроль?

Согласно ГОСТ 24450–80, магнитный неразрушающий контроль – это неразрушающий контроль, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля.

По каким признакам производят классификацию методов неразрушающего контроля?

Классификацию методов неразрушающего контроля производят:

- по характеру взаимодействия физических полей с объектом контроля;
- по первичному информативному параметру физического поля;
- по способу получения первичной информации.

Как классифицируют методы магнитного контроля?

Методы магнитного контроля классифицируют следующим образом. *По характеру взаимодействия физических полей с объектом контроля:* магнитный; *по первичному информативному параметру физического поля:* коэрцитивной силы, намагниченности, остаточной индукции, магнитной проницаемости, напряженности, эффекта Баркгаузена; *по способу получения первичной информации:* магнитопорошковый, индукционный, феррозондовый, магнитографический, магниторезистивный, пондеромоторный, эффекта Холла.

Как классифицируют средства неразрушающего контроля?

Средства неразрушающего контроля классифицируют по техническому исполнению и по видам контролируемых параметров.

По техническому исполнению средства неразрушающего контроля (НК) подразделяются на три основных класса: автономные, комплексные системы и автоматические линии, комплексные системы для активного контроля. *Автономные* средства предназначены для контроля одного параметра объекта. *Комплексные системы и автоматические линии* используют для определения

нескольких параметров объекта. Для управления технологическим процессом по результатам контроля применяют *комплексные системы активного НК*.

По видам контролируемых параметров средства неразрушающего контроля подразделяются на:

- дефектоскопы – устройства, предназначенные для определения целостности объекта контроля;
- приборы для контроля размеров;
- приборы для контроля физико-химических и физико-механических параметров;
- приборы технической диагностики (для предсказания отклонения качества объекта контроля от установленного уровня).

3.2. Первичные магнитные преобразователи и индикаторы магнитных полей

Что такое индикатор?

Индикатор – это прибор или вещество, с помощью которого определяется наличие какой-либо величины (например, магнитного поля) в определенном диапазоне значений. Таким образом, индикатор только устанавливает наличие величины, но не характеризует величину количественно.

Дайте определение понятия измерительного преобразователя. Что такое магнитный преобразователь?

Измерительный преобразователь – это средство измерения, предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. В частности, *магнитные преобразователи* – это устройства для преобразования магнитных величин (индукция, поток) в эквивалентный сигнал другой физической природы – электрической, механической, световой. Измерительный преобразователь имеет вход, на который подается преобразуемая величина X (входная величина). Выходная величина преобразователя Y (преобразованная величина) связана с входной зависимостью $Y = f(X)$, которая называется функцией преобразования. Функция преобразования качественно отражает связь между выходной и входной величинами измерительного преобразователя. Для отражения количественной связи между ними вводят градуировочную характеристику – зависимость между значениями величин на входе и выходе, составленную в виде таблицы, графика, формулы.

На каком законе основан принцип действия индукционного преобразователя?

Принцип действия индукционного преобразователя основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому в катушке, помещенной в изменяющееся магнитное поле, наводится ЭДС, величина которой зависит от напряженности магнитного поля и скорости его изменения. Если магнитное поле переменное, то скорость его изменения задается источником поля. При постоянном магнитном поле его изменение в пространстве, занимаемом преобразователем, осуществляется вращением или перемещением последнего.

Как устроен индукционный преобразователь?

Индукционный преобразователь представляет собой каркас из изолирующего материала, на котором размещена электрическая обмотка. Для увеличения чувствительности в преобразователях применяют ферромагнитные сердечники, однако в этом случае амплитудная характеристика преобразователя в области больших напряженностей полей становится нелинейной.

Какие преобразователи называются полемерами, а какие градиентометрами?

Преобразователи, реагирующие на величину напряженности поля, называются полемерами, а на его градиент – градиентометрами. ЭДС, наводимую в индукционном преобразователе-полемере гармоническим полем $H_{mx} \sin \omega t$, определяют по формуле $\mu_0 \omega W S H_{mx} \cos \omega t = E_m \cos \omega t$, где μ_0 – магнитная постоянная; ω – частота поля; W – число витков преобразователя; S – сечение преобразователя в направлении, нормальном оси x ; H_{mx} – амплитудное значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля; WS – постоянная преобразователя.

Выражение $K_{un} = \mu_0 \omega W S$ определяет чувствительность индукционного преобразователя-полемера.

ЭДС на выходе преобразователя-градиентометра зависит от разности средних напряженностей поля H_{m1} и H_{m2} в катушках: $\Delta E_m \Delta E_m = K_{un} (H_{m1} - H_{m2})$.

Какие преобразователи называются пассивными, а какие активными?

Неподвижные измерительные преобразователи называются пассивными, а подвижные – активными. Пассивные преобразователи применяют для измерения переменных полей, активные – постоянных. Примерами активных индукционных преобразователей являются сканирующие, вращающиеся, вибрирующие преобразователи.

Что собой представляют сканирующие индукционные преобразователи?

Сканирующие индукционные преобразователи перемещаются со скоростью V относительно объекта контроля. Выходной величиной сканирующего индукционного преобразователя является мгновенное значение ЭДС измерительной обмотки:

$$e(t) = \mu_0 w S V_x \left(\frac{dH_x}{dx} \right),$$

где μ_0 – магнитная постоянная; w – число витков обмотки; S – сечение индукционной катушки в плоскости, перпендикулярной оси катушки; H_x – x -составляющая напряженности магнитного поля.

Чтобы получить на выходе сигнал, пропорциональный напряженности приложенного поля, используют интегрирующее устройство (баллистический гальванометр). Итак, сканирующий индукционный преобразователь вместе с интегратором является полемером, а без него – градиентометром.

Как устроены измерительные приборы с вращающимися индукционными преобразователями?

Прибор содержит, например, закрепленный на длинном валу индукционный преобразователь, который вращается двигателем. Катушка преобразователя устанавливается так, чтобы магнитные силовые линии поля были перпендикулярны оси ее вращения. При этом в катушке индуцируется переменная ЭДС $E = \mu_0 \omega W S H_{mx} \sin \omega t$. Погрешность измерения таким прибором определяется погрешностью измерения индуцированной ЭДС, степенью постоянства частоты вращения, напряжением наводки от двигателя, шумами и вибрациями в скользящих контактах.

Для измерения слабых магнитных полей используют преобразователь Барнетта. В нем одновитковый медный ротор вращается струей сжатого воздуха. Индуцированные в витке вихревые токи создают свой переменный магнитный поток, пропорциональный измеряемому постоянному магнитному потоку Φ_0 . В свою очередь, этот поток индуцирует в неподвижной многовитковой обмотке синусоидальную ЭДС, которая также пропорциональна потоку Φ_0 . Высокая чувствительность измерения достигается за счет применения бесконтактного токосъема, компенсационного способа измерения и высокой частоты вращения преобразователя (до 30000 об/мин, т. е. 500 об/с). Такой прибор обеспечивает измерение магнитных потоков, соответствующих индукции в диапазоне $10^{-10} \dots 10^{-2}$ Тл.

Какие недостатки имеют приборы, основанные на применении вибрирующих индукционных преобразователей?

Напряженность поля убывает с увеличением расстояния от поверхности намагниченного объекта. На некотором расстоянии напряженность поля становится равной напряженности поля Земли или окружающего пространства. Для измерения напряженности магнитного поля непосредственно у поверхности намагниченного объекта применяют вибрирующие индукционные преобразователи. Катушка такого преобразователя имеет малую толщину катушки. Катушку располагают на расстоянии d поверхности объекта и сообщают колебания в направлении нормали к поверхности (рис. 3.1).

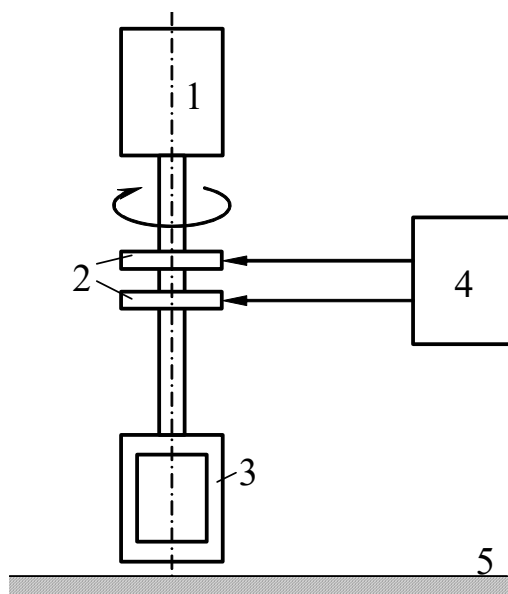


Рис. 3.1. Прибор с вращающимся индукционным преобразователем: 1 – электродвигатель; 2 – токосъемные скользящие контакты; 3 – индукционный преобразователь; 4 – измерительный прибор; 5 – объект контроля

При этом вектор напряженности поля должен быть перпендикулярен плоскости катушки. Среднее значение ЭДС в катушке пропорционально напряженности поля на расстоянии d от поверхности образца. Длина катушки должна быть такой, чтобы вторая ее сторона находилась вне зоны действия поля образца.

Приборы для измерения магнитных потоков при помощи вибрирующих индукционных преобразователей обладают значительными погрешностями, связанными с нестабильностью амплитуды вибраций. Относительная погрешность измерений достигает 3...5 %.

Каковы особенности устройства индукционных приборов, предназначенных для измерения переменных и импульсных магнитных потоков?

Для измерения переменных магнитных потоков применяют исключительно пассивные индукционные магнитные преобразователи. Если магнитный поток во времени изменяется по синусоидальному закону, то в приборе применяют вольтметр переменного тока, который показывает действующее напряжение на концах обмотки преобразователя. То есть если $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$, то вольтметр

покажет напряжение $U = \frac{w\Phi_m \omega}{\sqrt{2}}$. Зависимость результатов измерения от

частоты является недостатком такой простейшей схемы измерения, т. к. не позволяет заранее проградуировать шкалу прибора в единицах магнитного потока. Чтобы устранить этот недостаток, между индукционным преобразователем и вольтметром включают пассивную интегрирующую RC-

цепь с коэффициентом передачи $K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}}$. Напряжение на выходе этой

цепи имеет вид $U = \frac{w\Phi_m \omega}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}}$.

При выборе постоянной времени $T = RC$ цепи так, чтобы на самой низкой частоте измерения выполнялось неравенство $(\omega T)^2 \gg 1$, показания вольтметра

не будут зависеть от частоты: $U = \frac{w\Phi_m}{T}$.

Прибор обеспечивает измерение магнитных полей, соответствующих индукции в диапазоне от 10^{-14} до 10^{-3} Тл, при работе на частотах 25 Гц и выше.

Что собой представляют пондеромоторные преобразователи?

Эти преобразователи основаны на пондеромоторном взаимодействии магнитного поля и рамки, по которой течет ток. Преобразователь работает следующим образом. Луч света от источника 1, пройдя диафрагму 2, попадает на зеркальце 3, закрепленное вместе с рамкой 4, на растяжке 5, отразившись от которого падает на шкалу 6 (рис. 3.2).

При изменении напряженности поля происходит поворот рамки 6 и закрепленного на растяжке зеркальца, а следовательно, и перемещение светового «зайчика» по шкале. Угол отклонения рамки пропорционален напряженности измеряемого магнитного поля. Преобразователи такого типа применяют для дефектоскопии рельсов, для измерения напряженности магнитного поля в узких воздушных зазорах магнитов. Их используют для измерения как постоянных, так и переменных магнитных полей. В последнем

случае по рамке пропускают переменный ток той частоты, что и частота измеряемого поля. Порог реагирования – от 1 до 10 А/м.

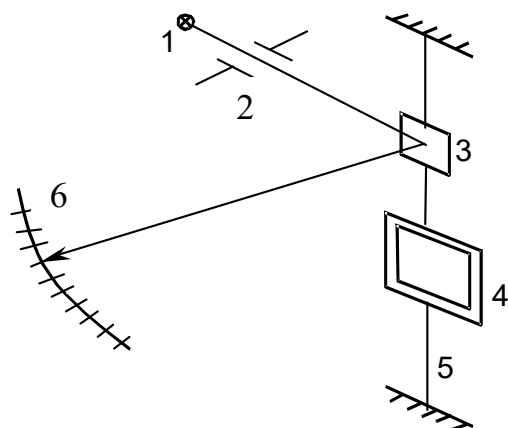


Рис. 3.2. Пондеромоторный преобразователь: 1 – источник света; 2 – диафрагма; 3 – зеркальце; 4 – рамка с током; 5 – растяжка; 6 – шкала

В чем сущность эффекта Холла?

Эффект Холла заключается в появлении ЭДС между противоположными сторонами пластинки, если через нее пропустить ток, а пластинку поместить в магнитное поле (рис. 3.3).

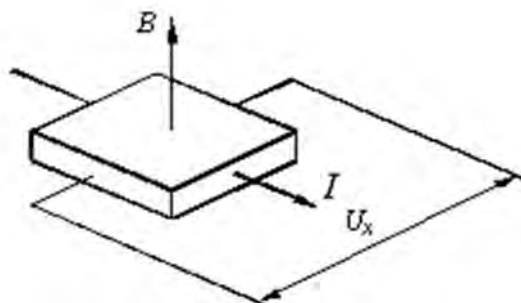


Рис. 3.3. Преобразователь Холла

Эффект Холла проявляется в металлах и полупроводниках, однако в полупроводниках ЭДС Холла значительно выше. Поэтому в качестве материала преобразователей используют полупроводники, такие как германий, индий и др.

Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца (действием магнитного поля на движущийся электрический заряд).

ЭДС Холла определяется по формуле

$$U_x = -R_x IB/d,$$

где R_x – постоянная Холла; I – ток в преобразователе; d – толщина пластины; B – измеряемая индукция.

Постоянная Холла определяется экспериментально. Основными достоинствами преобразователей Холла являются пропорциональность ЭДС Холла напряженности магнитного поля, сравнительно малые размеры преобразователя (чувствительный элемент может достигать сотых долей квадратного миллиметра), широкий диапазон измеряемых полей (напряженность поля от 10 до 10^7 А/м), возможность измерения как постоянных, так и переменных магнитных полей. Обычно если измеряют постоянное магнитное поле, то запитывают преобразователь переменным током (и наоборот), что позволяет облегчить измерения и увеличить чувствительность контроля. Для усиления ЭДС Холла используют электронные усилители.

Какие преобразователи называют магниторезистивными?

В основе преобразователей этого типа лежит эффект Гаусса, заключающийся в изменении электрического сопротивления проводника или полупроводника при помещении его в магнитное поле. Особенно сильно это проявляется у висмута. Поэтому висмутовую спираль используют для измерения напряженности магнитных полей.

Измерение заключается в следующем. Спираль помещают в магнитное поле и с помощью электрического моста или потенциометра постоянного тока измеряют ее электрическое сопротивление при 18 °С. Имеет место линейная зависимость электрического сопротивления спирали от напряженности магнитного поля.

Как устроен феррозонд-полемер и в чем его отличие от феррозонда-градиентометра?

Феррозонд-полемер состоит из двух полузондов, каждый из которых имеет магнитомягкий (пермаллоевый) сердечник и две обмотки – первичную и вторичную (рис. 3.4).

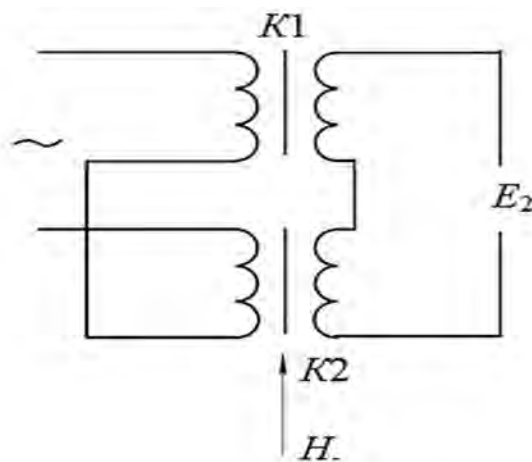


Рис. 3.4. Расположение обмоток в феррозонде-полемере

Первичная обмотка служит для возбуждения переменного магнитного поля, которое перематничивает сердечник, а вторичная обмотка – индикаторная. Возбуждающие катушки соединены последовательно, однако расположены так, что создаваемые ими переменные поля всегда имеют противоположное направление, но равную величину.

Схема феррозонда-градиентометра отличается тем, что первичная обмотка феррозонда-полемера сделана вторичной.

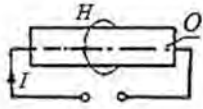


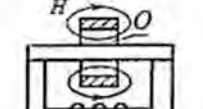
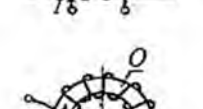
3.3. Виды, способы и схемы намагничивания объектов

Какие виды намагничивания Вы знаете?

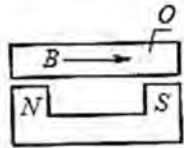
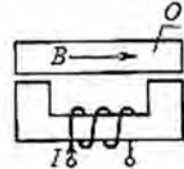
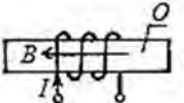
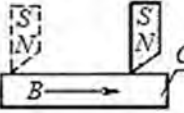
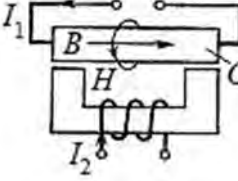
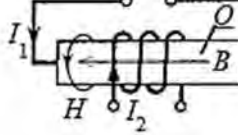
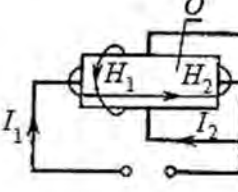
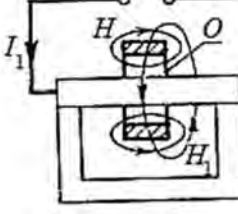

Согласно ГОСТ 21105–87, при магнитопорошковом методе контроля применяют четыре вида намагничивания: циркулярный, продольный (полюсный), комбинированный и во вращающемся магнитном поле (табл. 3.1).

Направление напряженности поля в воздухе или магнитной индукции в среде при намагничивании объекта пропусканием тока по тороидальной обмотке, нанесенной на его поверхность, или при помощи соленоида показано в соответствии с правилом буравчика. Нельзя стрелками показывать направление магнитного потока, т. к. магнитный поток – величина скалярная, которая показывает число магнитных силовых линий, проходящих через данную площадь.

Табл. 3.1. Виды, способы и схемы намагничивания

Вид намагничивания	Способ намагничивания	Схема намагничивания
Циркулярный	Пропусканием тока по всему объекту	
	Пропусканием тока по части объекта	
	Пропусканием тока по проводнику, помещенному в сквозное отверстие в объекте	
	Путем индуцирования тока в объекте	
	Пропусканием тока по тороидальной обмотке	

Окончание табл. 3.1

Вид намагничивания	Способ намагничивания	Схема намагничивания
Продольный (полюсный)	При помощи постоянного магнита	
	При помощи электромагнита	
	При помощи соленоида	
	Перемещением постоянного магнита по объекту	
Комбинированный	Пропусканием тока по объекту и при помощи электромагнита	
	Пропусканием тока по объекту и при помощи соленоида	
	Пропусканием по объекту двух токов во взаимно перпендикулярных направлениях	
	Индуцированием тока в объекте и пропусканием тока по проводнику, помещенному в сквозное отверстие в объекте	
Во вращающемся магнитном поле	При помощи соленоида вращающегося магнитного поля	

Чем руководствуются при выборе вида и способа намагничивания?

Вид и способ намагничивания выбирают в зависимости от размеров и формы объекта, материала и толщины покрытия, ориентации дефектов, подлежащих выявлению. Дефекты сплошности обнаруживаются лучше всего, если вектор напряженности внешнего намагничивающего поля перпендикулярен направлению распространения дефектов. Чувствительность метода значительно ухудшается при $\alpha < 30^\circ$, а при $\alpha \approx 0^\circ$ почти не удается обнаружить даже крупные дефекты.

Как намагничивают объект, если ориентация дефектов в нем не известна?

При обнаружении разноориентированных дефектов или если ориентация дефектов не известна, применяют намагничивание как минимум в двух взаимно перпендикулярных направлениях, комбинированное намагничивание, а также намагничивание во вращающемся магнитном поле.

Какой вид имеют силовые линии магнитного поля при циркулярном намагничивании?

Магнитные силовые линии при циркулярном намагничивании имеют вид концентрических окружностей, расположенных в плоскости, перпендикулярной направлению тока. При намагничивании цилиндрических изделий с дефектами магнитный поток выходит из детали только в местах расположения дефекта. При контроле полых цилиндров ток пропускают через кабель, стержень из меди, алюминия, латуни. При таком намагничивании внутренняя поверхность цилиндра намагничивается сильнее наружной поверхности. Для более равномерного намагничивания полых деталей стержень, по которому пропускают ток, центрируют с помощью неэлектропроводящих втулок. Иногда ток пропускают через торцевые поверхности трубки. В этом случае максимальное значение напряженности поля имеет место на наружной поверхности. Напряженность поля на внутренней поверхности полого цилиндра будет равна нулю. Последний способ циркулярного намагничивания целесообразно применять при обнаружении дефектов наружной поверхности.

Почему при циркулярном намагничивании рекомендуют применять импульсный ток?

Для создания высокой напряженности магнитного поля при намагничивании деталей путем пропускания по ним тока необходимы большие плотности тока. В этом случае целесообразно применять импульсный ток. Он обеспечивает меньшую вероятность прижогов, которые опасны как зародыши дефектов. Увеличение глубины промагничивания достигается повторным 3–5-кратным намагничиванием импульсами одного направления. Это

объясняется тем, что магнитная дифференциальная проницаемость верхнего слоя детали достигает стабильной величины после 3...5 импульсов тока.

Какие способы циркулярного намагничивания Вы знаете?

Согласно ГОСТ 21105–87, применяют следующие способы циркулярного намагничивания: пропусканием тока по всему объекту, по части объекта, по проводнику, помещенному в сквозное отверстие в детали, путем индуцирования тока в объекте, пропусканием тока по тороидальной обмотке (см. табл. 3.1).

По каким формулам определяют значение намагничивающего тока при циркулярном намагничивании объектов, имеющих поперечное сечение простой формы, а также крупногабаритных объектов?

Максимальное (амплитудное) значение тока выбирают в зависимости от требуемой напряженности H_{mp} магнитного поля на контролируемой поверхности, формы и размеров сечения объекта контроля по формулам:

– для деталей цилиндрической формы $I = 3 H_{mp} d$;

– для объектов прямоугольного сечения $I = 2 H_{mp} a$, если $a/b \geq 10$;

$I = 2 H_{mp} (a + b)$, если $0,1 < a/b < 10$ (рис. 3.5).

– для изделий сложного профиля $I = 3 H_{mp} D_{экв}$, где $D_{экв}$ – диаметр круга, площадь которого равна площади поперечного сечения контролируемого объекта;

– для участков крупногабаритных объектов $I = 1,5 H_{mp} \sqrt{l^2 + c^2}$ (рис. 3.6).

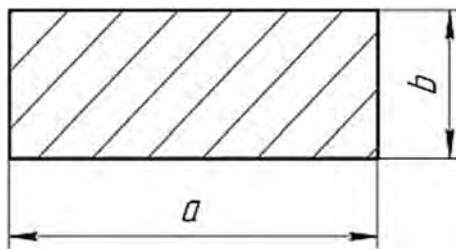


Рис. 3.5. К объяснению циркулярного намагничивания пластины или бруска

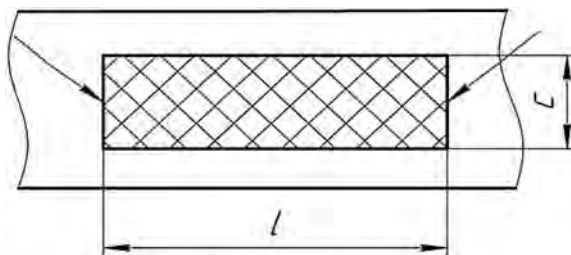


Рис. 3.6. Определение зоны контроля при циркулярном намагничивании крупногабаритных объектов

Стрелками показано расположение электроконтактов.

В приведенных выше формулах H_{mp} – требуемая напряженность намагничивающего поля; d – диаметр цилиндрического объекта; a и b – длина и ширина прямоугольного сечения намагничиваемого изделия; D – диаметр эквивалентного круга, т. е. имеющего такую же площадь, как и сечение контролируемого объекта; l – длина контролируемого участка (расстояние между местами установки электроконтактов); c – ширина контролируемого участка.

Единицы измерения входящих в формулы величин должны быть согласованы.

С какой целью при циркулярном намагничивании в процессе магнитопорошковой дефектоскопии иногда применяют мягкие металлические прокладки?

Чтобы избежать прижогов в местах соединения токоподводящих кабелей с объектом контроля за счет уменьшения плотности тока (а значит, и температуры мест контакта), контакт токоподводящих кабелей следует осуществлять через мягкие прокладки, например, свинцовые пластины, латунные сетки и т. д.

Какие способы продольного (полюсного) намагничивания Вам известны?

При продольном (полюсном) намагничивании объекты контроля намагничивают при помощи постоянного магнита, электромагнита, соленоида, а также перемещением постоянного магнита по объекту (см. табл. 3.1). При полюсном намагничивании магнитные силовые линии поля часть своего пути проходят по воздуху, а часть – по намагничиваемому изделию. После отключения внешнего намагничивающего поля на краях объекта остаются магнитные полюсы (рис. 3.7). Силовые линии магнитного поля, конечно, замкнутые.

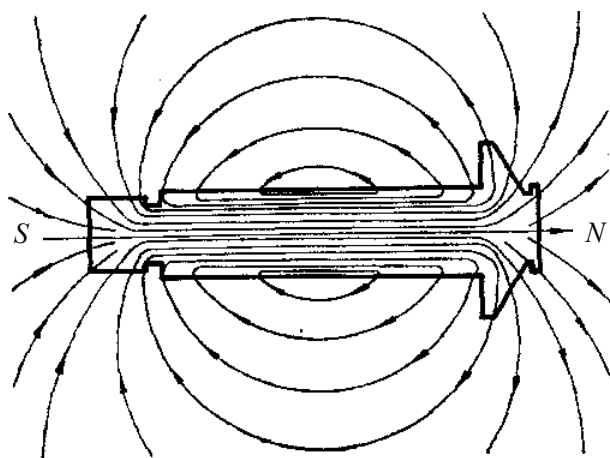


Рис. 3.7. Линии магнитной индукции внутри и вне продольно (полюсно) намагниченной детали

Можно ли рассчитать режим при полюсном намагничивании?

При полюсном намагничивании на краях намагничиваемого изделия возникают магнитные полюсы, которые создают внутри объекта контроля и у его поверхности магнитное поле, направленное навстречу внешнему полю (см. рис. 1.23). Истинная напряженность H_i магнитного поля на поверхности детали будет отличаться от напряженности внешнего поля H_0 на величину размагничивающего поля H_{\square} ($H_i = H_0 - H_{\square}$). Точное значение размагничивающего поля можно вычислить только для эллипсоидов вращения. Поэтому при дефектоскопии реальных объектов с использованием полюсного намагничивания тангенциальную составляющую напряженности поля у поверхности контролируемой детали следует измерять.

Как на практике измеряют напряженность поля у поверхности объекта при полюсном намагничивании?

Магнитный преобразователь измерительного прибора располагают перпендикулярно поверхности детали и перпендикулярно направлению действия внешнего поля. Если шкала прибора проградуирована в единицах магнитной индукции теслах (Тл), то следует воспользоваться формулой $H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}$, где

B – показание прибора, Тл; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\mu_r = 1,0000004$, т. е. $\mu_r \approx 1$ (для воздуха). Относительная магнитная проницаемость μ_r определяется для среды, в которой находится преобразователь.

Как определить напряженность намагничивающего поля при намагничивании перемещением постоянного магнита по объекту контроля?

Измерить тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля прямым методом в месте контакта ребра постоянного магнита с объектом контроля почти невозможно. Однако возможности магнитопорошкового контроля при использовании данного способа намагничивания можно оценить с помощью контрольного образца, имеющего трещины соответствующего уровня чувствительности. Другими словами, подбирают постоянный магнит с такими характеристиками, при которых уверенно обнаруживаются трещины контрольного образца, содержащего дефекты требуемого условного уровня чувствительности.

Если контрольный образец имеет цилиндрическую форму, то для уверенного обнаружения как поперечных, так и продольных дефектов магнит перемещают по винтовой линии. Для выявления продольных трещин траектория перемещения полюса не должна быть замкнутой, т. к. произойдет частичное размагничивание предыдущего участка.

Какой вид намагничивания называется комбинированным?

Комбинированное намагничивание (рис. 3.8) – это намагничивание объекта двумя или несколькими магнитными полями, при котором результирующий вектор напряженности магнитного поля в течение периода меняет свою ориентацию между заданными направлениями (поворачивается или вращается). Комбинированное намагничивание осуществляют только способом приложенного поля. Поясним изложенное геометрически (рис. 3.9–3.11).

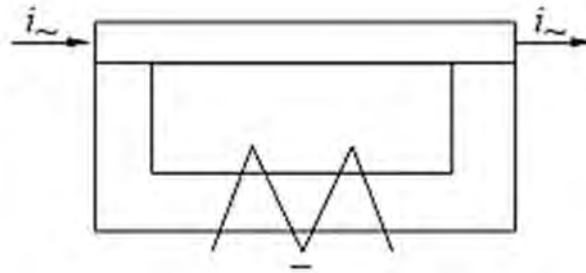


Рис. 3.8. Одна из схем комбинированного намагничивания

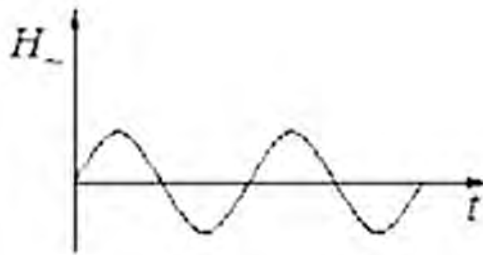


Рис. 3.9. Изменение напряженности переменного магнитного поля

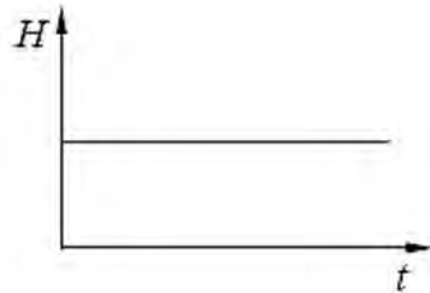


Рис. 3.10. Изменение напряженности постоянного магнитного поля

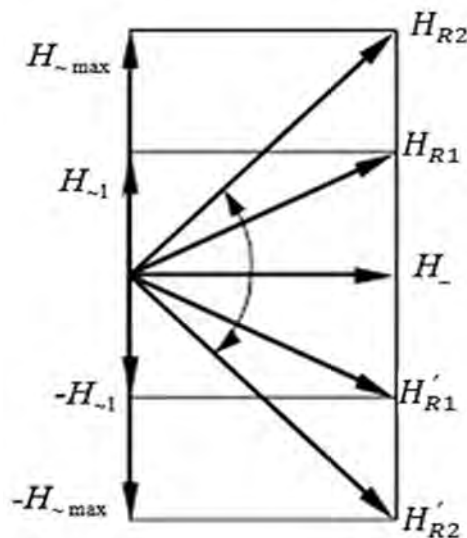


Рис. 3.11. Изменение вектора результирующего поля при комбинированном намагничивании: H_{R0} , H_{R1} , H_{R2} , H'_{R1} , H'_{R2} – векторы напряженности результирующего поля

Пусть намагничивание цилиндрического объекта контроля осуществляют постоянным полем H_1 с использованием электромагнита и одновременно пропусканием переменного синусоидального тока вдоль оси цилиндра полем H_2 (см. рис. 3.8). На рис. 3.9 и 3.10 показаны графики зависимости напряженности указанных полей во времени. Если напряженность постоянного магнитного поля остается неизменной, то напряженность переменного поля изменяет как свою величину, так и направление. При этом вектор результирующего магнитного поля поворачивается (см. рис. 3.11).

В некоторые моменты времени он будет перпендикулярен направлению распространения дефекта, и поэтому дефект будет обнаружен. Угол поворота вектора напряженности результирующего поля зависит от соотношения напряженностей обоих полей.

В каких случаях объекты контроля намагничивают во вращающемся магнитном поле?

Намагничивание во вращающемся магнитном поле применяют при контроле *способом остаточной намагниченности* объектов сложной формы, а также объектов с большим размагничивающим фактором, с ограниченной контактной площадью или с диэлектрическими покрытиями. Намагничивание во вращающемся магнитном поле производят с помощью соленоида вращающегося поля.

3.4. Способы размагничивания объектов. Демагнетизаторы. Контроль размагниченности

В каких случаях можно не размагничивать объект контроля?

Все детали, прошедшие магнитопорошковый контроль и признанные годными по результатам этого контроля, должны быть подвергнуты размагничиванию. Размагничивание можно не проводить, если после магнитного контроля деталь подлежит термической обработке с нагреванием не менее чем до точки Кюри (для железа 768 °С).

В каких случаях недопустима повышенная остаточная намагниченность детали?

Повышенная остаточная намагниченность в ряде случаев недопустима. Магнитное поле, создаваемое деталью, может вызвать нарушение нормальных условий работы приборов (например, компаса). Если намагниченная деталь имеет трущиеся поверхности, движущиеся относительно соседних деталей с малым зазором, то в места контакта могут втягиваться ферромагнитные частицы, нарушающие условия эксплуатации объекта. Магнитное поле изделия может

вызвать повышенную намагниченность близлежащих деталей, снижающую эксплуатационные качества прибора. Остаточная намагниченность деталей может затруднять проведение последующих технологических операций (например, сварки, сборки, механической обработки).

Какие способы размагничивания деталей Вам известны?

Применяют в основном два способа размагничивания: нагревание объекта выше точки Кюри и воздействие на объект переменным полем с убывающей до нуля амплитудой. Первый способ применяется редко, т. к. приводит к потере механических свойств.

Второй способ в зависимости от формы и размеров деталей может быть реализован следующим образом:

- путем перемещения детали через соленоид, питаемый переменным током, и удаления ее на расстояние, на котором поле соленоида мало; обычно это расстояние, равное 3...5 внутренним диаметрам (или диагоналям) соленоида;
- уменьшением до нуля переменного тока в катушке соленоида с помещенной в него деталью;
- удалением детали из электромагнита, питаемого переменным током;
- уменьшением до нуля переменного тока в электромагните, в межполюсном пространстве которого находится размагничиваемая деталь или ее часть;
- пропусканием по детали либо по стержню, вставленному в полость детали, переменного тока, амплитуда которого изменяется от максимального значения до нуля.

Деталь можно размагнитить и за один цикл, если экспериментально подобрать напряженность размагничивающего поля (рис. 3.12).

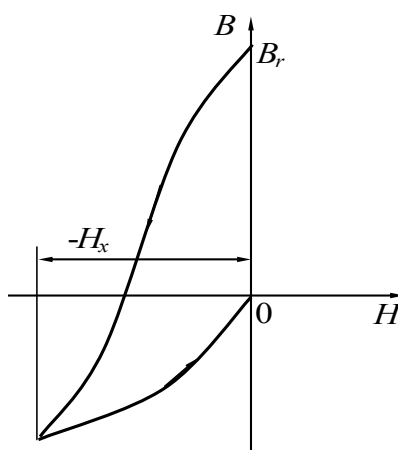


Рис. 3.12. Изменение магнитной индукции в детали при размагничивании ее за один цикл

Напряженность внешнего поля подбирают такой, чтобы намагниченность объекта после уменьшения внешнего поля до нуля стала равной нулю.

Устройства для реализации этого способа применяли для размагничивания кораблей в военное время, чтобы защитить от магнитных и индукционных мин. В слабом магнитном поле Земли судно приобретает довольно большую остаточную намагниченность, подвергаясь ударным нагрузкам волн и намагничиваясь по безгистерезисной кривой. Устройство для компенсации его собственного магнитного поля представляет собой систему электрических кабелей, которые создают магнитное поле, противоположное по знаку магнитному полю намагниченного судна.

Судно находится в северном полушарии Земли. Для его размагничивания внутри корпуса имеется петля (кольцо) электрического кабеля. Где расположены магнитные полюсы на корпусе судна? В какой плоскости находится петля?

Так как в северном полушарии находится южный магнитный полюс, то судно намагничивается так, что в нижней его части будет северный полюс, а в верхней – южный. При этом петля кабеля должна располагаться в горизонтальной плоскости. Так как поле тока должно компенсировать магнитное поле корабля, то оно должно иметь противоположное направление, т. е. вверху должен находиться северный полюс, а внизу – южный.

Назовите принцип действия магнитных мин и способы борьбы с ними.

Явление самопроизвольного намагничивания тел в магнитном поле Земли было использовано для разработки магнитных мин. Мины устанавливают на некоторой глубине от поверхности воды. Они всплывают и взрываются при прохождении над ними намагниченного в поле Земли корабля. Механизм, заставляющий мину всплыть, срабатывает под влиянием магнитного поля, проходящего над миной судна.

В основном применяют два способа борьбы с магнитными минами. Первый заключается в том, что вертолет, летящий низко над поверхностью моря, проносит закрепленный на канате сильный магнит. Иногда на поверхности воды на поплавках закрепляют электрический кабель в виде кольца и пропускают по нему ток. Под влиянием поля магнита или поля тока механизм мин приходит в действие, и мины взрываются.

Второй способ состоит в том, что внутри корабля закрепляют петли из электрического кабеля и пропускают по ним ток такого направления, чтобы возникающее при этом магнитное поле скомпенсировало магнитное поле корабля. В этом случае корабль беспрепятственно проходит над миной.

Как чаще всего осуществляют размагничивание объектов контроля на предприятиях?

Размагничивание осуществляют путем воздействия на намагниченную деталь знакопеременным магнитным полем с убывающей до нуля амплитудой (рис. 3.13).

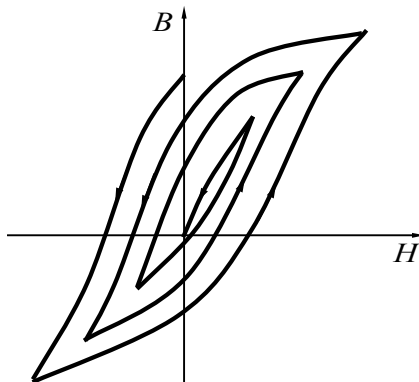


Рис. 3.13. Изменение магнитной индукции в детали при размагничивании убывающим переменным полем

Для этого применяют стационарные или переносные соленоиды и электромагниты, а также дефектоскопы, позволяющие пропускать через деталь ток, достаточный для создания необходимого размагничивающего поля. Питание размагничивающего устройства осуществляется токами, полярность которых меняется от 1 до 50 Гц. Применяют также размагничивающие устройства, содержащие колебательный контур, позволяющий получить затухающие колебания тока (демагнетизаторы).

По какой формуле определяют максимальную скорость перемещения детали через размагничивающий соленоид, питаемый переменным током, при которой обеспечивается качественное размагничивание объекта?

Формула имеет вид:

$$V_{\max} = \frac{H_{\max}(1-C)f}{\left(\frac{dH}{dx}\right)_{\max}},$$

где H_{\max} – максимальная напряженность магнитного поля соленоида в зоне прохождения детали; f – частота размагничивающего тока; $\left(\frac{dH}{dx}\right)_{\max}$ – максимальное значение градиента магнитного поля в зоне прохождения размагничиваемой детали; C – коэффициент, определяющий максимальное

допустимое уменьшение амплитуды напряженности магнитного поля между последующим H_2 и предыдущим H_1 периодами, $C = \frac{H_2}{H_1}$.

Обычно достаточно, если $C = 0,95$.

Как влияют частота размагничивающего поля ω , магнитная проницаемость материала μ и его удельная электрическая проводимость σ на глубину проникновения размагничивающего поля в металле?

Чем больше значения ω , μ_a , σ , тем меньше глубина проникновения поля в металле. На рис. 3.14 показано распределение относительной напряженности переменного магнитного поля $H_* = \frac{H}{H_0}$ по сечению цилиндра, намагниченного в однородном синусоидальном поле бесконечно длинного соленоида. Здесь $\frac{r}{R}$ – относительный радиус цилиндра.

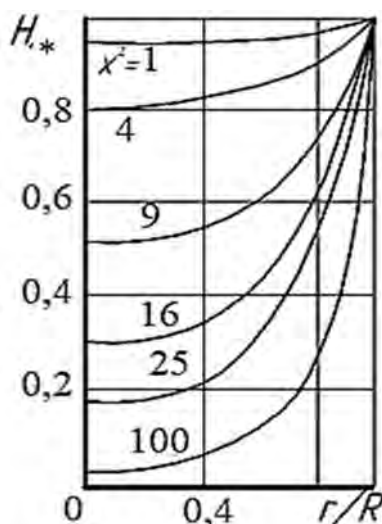


Рис. 3.14. Распределение напряженности магнитного поля по сечению бесконечно длинного цилиндра, помещенного в соленоид с однородным переменным полем

Из графиков видно, что с ростом обобщенного параметра объекта $X^2 = R^2 \omega \mu_a \sigma$ напряженность поля с увеличением глубины убывает быстрее. Из этой формулы и приведенных графиков видно, что глубина проникновения переменного синусоидального поля уменьшается с ростом ω , μ_a и σ . Уменьшение напряженности поля обусловлено действием скин-эффекта. Согласно закону Ленца, вторичное магнитное поле, создаваемое вихревыми токами, ослабляет первичное поле. При этом во внутренних слоях цилиндра вторичное поле больше, чем в наружных слоях, т. к. оно создается почти всеми вихревыми токами цилиндра.

Что такое скин-эффект?

Скин-эффект, или поверхностный эффект, – это неравномерное распределение *переменного* электрического тока по сечению проводника или *переменного* магнитного потока по сечению магнитопровода. Плотность тока уменьшается в направлении от поверхности провода к его центральной части. Степень неравномерности растет с увеличением частоты тока, площади поперечного сечения провода и его удельной электрической проводимости.

Магнитная индукция также уменьшается от периферии магнитопровода к его центральной части. Степень неравномерности возрастает с увеличением частоты магнитного потока, площади поперечного сечения магнитопровода и магнитной проницаемости его материала.

Скин-эффект приводит к увеличению электрического сопротивления провода переменному току по сравнению с сопротивлением постоянному току и к размагничиванию магнитопровода вихревыми токами.

Проявляется ли остаточная намагниченность у деталей, намагниченных циркулярно?

При циркулярном намагничивании цилиндрических изделий путем пропускания тока вдоль продольной оси детали магнитный поток выходит из детали только в местах расположения дефекта сплошности. Если линия тока не совпадает с продольной геометрической осью цилиндра, то на поверхности детали появляется местная полюсность, которую сложно обнаружить с помощью измерительных приборов.

У деталей, намагничиваемых циркулярно, остаточная намагниченность может проявляться в виде местной полюсности и при намагничивании деталей сложной формы. Причем магнитные полюсы могут располагаться хаотически на боковой поверхности детали. Для оценки допустимости местной полюсности следует исследовать распределение магнитных полей около поверхности контролируемой детали, чтобы установить существуют ли места, где напряженность поля превышает допустимый по техническим условиям уровень.

Для снижения неравномерности намагничивания цилиндрических деталей при их циркулярном намагничивании (включая полые) применяют центрирующие втулки.

Нужно ли размагничивать цилиндрическую деталь, которую в процессе магнитопорошкового контроля намагничивали циркулярно путем пропускания тока вдоль продольной оси детали?

Если места установки электродов незначительно не совпадают с продольной осью цилиндра, на его поверхности появляются магнитные полюсы. Наличие полюсности сложно обнаружить с помощью измерительных приборов. Поэтому все объекты, подвергавшиеся циркулярному намагничиванию, следует

размагнитить. Исключением могут быть лишь детали, которые в дальнейшем предполагается нагревать выше точки Кюри.

Назовите факторы, ухудшающие качество размагничивания деталей.

Факторами, ухудшающими качество размагничивания деталей, являются большие размеры объектов, их сложная форма, малое удлинение, быстрая перемена направления магнитного поля при размагничивании. Этому способствует совпадение продольной оси детали с направлением магнитного поля Земли, близкое расположение размагничиваемой детали от установок и кабелей, создающих магнитные поля. Снизить качество размагничивания детали может и быстрое уменьшение амплитуды размагничивающего поля, а также слишком большое магнитное сопротивление мест контакта электромагнита с деталью.

При каких условиях можно обеспечить качественное размагничивание детали?

Направление размагничивающего поля должно, как правило, совпадать с направлением магнитного поля, которым деталь была намагничена. Начальная напряженность размагничивающего поля во всех точках объема детали, подлежащей размагничиванию, должна быть более пяти значений коэрцитивной силы материала. Процесс размагничивания должен включать не менее 40 периодов размагничивающего поля, равномерно убывающих по амплитуде.

Назовите способы повышения качества размагничивания деталей.

Для обеспечения наиболее полного размагничивания небольших объектов сложной формы увеличивают требуемую напряженность поля соленоида в 2–4 раза, поворачивают деталь в различных плоскостях при ее удалении из соленоида, чтобы более протяженные оси отдельных выступов в некоторые моменты времени были ориентированы по полю соленоида. В последнем случае требуемая напряженность размагничивающего поля будет в 2–4 раза меньше напряженности поля, необходимой для размагничивания объекта без его поворота. Повысить качество размагничивания деталей можно, размагничивая их по частям, применяя кабель, наматываемый на недостаточно размагниченные части объекта, укладывая короткие детали в цепочки или между двумя длинными стержнями (удлинителями). С этой целью можно снизить скорость перемагничивания. Эффективность размагничивания деталей можно повысить, ориентируя продольную ось детали с востока на запад или удаляя детали от объектов, создающих магнитное поле, медленно уменьшая амплитуду размагничивающего поля, увеличивая ток в обмотке электромагнита, используемого для размагничивания, уменьшая зазоры между полюсами электромагнита и размагничиваемым объектом.

Как осуществить магнитное экранирование объекта?

Для магнитного экранирования объект помещают в емкость из магнитомягкого материала. Лишь при достаточно толстых стенках ослабление напряженности магнитного поля внутри емкости может быть настолько сильным, что магнитная защита приобретает практическое значение, хотя и в этом случае поле внутри полости не исчезает полностью. Ослабление магнитного поля внутри полости емкости происходит в результате изменения направления силовых линий, а не вследствие их обрыва на поверхности ферромагнетика.

В чем отличие принципов экранирования в электростатическом, магнитном и электромагнитном полях?

При электростатическом экранировании происходит компенсация внешнего поля полем электрических зарядов, индуцированных на стенках экрана из проводящего материала. Толщина стенки экрана на качество защиты от действия электростатических полей не влияет.

Электромагнитное экранирование основано на том, что электромагнитная волна, проникающая в стенки экрана, быстро затухает, расходуя энергию на покрытие потерь, обусловленных вихревыми токами в стенках экрана. Так как на расстоянии, равном длине волны, электромагнитная волна в металле почти полностью затухает, то для надежного экранирования толщина стенки экрана должна быть не меньше длины волны в металле.

Экранирование от действия постоянного магнитного поля обусловлено искривлением его силовых линий. Магнитные силовые линии проходят в основном по сечению стенок экрана, имеющего малое магнитное сопротивление. Экраны выполняют из магнитомягкого материала. Они должны иметь достаточно большую толщину стенки.

Какие приборы используют для оценки качества размагничивания объектов?

Для количественной оценки качества размагничивания применяют измерители напряженности и градиента напряженности магнитного поля ФП-1, ФП-2, ПКР-1м, ИОН-3, ИМП-1 и др.

Наличие остаточной намагниченности детали можно быстро обнаружить с помощью цепочки канцелярских скрепок, пермаллоевой иголки, подвешенной на тонкой нити, и т. д.

Как осуществляют оценку качества размагничивания объекта контроля?

Деталь располагают вертикально. На фиксированном расстоянии от одного из ее концов измеряют напряженность магнитного поля, затем деталь вместе с

преобразователем поворачивают на 180° вокруг малой оси детали и производят повторное измерение (рис. 3.15).

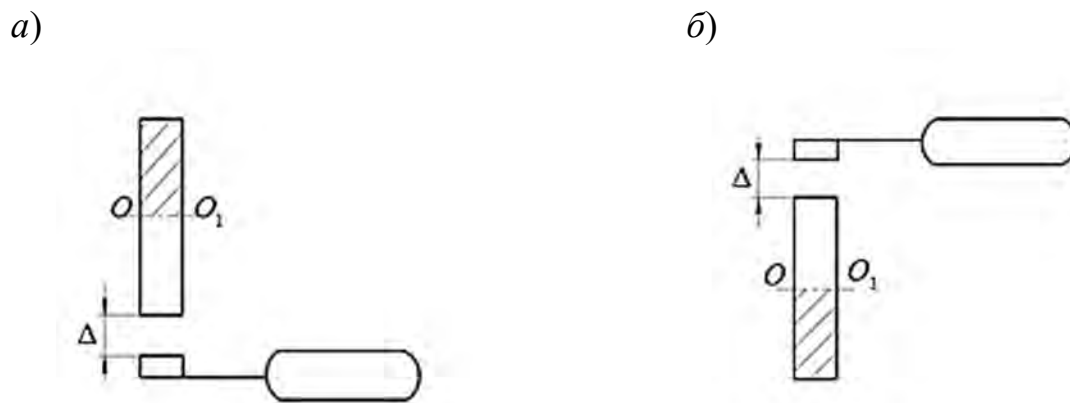


Рис. 3.15. Определение качества размагничивания детали: *a* – расположение магнитного преобразователя относительно детали при первом измерении; *б* – расположение магнитного преобразователя относительно детали при втором измерении

Оценку качества размагничивания объекта контроля производят путем определения *показателя размагниченности K*.

$$K = C_6 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1},$$

где C_6 – поправочный коэффициент, если деталь в процессе измерений располагалась вертикально (его выбирают из таблиц); α_1 – отклонение стрелки измерителя напряженности поля, когда преобразователь располагался у конца детали; α_2 – то же после поворота детали вместе с преобразователем на 180° вокруг малой оси детали.

В большинстве случаев деталь считают размагниченной, если $K \leq 3$.

Если вертикально установить деталь сложно, то необходимые операции выполняют при ее горизонтальном расположении, ориентируя в направлении *север – юг*.

В этом случае показатель размагниченности определяют по формуле $K = C_2 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}$, где C_2 – поправочный коэффициент для горизонтального расположения детали.

3.5. Образование поля дефекта при намагничивании объекта контроля

Как образуется магнитное поле рассеяния над дефектом сплошности ферромагнитного объекта?

При намагничивании ферромагнитной детали, имеющей нарушение сплошности, часть магнитного потока (вследствие сильного локального уменьшения магнитной проницаемости) выходит за пределы детали, огибая дефект и образуя магнитное поле рассеяния над ним (рис. 3.16). При этом на поверхности детали в окрестностях дефекта образуются местные магнитные полюсы N и S . После снятия внешнего магнитного поля эти магнитные полюсы и магнитное поле над дефектом (вследствие остаточной намагниченности объекта) остаются.

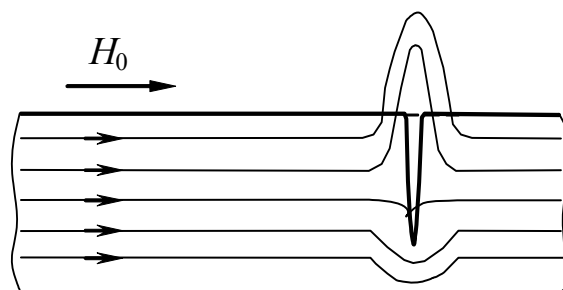


Рис. 3.16. Образование поля рассеяния дефекта при намагничивании объекта контроля

Магнитное поле над дефектом называют *полем рассеяния*. Проходя в бездефектной части детали, магнитный поток не меняет своего направления.

Если деталь изготовлена из неферромагнитного металла, в котором магнитные проницаемости металла и дефекта близки, то магнитные потоки рассеяния не образуются и магнитная дефектоскопия неприменима.

Зависит ли характер поля дефекта от того, выходит несплошность на поверхность объекта контроля или нет?

Экспериментально установлено, что характер поля рассеяния дефекта существенно зависит от того, выходит несплошность на поверхность или нет. Поэтому свойства наружных (поверхностных и подповерхностных) и внутренних дефектов сплошности сильно отличаются.

Что понимают под напряженностью поля дефекта?

Под напряженностью поля дефекта понимают разность полного и приложенного внешнего поля в конкретном месте объекта контроля.

От чего зависит величина измеренного поля дефекта?

Величина напряженности *измеренного* поля дефекта зависит от напряженности намагничивающего поля, размеров и формы дефекта, глубины его залегания, удаленности магнитного преобразователя от поверхности, от ориентации дефекта, магнитных свойств материала контролируемого изделия и т. д.

Как влияет увеличение глубины поверхностного дефекта на величину его поля?

Увеличение глубины поверхностного дефекта приводит приблизительно к линейному росту тангенциальной (параллельной поверхности изделия) составляющей поля дефекта. Напряженность поля дефекта особенно сильно изменяется вблизи поверхности, причем тем сильнее, чем уже несплошность. Из изложенного следует, что при магнитной дефектоскопии можно значительно ослабить фон помех, обусловленных поверхностными неровностями намагниченного объекта, если удалить магнитный преобразователь от сканируемой поверхности.

Какова особенность формирования магнитного поля протяженного дефекта, ориентированного под углом к внешнему приложенному полю?

Поле над протяженным дефектом, продольная ось которого направлена под углом к внешнему полю, претерпевает «преломление» и ориентируется по нормали к наибольшему размеру дефекта. С увеличением угла между вектором напряженности приложенного поля и нормалью к направлению распространения дефекта поле дефекта резко спадает.

Как влияет режим намагничивания на формирование поля наружного и внутреннего дефекта?

Поле наружного дефекта появляется при очень малой намагниченности (близкой к нулю) и с увеличением напряженности намагничивающего поля увеличивается.

Поле внутреннего дефекта становится заметным только при некотором пороговом значении H_0 тем большем, чем толще покрывающий дефект слой металла.

Как влияет форма внутреннего дефекта большого раскрытия на величину и топографию его поля?

Для внутренних несплошностей достаточно большого раскрытия величина и топография поля дефекта слабо связаны с формой дефекта при постоянстве площади его поперечного сечения.

Как влияет глубина залегания внутреннего дефекта на напряженность его поля?

Экспериментально установлено, что напряженность поля внутреннего дефекта изменяется обратно пропорционально квадрату глубины залегания в слабых магнитных полях и обратно пропорционально глубине залегания в сильных полях. Приближение дефекта к внутренней относительно преобразователя поверхности изделия усиливает его поле, что нарушает установленную выше закономерность. Свойства внутренних дефектов и дефектов внутренней поверхности схожи.

Магнитное поле наружного или внутреннего дефекта убывает быстрее при удалении от поверхности объекта контроля?

При удалении от поверхности объекта контроля магнитное поле наружного по отношению к преобразователю дефекта убывает быстрее. Это свойство полей дефектов используется для отстройки от помех, обусловленных поверхностными неровностями, при дефектоскопии объектов. Количество помех значительно уменьшается, если магнитный преобразователь (или магнитную ленту) расположить на некотором удалении от поверхности объекта.

Чем обнаруживают магнитные поля рассеяния дефектов при различных методах неразрушающего контроля?

Магнитные поля рассеяния дефектов обнаруживают с помощью различных магнитных преобразователей и индикаторов магнитных полей. В частности, для этих целей может применяться пленка, визуализирующая магнитные поля. На ней в зависимости от угла наблюдения индикаторный рисунок протяженного дефекта может иметь вид светлой полосы, по обе стороны которой располагаются темные полосы, либо прилегающих друг к другу темной и светлой полос.

Какой вид имеют топографии тангенциальной и нормальной составляющей поля внутреннего дефекта на поверхности ферромагнитной пластины?

Характер изменения тангенциальной и нормальной составляющих поля внутреннего дефекта на поверхности ферромагнитной пластины при намагничивании параллельно ее поверхности показан на рис. 3.17 и 3.18. Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля дефекта определяется как разность суперпозиции тангенциальных составляющих магнитных полей и внешнего магнитного поля в тех же точках.

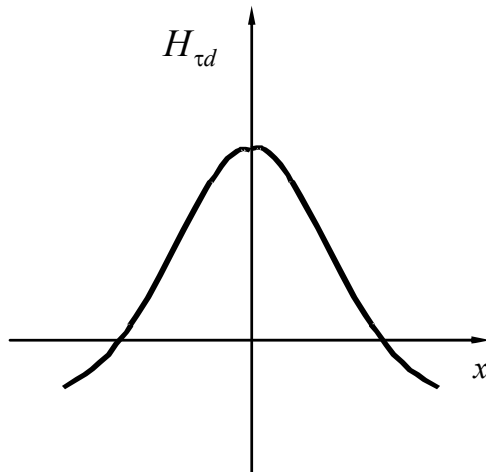


Рис. 3.17. Изменение тангенциальной составляющей поля внутреннего дефекта

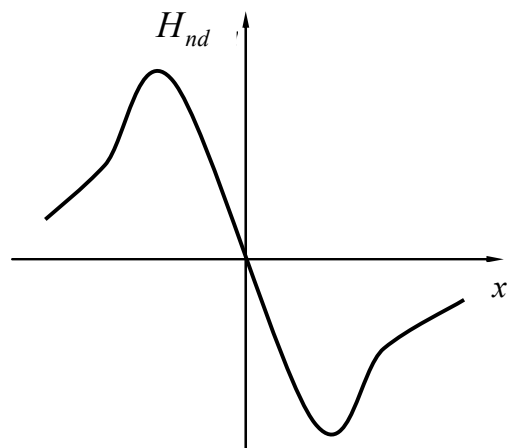


Рис. 3.18. Характер изменения нормальной составляющей поля внутреннего дефекта

4. МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Сущность метода. Область применения. Выявляемые дефекты. Уровни чувствительности. Требования к шероховатости поверхности. Кинетика осаждения магнитного порошка над дефектом. Основные операции магнитопорошковой дефектоскопии. Материалы и оборудование. Подготовка к контролю. Способ приложенного поля и способ остаточной намагниченности. Определение режима намагничивания. Особенности намагничивания постоянным, переменным и импульсным полем. Факторы, влияющие на чувствительность магнитопорошкового контроля. Пути повышения эффективности магнитопорошковой дефектоскопии. Особенности применения вращающегося магнитного поля. Сухой магнитный порошок. Магнитные суспензии. Магнитные индикаторные пакеты. Магнитные пасты. Магнитогумированная паста. Нанесение дефектоскопического материала на объект контроля. Проверка дефектоскопических свойств магнитного порошка и суспензии. Осмотр деталей. Типичные признаки дефектов по картине осаждения магнитного порошка. Мнимые дефекты. Отстройка от мешающих факторов при магнитопорошковой дефектоскопии. Способы изготовления дефектограмм. Стандартные образцы. Контроль деталей сложной формы, пружин, шайб, сварных швов, литья, зубчатых колес, лопаток турбин и объектов в процессе их эксплуатации. Организация ремонта дефектных объектов. Магнитопорошковые дефектоскопы. Требования, предъявляемые к участку магнитопорошкового контроля на предприятии. Требования техники безопасности при магнитопорошковой дефектоскопии.

4.1. Сущность метода. Область применения. Выявляемые дефекты. Уровни чувствительности. Требования к шероховатости поверхности

4.1.1. Сущность метода

Какой метод контроля называют магнитопорошковым?

Магнитопорошковым методом контроля называют метод, основанный на явлении втягивания частиц ферромагнитного порошка магнитными потоками рассеяния, возникающими над дефектами, в намагниченных объектах. Скопления магнитного порошка над дефектами называют *индикаторными рисунками дефектов*. Индикаторные рисунки повторяют очертания обнаруженных несплошностей в контролируемом ферромагнитном изделии [1].

В каких отраслях народного хозяйства применяют магнитопорошковый метод контроля?

Магнитопорошковый метод контроля нашел широкое применение в энергетике, авиации, железнодорожном транспорте, химическом машиностроении, судостроении, автомобильной и многих других отраслях промышленности. Объектами контроля являются полуфабрикаты-отливки, поковки, прокат, заготовки, детали на промежуточных стадиях изготовления, готовые детали, детали и узлы, восстановленные на ремонтных предприятиях, объекты, бывшие в эксплуатации и контролируемые при техническом обслуживании и ремонте, включая и те, которые контролируют в узлах без демонтажа.

Какие основные нормативные документы регламентируют применение магнитопорошкового метода для контроля ферромагнитных объектов?

ГОСТ 21105–87, который распространяется на контроль деталей, изделий и полуфабрикатов из ферромагнитных материалов с максимальной относительной магнитной проницаемостью не менее 40, а также отраслевые нормативные документы.

СТБ ЕН 12062–2004. Контроль неразрушающий сварных соединений. Общие требования для металлов.

СТБ ISO 5817–2009. Соединения стали, никеля, титана и их сплавов, выполненные сваркой плавлением (кроме лучевой сварки). Уровни качества шва в зависимости от дефектов.

Термины и их определения, касающиеся неразрушающего контроля, содержатся в ГОСТ 24450–80.

Для обнаружения каких дефектов применяют магнитопорошковый метод контроля?

Магнитопорошковый метод контроля предназначен для обнаружения поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: трещин, волосовин, непроваров сварных соединений, флокенов, закатов надрывов, неметаллических включений и т. п. Метод может быть использован для дефектоскопии объектов с немагнитными покрытиями. В процессе контроля выявляются дефекты сплошности шириной не менее 0,001 мм, глубиной 0,01 мм и длиной 0,5 мм и более. Увеличение протяженности дефекта не приводит к улучшению его выявляемости. При постоянной ширине лучше обнаруживаются трещины большей глубины.

Могут быть обнаружены и достаточно крупные нарушения сплошности металла (непровары, поры, шлаковые включения и другие величиной не менее 1,5...3 мм), расположенные на глубине до 5...6 мм от поверхности. Лучше всего выявляются трещины, ориентированные под углом $\alpha = 90^\circ$

к направлению намагничивающего поля. Чем меньше α , тем хуже обнаруживаются протяженные дефекты.

Угол β наклона плоских дефектов к контролируемой поверхности почти не влияет на выявляемость, если β больше 45° . При меньших углах дефекты выявляются хуже, а если $\beta < 20^\circ$, то дефекты выявляются ненадежно или вообще не обнаруживаются.

Дефекты округлой формы создают слабые магнитные поля рассеяния при контроле и обнаруживаются неудовлетворительно [2–5].

Какие условные уровни чувствительности установлены при магнитопорошковой дефектоскопии?

В зависимости от размеров выявляемых дефектов при магнитопорошковой дефектоскопии (МПД) установлено три условных уровня чувствительности для дефектов с минимальным раскрытием Δ : *A*, если $\Delta = 2,0$ мкм; *B*, если $\Delta = 10$ мкм; *B*, если $\Delta = 25$ мкм. Минимальная протяженность дефекта – 0,5 мм. Считается, что глубина несплошности в 10 раз превышает ее ширину. Требуемый уровень чувствительности задается техническими условиями на объект контроля. Поэтому, если, например, применяемая технология контроля позволяет обнаружить дефект раскрытием 15 мкм, то достигается уровень чувствительности *B* и не достигаются *A* и *B*. Уровни чувствительности названы *условными* потому, что они определены для идеальных дефектов в форме щели с параллельными стенками, перпендикулярными поверхности детали [1].

При какой шероховатости поверхности достигаются уровни чувствительности A, B и B?

Условный уровень чувствительности *A* достигается при параметре шероховатости контролируемой поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм, уровни чувствительности *B* и *B* – при $Ra \leq 10$ мкм. При выявлении *подповерхностных дефектов*, а также при $Ra > 10$ мкм чувствительность метода снижается и условный уровень чувствительности *не нормируется*. При контроле изделий с немагнитными покрытиями с увеличением толщины покрытия чувствительность метода понижается.

С ростом шероховатости поверхности чувствительность метода падает из-за появления фона магнитного порошка. Снизить фон от частиц магнитного порошка можно, уменьшив напряженность намагничивающего поля, однако это приводит к снижению чувствительности метода [1].

4.2. Кинетика осаждения магнитного порошка над дефектом

Под действием каких сил уединенные частицы магнитного порошка скапливаются над дефектами сплошности?

Уединенные частицы магнитного порошка скапливаются над дефектами под действием равнодействующей R пондеромоторной силы F_3 , силы тяжести G и архимедовой силы F_A , силы трения и вязкости жидкости F_{mp} (рис. 4.1).

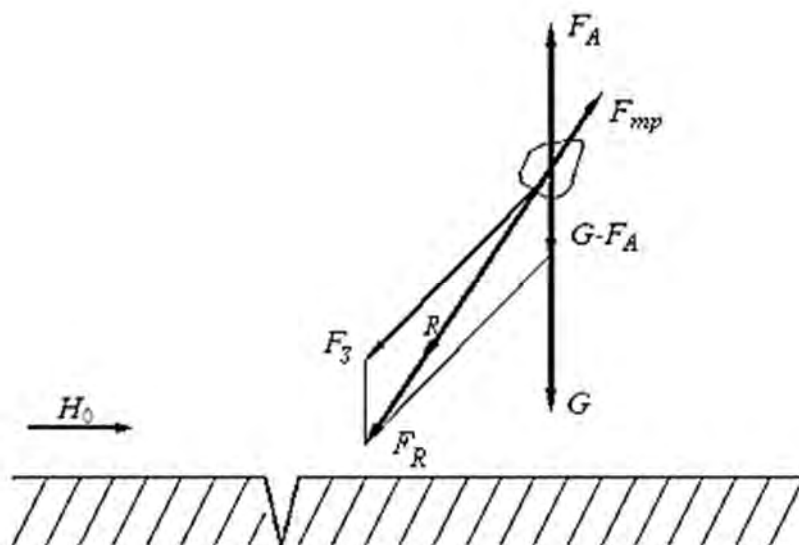


Рис. 4.1. Силы, действующие на уединенную частицу магнитного порошка вблизи дефекта

Если частицы не являются уединенными (например, соединены в цепочку), то к перечисленным выше силам добавляются силы электростатического и магнитного взаимодействия, возникающие между частицами.

По какой формуле определяют затягивающую пондеромоторную силу, действующую на уединенную частицу магнитного порошка? Как влияет форма частицы на величину пондеромоторной силы?

Если ферромагнитная частица находится в неоднородном магнитном поле дефекта, то один из ее концов будет находиться в более сильном поле, поэтому на частицу будет действовать затягивающая пондеромоторная сила F_3 :

$$F_3 = V \chi_{\square} H \frac{dH}{dx},$$

где H – напряженность поля; $\frac{dH}{dx}$ – градиент напряженности поля; V – объем частицы; \aleph_{\ominus} – магнитная восприимчивость частицы, $\aleph_{\ominus} = \frac{\aleph}{1 + N\aleph}$; $\aleph = \mu_r - 1$, (где μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества; N – коэффициент размагничивания частицы);

$$N = \frac{\lambda \ln(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) - \sqrt{\lambda^2 - 1}}{(\sqrt{\lambda^2 - 1})^3},$$

где λ – отношение длины l ферромагнитной частицы к наибольшему ее поперечному размеру d , $\lambda = \frac{l}{d} > 1$.

Для бесконечно длинного цилиндра, ось которого перпендикулярна вектору напряженности магнитного поля, $N = \frac{1}{2}$, для цилиндра бесконечной длины, ось которого совпадает с вектором H , $N = 0$ и $\aleph_{\ominus} = \aleph$. Для шара $N = \frac{1}{3}$, и, следовательно, даже при $\aleph = \infty$ магнитная восприимчивость тела шарообразной формы не может превышать 3. Таким образом, наибольшая пондеромоторная сила при прочих равных условиях будет действовать на тонкие длинные тела, а наименьшая – на объекты шарообразной формы. Изложенное справедливо, если в неоднородном магнитном поле находится вся протяженная частица, а не ее часть. По этой причине наиболее интенсивно над трещинами скапливаются короткие цепочки магнитных частиц. Шарообразные частицы обладают малой подвижностью.

Какова кинетика осаждения магнитного порошка, находящегося в суспензии, над трещиной?

При магнитопорошковом контроле в суспензии может происходить коагуляция двух типов: *магнитно-поляризационная* – соединение частиц в цепочки как магнитных диполей; *молекулярная автокоагуляция* – соединение частиц в хлопья, агрегаты и т. д. Магнитная коагуляция частиц происходит следующим образом. Сначала к более крупным частицам притягиваются более мелкие, попавшие в сферу притяжения крупных частиц. Затем под действием магнитных сил эти частицы образуют цепочки, которые вытягиваются в направлении поля. Вблизи трещины один конец такой цепочки будет находиться в поле большей напряженности и градиента, чем другой. Это вызовет появление силы, которая стремится затянуть цепочку к месту расположения дефекта. Массу магнитного порошка, накопившегося над трещиной, можно определить по формуле

$$m = 2\rho lKv\tau,$$

где ρ – эффективный радиус действия поля рассеяния; l – длина трещины; K – концентрация суспензии; v – скорость оседания частиц; τ – время нахождения детали в суспензии.

Определенная по этой формуле масса магнитного порошка под действием поля рассеяния, создаваемого трещиной, соберется на поверхности $2\rho_1l$ (рис. 4.2). В зонах $(\rho_2 - \rho_1)$ оседания магнитного порошка не происходит, т. к. частицы, попавшие в эту зону, притягиваются к дефекту и накапливаются в зоне $2\rho_1l$. Вне зоны $2\rho l$ на поверхности детали порошок при оседании будет распределяться равномерно. При извлечении детали из суспензии осевший порошок с нее смывается. Поэтому зоны неосаждения магнитного порошка на поверхности детали обнаруживаются только при контроле способом воздушной взвеси [2].

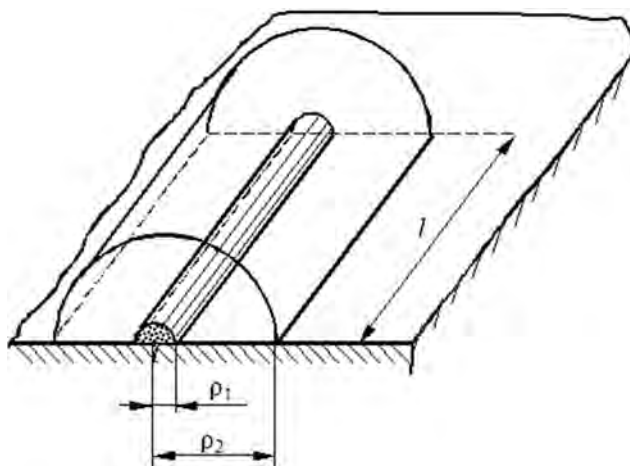


Рис. 4.2. Пояснение накопления магнитного порошка над трещиной в неподвижной суспензии

Всю суспензию над контролируемой деталью можно условно разделить на две зоны – приграничную, прилегающую к детали, и резервную, расположенную вне приграничной зоны. Магнитные частицы, оседающие из резервной зоны, пополняют приграничную зону. Если трещина, расположенная на потолочной поверхности детали, т. е. обращенная в сторону дна ванны с магнитной суспензией, то приграничный слой не только не пополняется, но и даже обедняется из-за удаления частиц порошка под действием силы тяжести. Это является основной причиной невыявления мелких трещин на поверхности детали, обращенных вниз, ко дну ванны [2].

Как влияет интенсивность магнитной коагуляции на выявляемость дефектов при магнитопорошковой дефектоскопии?

Если магнитная коагуляция происходит слишком интенсивно, то индикаторные рисунки над дефектами становятся нечеткими и расплывчатыми. При этом на поверхности объекта контроля наблюдается значительный фон из магнитного порошка. Магнитный порошок осаждается не только над трещинами, но и над наклепом, местами грубой обработки, рисками, карбидной полосчатостью и т. д. Если цепочка слишком длинная, то поле дефекта не в состоянии затянуть ее к месту нахождения дефекта. Такие длинные ферромагнитные цепочки частиц оседают на поверхности детали в местах повышенной шероховатости поверхности, в зоне термического влияния, карбидной полосчатости, по рискам, наклепу, в местах повышенных механических напряжений и т. д., создавая значительный фон, который затрудняет расшифровку индикаторных рисунков дефектов при контроле.

При оптимальной интенсивности магнитной коагуляции выявление дефектов улучшается, т. к. пондеромоторная сила, действующая на цепочку, больше силы, действующей на уединенные частицы магнитного порошка.

При высокой интенсивности магнитной коагуляции трещины обнаруживаются хуже из-за низкой подвижности длинных цепочек в поле дефекта и значительного фона, создаваемого частицами магнитного порошка на поверхности объекта контроля [2].

Какие факторы влияют на интенсивность магнитной коагуляции?

На интенсивность магнитной коагуляции влияют вязкость дисперсионной среды, концентрация и дисперсность магнитного порошка, его магнитные характеристики и предшествующее магнитное состояние, напряженность и градиент напряженности магнитного поля, продолжительность его действия, автокоагуляция. Оптимизировать состояние магнитной суспензии можно, регулируя параметры этих факторов. В частности, чтобы в суспензии было меньше конгломератов и длинных цепочек, в нее добавляют поверхностно-активные вещества (эмульгатор ОП-7, ОП-10), бывшую в употреблении суспензию процеживают через сита, а ферромагнитные частицы в суспензии размагничивают. С этой целью шланг, по которому поступает магнитная суспензия из бачка к месту ее нанесения на объект контроля, пропускают через электрическую катушку, которая питается от источника переменного тока.

Как влияет длина цепочек магнитных частиц на выявляемость дефектов?

Недопустимые дефекты (трещины, волосовины и т. д.) создают поле большого градиента. Над такими дефектами происходит интенсивное осаждение

коротких цепочек магнитных частиц (длиной 0,01...0,1 мм), что позволяет получить четкий индикаторный рисунок дефекта.

Длинные цепочки ферромагнитных частиц интенсивно накапливаются над поверхностными неровностями, местами грубой обработки поверхности, рисками, наклепом, подрезами, карбидной полосчатостью и т. д. Это обусловлено тем, что на длинные цепочки магнитных частиц в поле малого градиента действует значительная сила.

4.3. Основные операции магнитопорошковой дефектоскопии. Материалы и оборудование. Подготовка к контролю

Назовите основные операции магнитопорошковой дефектоскопии.

Магнитопорошковый метод контроля включает следующие технологические операции:

- подготовка к контролю;
- намагничивание объекта контроля;
- нанесение дефектоскопического материала на контролируемую поверхность;
- осмотр контролируемой поверхности и регистрация индикаторных рисунков дефектов;
- оценка результатов контроля;
- размагничивание объекта.

Какие операции включает подготовка к контролю?

Подготовка к контролю должна включать:

- подготовку объекта к операциям контроля;
- проверку работоспособности дефектоскопов;
- проверку качества дефектоскопических материалов.

При *подготовке объекта* с контролируемой поверхностью необходимо удалить грязь, продукты коррозии, нагар, остатки окалины, масляные загрязнения, а при необходимости – следы лакокрасочных покрытий. Для удаления загрязнений из пазов, отверстий, полостей применяют хлопчатобумажную неворсистую ветошь. Загрязнения с ответственных прецизионных деталей удаляют волосяными щетками, деревянными и пластмассовыми скребками, растворителями (бензин, ацетон и др.). Лакокрасочные покрытия толщиной более 30 мкм удаляют смывками АФТ-1, СД-1 и др., а также пескоструйной обработкой (если она не запрещена технологией ремонта объекта) с последующим обдувом чистого сухого воздуха. Нельзя применять для очистки металлические предметы (отвертки, щетки и т. п.) вследствие возможности

нанесения царапин на поверхности детали. Царапины затрудняют расшифровку индикаторных рисунков из-за скопления над ними магнитного порошка.

Если намагничивание производится *пропусканьем тока по изделию*, то детали должны быть очищены от неэлектропроводящих покрытий. Места контакта изделия с электрокарандашами (и сами электрокарандаши) зачищают мелкой наждачной бумагой (если это допустимо) или полотном, чтобы предотвратить прижог при намагничивании пропусканьем тока.

Если деталь будет подвергаться МПД с применением *водной суспензии*, то контролируемую поверхность следует тщательно обезжирить органическими растворителями (бензин, ацетон и др.), либо препаратами МС-6, МС-15, не содержащими легковоспламеняющихся веществ. Часто для этих целей применяют моющий раствор 4–5-процентный водный раствор эмульгатора ОП-7 или ОП-10.

Если предполагается использовать *масляную суспензию*, то, кроме перечисленных выше растворителей, может быть использован водный раствор препарата МС-6. Если деталь будет контролироваться с применением *керосиновой или керосино-масляной суспензии* или сухого магнитного порошка, то с поверхности объекта необходимо удалить влагу. С этой целью объект контроля обдувают струей сухого воздуха.

Для более качественной подготовки поверхности рекомендуют производить двойное обезжиривание (последовательно двумя одинаковыми растворами).

Если контролируемая деталь находится в узле, то густой смазкой, ветошью, пробками, полиэтиленовой пленкой и т. д. закрывают отверстия, через которые магнитная суспензия может попасть внутрь узла и нарушить работу подшипников, золотниковых пар, зубчатых колес и т. д.

Проверку работоспособности дефектоскопов и качества дефектоскопических материалов осуществляют при помощи стандартных образцов предприятий, специально изготовленных или отобранных из числа забракованных изделий с дефектами, размеры которых соответствуют принятому уровню чувствительности [1–5].

Какие основные устройства применяют для магнитопорошкового контроля?

Для проведения магнитопорошкового контроля необходимы следующие устройства:

- устройства для намагничивания объектов контроля;
- устройства для освещения контролируемой поверхности видимым и ультрафиолетовым светом, лампа местного освещения;
- измерители напряженности магнитного поля;
- измерители концентрации магнитного порошка в суспензии;
- контрольные образцы и другие средства метрологической поверки;

– устройства для размагничивания объектов контроля, магнитного порошка в суспензии;

– лупы, эндоскопы, микроскоп типа МБС-2;

– измерители освещенности.

В частности, в комплект передвижного магнитопорошкового дефектоскопа МД-50П входят:

– шарнирный электромагнит, соленоид, электроконтакты, намагничивающие кабели;

– лупа с подсветкой;

– лупа телескопическая;

– поворотное зеркало;

– светильник;

– фляга для нанесения магнитной суспензии;

– пакет с магнитным порошком;

– контрольный образец с дефектограммой;

– ванночки.

Какие материалы и вспомогательные средства применяют при магнитопорошковой дефектоскопии?

Для проведения МПД могут применяться:

– моющие средства и растворители (бензин, керосин, ацетон, препараты МС-6, МС-15, смывки АФТ-1, СД-1 и др.);

– средства для удаления загрязнений и зачистки электроконтактов (волосяные щетки, кисти, мелкая наждачная бумага, напильники, скребки, хлопчатобумажная ветошь);

– контрастные краски (белая нитрокраска, краска для цветной дефектоскопии, НЦ-1 и др.);

– краскораспылитель;

– средства для нанесения магнитного порошка и магнитной суспензии (ванночки, резиновые груши, сита, ванны и т. д.);

– устройства для осмотра поверхности объекта контроля (лупы, эндоскопы и т. д.) [2].

Как удаляют влагу с поверхности объекта контроля?

Если для выявления дефектов в изделии применяют суспензию на основе керосина, масла, их смеси и других органических растворителей или сухой магнитный порошок, то предварительно необходимо удалить влагу с поверхности объекта. С этой целью деталь обдувают струей сухого воздуха, а небольшие увлажненные участки протирают сухой неворсистой хлопчатобумажной ветошью. От ворсистой ветоши на детали остаются отдельные

ворсинки, на которых задерживаются частицы магнитного порошка при стекании суспензии. Это приводит к образованию мнимых дефектов.

Как зачищают наконечники электрокарандашей и места электрического контакта перед циркулярным намагничиванием объекта?

Наконечники электрокарандашей зачищают наждачной бумагой, удаляют загрязнения и смазку с дисков зажимного контактного устройства дефектоскопа, используя скребки, ветошь, растворители. Места контакта изделия с электрокарандашами зачищают мелкой наждачной бумагой, обезжиривают растворителями (бензином, ацетоном).

Как снимают электростатические заряды с контролируемой магнитопорошковой дефектоскопией поверхности?

Эмалевое покрытие контролируемых деталей иногда самопроизвольно электризуется. Расшифровка индикаторного рисунка может быть затруднена осаждением магнитного порошка в местах электризации неэлектропроводного покрытия детали. Это происходит как при использовании сухого магнитного порошка, так и суспензий, приготовленных на основе органических дисперсионных сред. Чтобы снять статическое электричество, контролируемую поверхность протирают слегка влажной чистой ветошью. Можно также повысить электропроводность керосиновой или масляной суспензии добавлением в нее присадки Акор-1 (5...10 г/л).

4.4. Способ приложенного поля и способ остаточной намагниченности. Определение режима намагничивания

Какие способы контроля применяют при магнитопорошковой дефектоскопии?

При МПД применяют способ остаточной намагниченности (СОН) и способ приложенного поля (СПП).

При применении СОН объект контроля предварительно намагничивают 4...5 с, а затем, после снятия намагничивающего поля, на его поверхность наносят дефектоскопический материал. Промежуток времени между указанными операциями должен быть не более часа. Осмотр контролируемой поверхности проводят *после стекания основной массы суспензии*.

При СПП нанесение суспензии на объект контроля производят во время действия на него магнитного поля. Выключение намагничивающего тока осуществляют *после стекания основной массы суспензии*. Осмотр детали проводится после отключения магнитного поля. Таким образом, при СПП

индикаторные рисунки выявляемых дефектов образуются в процессе намагничивания объекта контроля.

В ряде случаев при СПП, преимущественно при контроле объектов с применением продольного намагничивания, рекомендуется предварительное нанесение на контролируемую деталь магнитной суспензии. При этом намагничивание начинают еще до того, как суспензия успела стечь. Например, погружают деталь в ванну с магнитной суспензией, затем помещают ее в магнитное поле соленоида, а после отключения поля деталь извлекают из соленоида и осматривают.

При выборе способа магнитопорошкового контроля нужно руководствоваться следующим. *Контроль в приложенном поле* позволяет достичь, как правило, более высокой чувствительности (за исключением случаев контроля деталей с выраженной текстурой, когда порошок осаждается по волокнам металла, а также с грубой обработкой поверхности). Более высокая чувствительность объясняется возможностью достижения большей магнитной индукции при контроле СПП. *Способ контроля на остаточной намагниченности* более прост в осуществлении: возможность установки детали в любое требуемое положение; возможность нанесения суспензии как путем полива, так и путем погружения в ванну с суспензией; простота расшифровки результатов контроля (в меньшей степени порошок оседает по рискам, наклепу, местам грубой поверхности и т. д.); меньшая вероятность прижога деталей. Поэтому в равных условиях предпочтение следует отдавать СОН [2, 3, 5].

В каких случаях при контроле изделий рекомендуют применять СОН?

СОН применяют при контроле объектов из магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой $H_c \geq 1000$ А/м, с остаточной индукцией 0,5 Тл и более при условии, что он может обеспечить требуемый уровень чувствительности, и если при этом толщина немагнитного покрытия не превышает 30 мкм (для авиационных деталей 20 мкм). Возможность достижения требуемого условного уровня чувствительности определяется по кривым (рис. 4.3). Для этого из точек осей, соответствующих H_c и B_r материала контролируемого объекта, восстанавливают перпендикуляры. Если точка пересечения перпендикуляров лежит на кривой или выше кривой требуемого условного уровня чувствительности, то требуемый уровень чувствительности достижим (значения H_c и B_r берут из табл. А.1).

Таким образом, контроль СОН следует производить при одновременном выполнении перечисленных выше условий.

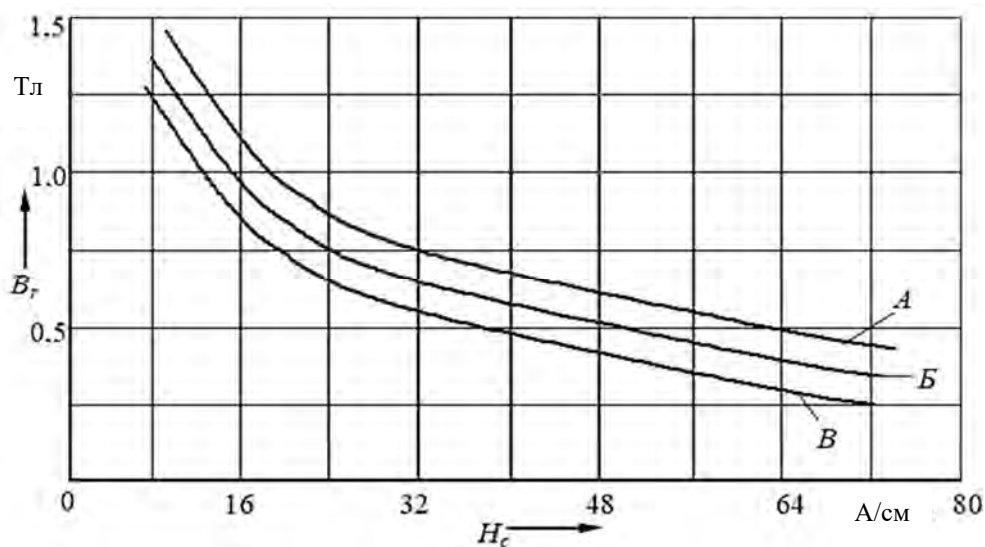


Рис. 4.3. К определению возможности достижения требуемого условного уровня чувствительности при контроле СОИ

Нормативные документы, распространяющиеся на объекты *железнодорожного транспорта*, рекомендуют применять СОИ, если $B_r \geq 0,6...0,8$ Тл, $H_c > 800...1000$ А/м.

Какому участку кривой $\mu(B)$ соответствует режим намагничивания при магнитных методах контроля?

Режим намагничивания при магнитных методах неразрушающего контроля соответствует отрезку *ав* правой ниспадающей части кривой $\mu(B)$ (рис. 4.4). Объясняется это следующим. Если режиму намагничивания соответствует точка, находящаяся слева от μ_{\max} , на кривой $\mu(B)$, то уменьшение поперечного сечения металла за счет дефекта приведет к увеличению магнитной индукции и может обусловить более высокую магнитную проницаемость. Это приведет к уменьшению магнитного потока рассеяния над изделием, поэтому дефект может быть не выявлен.

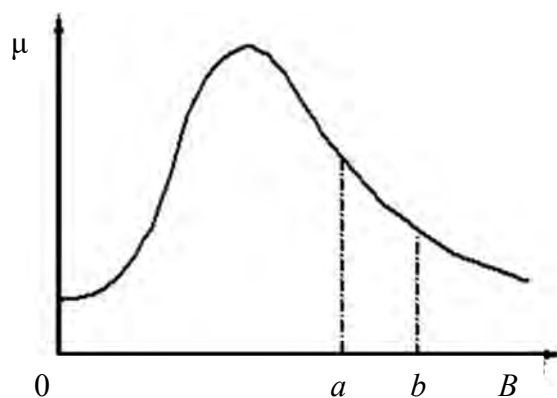


Рис. 4.4. Область оптимальных режимов намагничивания при магнитной дефектоскопии

Наилучшие условия для обнаружения дефектов имеют место на правой ниспадающей ветви кривой $\mu(B)$, т. к. уменьшение сечения образца из-за дефекта в этом случае приводит к снижению магнитной проницаемости материала объекта и способствует увеличению магнитного потока рассеяния над объектом контроля.

При большей напряженности магнитного поля различие между потоками рассеяния над дефектом в материале и в окружающей среде становится относительно меньше, что приводит к ухудшению выявляемости дефектов.

Как влияет содержание углерода в стали на ее магнитную проницаемость?

С увеличением содержания углерода магнитная проницаемость стали снижается. Например, если в стали содержится 0,1 % углерода, то $\mu_{r\max} = 2400$, а при 0,34 % $\mu_{r\max}$ уменьшается до 1200. Изложенное иллюстрируется рис. 4.5, на котором изображены графики зависимостей относительной магнитной проницаемости стали от магнитной индукции с учетом содержания углерода в ней.

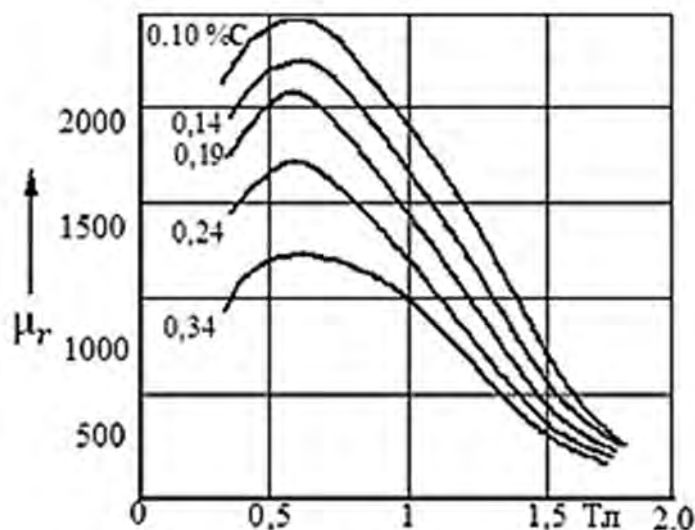


Рис. 4.5. Влияние содержания углерода в стали на ее магнитную проницаемость

Как определяют режим намагничивания при контроле СОН?

При контроле СОН напряженность магнитного поля должна быть такой, чтобы обеспечить техническое насыщение материала контролируемого изделия (определяют минимальную напряженность поля, которая необходима для получения максимальной остаточной индукции материала контролируемого изделия $B_{r\max}$). Эти данные содержатся в справочных таблицах.

В каких случаях контроль при магнитопорошковой дефектоскопии производят способом приложенного поля? Как при этом определяют режим намагничивания?

Если не выполняется хотя бы одно из названных выше условий применения СОН, то контроль необходимо производить СПП.

Контроль СПП также производят, если:

– объект выполнен из магнитомягкого материала, например из сталей Ст 3, 10, 20 и др.;

– деталь имеет сложную форму или малое удлинение ($\frac{l}{d} < 5$), вследствие чего ее не удастся намагнитить до требуемой индукции, чтобы проконтролировать на остаточной намагниченности;

– деталь контролируют для обнаружения подповерхностных дефектов, находящихся на глубине более 0,01 мм;

– мощность дефектоскопа не позволяет намагнитить всю деталь вследствие ее больших размеров;

– проводят контроль небольших участков крупногабаритной детали с помощью электромагнитов или электроконтактов.

При этом напряженность магнитного поля определяют в зависимости от коэрцитивной силы H_c материала объекта контроля и требуемого условного уровня чувствительности по номограммам (рис. 4.6). С этой целью восстанавливают перпендикуляр из точки оси абсцисс, соответствующей коэрцитивной силе материала, до пересечения с прямой соответствующего условного уровня чувствительности. Точку пересечения проецируют на ось ординат. При этом след проекции укажет требуемое значение напряженности магнитного поля.

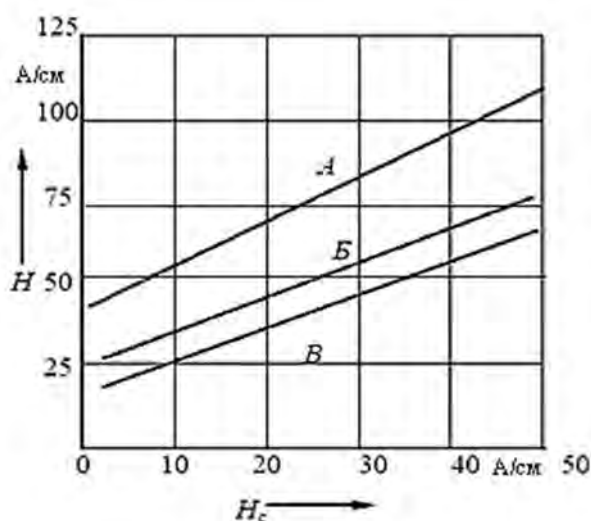


Рис. 4.6. Номограммы для выбора режима намагничивания при магнитопорошковом контроле способом приложенного поля

При контроле СПП необходимо не только создать требуемое значение тангенциальной составляющей напряженности намагничивающего поля, но и обеспечить отношение Θ нормальной составляющей напряженности поля к тангенциальной меньше 3 на контролируемом участке поверхности ($\Theta = \frac{H_n}{H_\tau} < 3$). Если указанное неравенство выполняется, то достигается высокая чувствительность метода, если нет, то осаждения магнитного порошка не происходит, т. к. частицы магнитного порошка интенсивно вымываются с этого участка под действием поперечной силы. Для уменьшения Θ до значения, меньшего 3, применяют переменное или импульсное намагничивающее поле, а также удлинители.

Весьма удобным для измерения H_τ и H_n является прибор типа ИМП-1, который позволяет одновременно измерить три составляющие напряженности магнитного поля и модуль максимального значения поля.

Гарантирует ли правильно выбранный и установленный режим намагничивания обнаружение дефектов в объекте контроля?

Режимы намагничивания объектов контроля, определенные по номограммам в зависимости от коэрцитивной силы и условного уровня чувствительности по рекомендуемым формулам, таблицам и т. д., еще не гарантируют обнаружения дефектов. Для уверенного выявления дефектов требуется уточнение режимов намагничивания, при этом ориентируются на выявлении известных естественных или искусственных дефектов в деталях [2].

Как учитывают наличие немагнитного покрытия при определении режима намагничивания?

Если толщина немагнитного покрытия $h > 30$ мкм (для авиационных деталей больше 20 мкм), то контроль следует проводить в приложенном магнитном поле. При этом режим намагничивания следует увеличить в K раз, где $K = f(h)$. Значение коэффициента K определяют в зависимости от толщины немагнитного покрытия по графикам (рис. 4.7).

При контроле на остаточной намагниченности H_{mp} равна напряженности поля, необходимой для получения $B_{r \max}$.

Если толщина немагнитного покрытия составляет 100...200 мкм, то наличие трещин в объекте контроля может быть обнаружено только при применении способа воздушной взвеси.

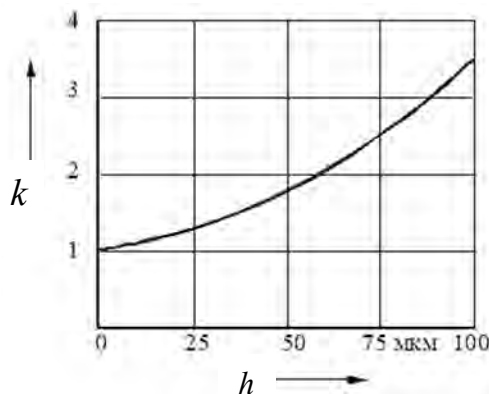


Рис. 4.7. Учет влияния толщины немагнитного покрытия, нанесенного на поверхность объекта контроля, при выборе режима намагничивания

Каковы особенности магнитопорошкового контроля изделий, содержащих покрытия?

Как отмечалось выше, если толщина немагнитного покрытия на контролируемом объекте не превышает 20 мкм, то режим намагничивания и способ контроля выбирают, как и для деталей, не имеющих покрытия.

При толщине немагнитного покрытия на контролируемом изделии более 60...80 мкм скопление порошка над дефектом после отключения приложенного поля сразу размывается. По этой причине осмотр деталей с покрытиями толщиной более 80 мкм при использовании масляной суспензии следует проводить при включенном намагничивающем поле. Если же используется водная суспензия, то осмотр можно проводить в приложенном поле только до высыхания суспензии.

Если толщина немагнитного покрытия составляет 100...200 мкм, то деталь следует контролировать способом воздушной взвеси. Следует отметить, что размывания скоплений магнитного порошка над дефектами в этом случае не происходит. Оно наблюдается только при контроле с использованием магнитной суспензии и обусловлено движением суспензии в зоне осевшего над дефектом порошка.

Изделия, покрытые слоем гидрофобной (водоотталкивающей) пленки, нужно контролировать с использованием масляной суспензии.

Если контролю подвергаются детали, имеющие диэлектрические покрытия (оксидные, фосфатные и др.), то в местах соприкосновения с контактными (токоподводящими) устройствами дефектоскопа покрытия должны быть удалены. Если удалять покрытие нельзя, то контроль следует проводить, используя для намагничивания электромагниты или соленоиды либо, если это возможно, индукционный способ намагничивания.

Если объект контроля имеет немагнитное покрытие, то трещина, находящаяся в ферромагнитной основе, дает такой же индикаторный рисунок (широкий и расплывчатый), как и подповерхностный дефект [2–5].

Как на практике определяют напряженность намагничивающего поля вблизи поверхности объекта контроля при полюсном намагничивании?

Если при циркулярном намагничивании с большей или меньшей точностью можно рассчитать напряженность поля у поверхности контролируемой детали, то при полюсном намагничивании сделать это не удастся. Даже если напряженность поля в центре намагничивающего устройства при отсутствии детали известна, напряженность поля на поверхности контролируемой детали следует измерить. Она может быть в несколько раз меньше, чем в центре намагничивающего устройства без детали, особенно когда контролируется короткая толстая деталь. Это обусловлено размагничивающим действием полюсов, образующихся на концах намагничиваемой детали. Истинное значение напряженности поля на поверхности изделия $H_i = H_0 - H_{\square}$, где H_0 – напряженность приложенного поля; H_{\square} – напряженность размагничивающего поля, создаваемого магнитными полюсами на объекте, возникающими при полюсном намагничивании.

Истинное значение напряженности поля на поверхности контролируемого изделия измеряют на практике с помощью приборов с преобразователями Холла, феррозондовыми преобразователями и др. Часто шкала таких приборов проградуирована не в единицах напряженности магнитного поля, а в единицах магнитной индукции. Чтобы определить значение индукции B_{mp} , соответствующее H_{mp} , преобразователь Холла устанавливают на поверхность контролируемого объекта так, чтобы намагничивающее поле было направлено перпендикулярно плоскости чувствительного элемента преобразователя. Увеличивая намагничивающее поле, добиваются того, чтобы показание прибора было $B_{mp} = \mu_0 \mu_r H_{mp}$, где H_{mp} – требуемое значение напряженности магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – магнитная проницаемость воздуха, в котором находится преобразователь, $\mu_r = 1$.

Какова длительность пропускания тока при контроле СОН и СПП?

Длительность пропускания тока при МПД способом остаточной намагниченности составляет от нескольких миллисекунд до 0,5...1 с. Если намагничивание производят переменным током, то измеряют амплитудное значение тока, т. к. остаточная намагниченность зависит от амплитуды его последней полуволны. Для получения стабильной остаточной намагниченности

дефектоскопы содержат тиристорные схемы, позволяющие выключать переменный ток в момент его перехода через нуль.

При контроле *способом приложенного поля* намагничивающий ток пропускают либо непрерывно (в течение всего процесса нанесения суспензии), либо прерывисто. В последнем случае продолжительность включения тока составляет 0,1...0,3 с, а паузы – 1...5 с. Прерывистый режим намагничивания применяют для уменьшения нагрева объекта контроля.

При контроле деталей с малым удлинением переменный ток считают более эффективным, чем постоянный, как при контроле СОН, так и СПП. Рост частоты намагничивающего поля приводит к снижению размагничивающего фактора деталей с удлинением 1...2 и объектов сложной формы. Недостаток переменного поля при контроле СПП – нагревание детали под действием вихревых токов.

Как влияет ориентация дефектов в изделии на выбор способа и определение режима намагничивания?

Выбирают такой способ и схему намагничивания, чтобы угол α между вектором напряженности магнитного поля и направлением распространения дефектов был близок к 90° , т. к. при этом достигается наибольшая чувствительность метода. Если дефекты имеют различную ориентацию или направление их распространения неизвестно, а также если деталь имеет сложную форму, то намагничивание производят как минимум в двух взаимно перпендикулярных направлениях, нанося суспензию и осматривая деталь после каждого намагничивания. Если намагничивание производят в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то при одном из них увеличивают требуемое значение напряженности магнитного поля в 1,4 раза. Это объясняется тем, что хуже всего обнаруживаются трещины, ориентированные под углом 45° к направлению намагничивания. Если напряженность при одном из направлений намагничивания увеличить в 1,4 раз, то составляющая напряженности поля, перпендикулярная такой трещине, будет равна $H_{тр}$.

При магнитопорошковой дефектоскопии деталь поочередно намагничивают в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Нужно ли производить промежуточное размагничивание детали?

Если при проведении магнитного контроля приходится поочередно намагничивать деталь в разных направлениях, то промежуточное размагничивание детали не требуется. То есть намагничивают деталь в одном направлении, наносят на ее поверхность дефектоскопический материал, фиксируют обнаруженные индикаторные рисунки дефектов. Не производя размагничивание детали, ее намагничивают во взаимно перпендикулярном направлении, увеличив режим намагничивания в 1,4 раза, наносят

дефектоскопический материал и обнаруживают дефекты по наличию их индикаторных рисунков.

Как определяют режим при комбинированном виде намагничивания?

При комбинированном виде намагничивания с применением постоянного полюсного и переменного циркулярного магнитных полей напряженность поля полюсного намагничивания устанавливается в соответствии с графиками, изображенными на рис. 4.6. Амплитудное значение напряженности поля циркулярного намагничивания устанавливают в 2–3 раза больше напряженности поля полюсного намагничивания, если вязкость суспензии меньше $20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (водная суспензия, суспензия на основе масла РМ). Если же вязкость суспензии больше $20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (например, трансформаторное масло), то напряженности полей должны быть одинаковыми.

Если в намагничивании участвуют токи одного вида, то напряженности их полей должны быть одинаковыми. При намагничивании двумя токами одного вида – переменным синусоидальным или выпрямленным однополупериодным и двухполупериодным – их фазы должны быть сдвинуты относительно друг друга.

Несколько отличаются требования по выбору режима комбинированного намагничивания *авиационных* деталей. Когда для комбинированного намагничивания применяется двухполупериодное выпрямленное магнитное поле в сочетании с переменным, напряженность первого из них устанавливается по графикам режима намагничивания СПП для уровней чувствительности *Б* и *В*; напряженность поля для уровня чувствительности *А* определяется по тем же графикам, но на 20...30 % выше. Амплитудное значение напряженности переменного магнитного поля и в этом случае следует устанавливать в 2–3 раза больше по сравнению с двухполупериодным выпрямленным.

4.5. Особенности намагничивания постоянным, переменным и импульсным полем

Какие виды тока применяют при намагничивании объектов контроля при магнитопорошковом методе?

При намагничивании объектов применяют постоянный, переменный, импульсный и выпрямленный (однополупериодный, двухполупериодный и трехфазный) ток.

Считают, что постоянный ток наиболее удобен для выявления внутренних дефектов, находящихся в объекте на расстоянии 2...3 мм от поверхности. Однако детали с толщиной стенки более 20...25 мм не следует намагничивать постоянным током, т. к. их трудно размагнитить после контроля. Кроме того,

такие дефекты можно обнаружить, пропуская через объект переменный (и импульсный) ток, если его амплитуду увеличить в 1,5–2 раза по сравнению с амплитудой тока, рассчитанной для выявления поверхностных дефектов. Это справедливо для контроля изделий способом приложенного поля и способом остаточной намагниченности.

Какие требования предъявляют к дефектоскопам, предназначенным для намагничивания изделий переменным током?

Дефектоскопы, в которых намагничивание изделий осуществляется переменным током, при контроле объектов способом остаточной намагниченности должны обеспечивать выключение тока в момент перехода его через нуль. Это позволит получить стабильное значение магнитной индукции в контролируемом ферромагнитном объекте. Последнее условие достигается применением, например, тиристорных схем выключения намагничивающего тока.

В противном случае может произойти частичное размагничивание контролируемого участка объекта.

Какой величины достигает постоянная составляющая тока, возникающая при различных схемах выпрямления переменного тока промышленной частоты?

Если выпрямление осуществлялось по однополупериодной схеме, то постоянная составляющая переменного тока $I_{\text{п}} = 0,3a$, где a – амплитудное значение переменного тока. В случае двухполупериодной схемы выпрямления $I_{\text{п}} = 0,63a$. Постоянная составляющая выпрямленного трехфазного тока составляет $0,8a$.

4.6. Факторы, влияющие на чувствительность магнитопорошкового контроля. Пути повышения эффективности магнитопорошковой дефектоскопии

Какие факторы влияют на чувствительность магнитопорошкового контроля?

На чувствительность магнитопорошковой дефектоскопии влияют магнитные характеристики материала объекта контроля, величина намагничивающего поля, форма, место расположения и ориентация дефектов, шероховатость поверхности, качество и свойства магнитного порошка, способ его нанесения на контролируемое изделие, состав магнитной суспензии. Чувствительность МПД зависит от толщины немагнитного покрытия, соотношения тангенциальной и нормальной составляющих поля на

контролируемом участке, скорости уменьшения намагничивающего поля, формы контролируемой детали и т. д.

Влияет ли на результаты магнитопорошковой дефектоскопии при контроле способом остаточной намагниченности скорость уменьшения намагничивающего поля при его выключении?

При контроле на остаточной намагниченности с использованием полюсного вида намагничивания существенное влияние на результаты контроля оказывает скорость уменьшения намагничивающего поля. Для пояснения рассмотрим намагничивание ферромагнитного цилиндра вдоль его продольной оси с помощью соленоида.

Если намагничивающее поле *убывает медленно*, то тангенциальная составляющая напряженности поля на цилиндрической поверхности образца монотонно уменьшается от значения напряженности приложенного поля, меняет знак и достигает напряженности, которая соответствует остаточной намагниченности объекта. На средней части цилиндра трещины выявляются неудовлетворительно, а на участках, прилегающих к торцевым поверхностям, не выявляются даже крупные трещины. Вектор магнитной индукции в сечении образца не меняет знака.

Если же намагничивающее поле *убывает быстро*, то в объекте контроля возникают вихревые токи (в плоскостях, перпендикулярных продольной оси цилиндра). Векторы напряженности поля вихревых токов параллельны цилиндрической поверхности, т. е. перпендикулярны поперечным поперечным трещинам в образце. Это обуславливает уверенное обнаружение трещин.

Поэтому *при контроле СОН с использованием полюсного намагничивания* в современных магнитопорошковых дефектоскопах применяют устройства, обеспечивающие уменьшение магнитного поля от максимального значения до нуля за время не более 5 мс.

По этой причине *при контроле СОН* вследствие медленного убывания намагничивающего поля *не обеспечивают уверенного обнаружения дефектов следующие способы намагничивания:*

- перемещением короткого соленоида, питаемого постоянным или выпрямленным током, вдоль длинной детали;
- перемещением детали через соленоид, питаемый от источника постоянного или выпрямленного тока;
- в электромагните постоянного тока. Это обусловлено тем, что из-за большой индуктивности обмоток и магнитной вязкости магнитопровода скорость убывания магнитного поля невелика. Если по каким-либо причинам при контроле СОН для намагничивания объекта все же используется электромагнит, то для улучшения выявляемости дефектов магнитное поле

следует уменьшать не путем выключения питания электромагнита, а путем резкого отрыва электромагнита от поверхности детали;

- с помощью электромагнита, питаемого постоянным или выпрямленным током, который уменьшается до нуля потенциометром или автотрансформатором, включенным в цепь выпрямителя.

Как повысить эффективность контроля СПП деталей с большим размагничивающим фактором (имеющих отношение длины к эквивалентному диаметру менее 5) при полюсном намагничивании?

Для улучшения выявляемости дефектов в объектах контроля с большим размагничивающим фактором следует:

- составлять контролируемые детали в цепочку;
- применять удлинительные наконечники;
- использовать переменный намагничивающий ток.

Можно ли контролировать СОН детали с большим размагничивающим фактором?

При контроле деталей сложной формы, а также коротких деталей с отношением $\frac{l}{d} < 3...5$ из-за сильного фона магнитного порошка, ложных его осадений и т. д. применение СПП может оказаться менее эффективным, чем СОН, даже если магнитные характеристики материала контролируемого объекта таковы, что применение СПП должно обеспечить более высокую чувствительность. В этом случае детали с удлинением $\frac{l}{d} < 3...5$ могут быть проконтролированы СОН с использованием для намагничивания импульсного или переменного тока промышленной частоты. Однако вопрос возможности применения СОН для каждой детали отдельно решается службой неразрушающего контроля предприятия.

Рекомендуют ли применять электромагниты постоянного тока при контроле СОН?

Контроль СОН с использованием электромагнитов постоянного тока далеко не всегда обеспечивает высокую чувствительность. Поэтому проводить такой контроль деталей *ответственного назначения* не рекомендуют.

Какой ток следует применять при контроле различных объектов магнитопорошковым методом?

Импульсный ток эффективен для контроля СОН, когда применяют кабели или электромагниты, имеющие малое индуктивное сопротивление (как правило,

для контроля небольших участков крупногабаритных изделий, деталей с малым удлинением). Относительное удлинение детали может достигать 1...2.

Поле, создаваемое *однополупериодным выпрямленным током*, проникает вглубь металла. Оно обеспечивает подвижность частиц, находящихся в сухом магнитном порошке. *При применении сухого магнитного порошка* намагничивание объекта контроля однополупериодным выпрямленным током считается *наилучшим*. Однополупериодный выпрямленный ток может использоваться и при контроле с применением магнитных суспензий. При этом хорошо обнаруживаются поверхностные трещины малого раскрытия. Чаще всего его используют для контроля сварных швов и литья. Следует отметить, что нагревание контролируемой детали и намагничивающего устройства при применении выпрямленного однополупериодного тока слабее, чем при других выпрямленных и переменном токах.

Переменный ток промышленной частоты используют как для контроля СОН, так и СПП. Он более эффективен по сравнению с *постоянным* для контроля деталей с малым удлинением как СОН, так и СПП. Увеличение частоты приводит к уменьшению размагничивающего фактора детали и к улучшению выявляемости поверхностных дефектов в деталях сложной формы, а также с малым удлинением ($\frac{l}{d} < 1...2$). Переменный ток весьма эффективен при обнаружении усталостных трещин, которые всегда развиваются от поверхности. При этом поверхностные неровности создают слабые помехи. Переменное поле способствует приобретению подвижности частицами сухого магнитного порошка. *Недостаток* переменного тока при контроле СПП – нагревание деталей вследствие вихревых токов.

При контроле с применением электромагнитов переменного тока между полюсами электромагнита появляется эллиптическое вращающееся магнитное поле. Оно приводит во вращение конгломераты магнитных частиц. В результате этого конгломераты скатываются с контролируемой зоны и дефекты не обнаруживаются. Для исключения влияния этого явления увеличивают вязкость дисперсионной среды, применяют магнитный порошок с малой коэрцитивной силой, уменьшают длительность включения тока и т. д.

Переносные электромагниты применяют для контроля небольших участков крупногабаритных деталей или деталей, находящихся в узле. Дефекты обнаруживаются на участках, ширина которых равна диаметру (или ширине) полюсного наконечника. Дефекты сплошности не обнаруживаются в областях шириной 10...20 мм, прилегающих к полюсам, т. к. для них $\frac{H_n}{H_\tau} > 3$, где H_n – нормальная, а H_τ – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля. Это происходит потому, что

частицы магнитного порошка вымываются из этих областей под действием пондеромоторной силы.

Важным достоинством *постоянного тока* является то, что он проникает вглубь металла, а потому позволяет обнаруживать подповерхностные дефекты. Если при контроле применяют *постоянный* или *двухполупериодный выпрямленный* ток, то контроль проводят с использованием магнитных суспензий.

Контроль СОН с применением электромагнитов постоянного тока часто не обеспечивает высокой чувствительности. Поэтому для контроля деталей *ответственного назначения* его не используют.

При локальном контроле крупногабаритных изделий для намагничивания применяют *постоянные магниты с П-образным сердечником*. Контроль проводят способом приложенного поля. Как и в случае использования электромагнитов, в зонах, прилегающих к полюсам, дефекты не выявляются. Ширина указанных зон – от 10 до 20 мм. При применении постоянных магнитов используют масляную суспензию [2].

4.7. Особенности применения вращающегося магнитного поля

Какие объекты целесообразно контролировать во вращающемся магнитном поле?

Намагничивание во вращающемся магнитном поле используют при контроле *на остаточной намагниченности* объектов сложной формы, а также объектов с большим размагничивающим фактором, с ограниченной контактной площадью или с нетокопроводящими гальваническими покрытиями.

Вращающееся магнитное поле целесообразно применять и для контроля деталей с диэлектрическими покрытиями, когда нет возможности удалить покрытие, а также использовать другой вид намагничивания, например циркулярный, из-за отсутствия центрального отверстия.

Контроль во вращающемся магнитном поле позволяет полностью исключить возможность появления прижогов на поверхности деталей, а также их механических повреждений и наклепа при применении зажимных устройств.

Как устроен дефектоскоп вращающегося поля и как контролируют детали в нем?

В дефектоскопе вращающегося поля используются намагничивающие катушки, расположенные, как и в статоре электродвигателя. Напряженность поля такого устройства по мере приближения к периферии резко возрастает. Наибольшая напряженность магнитного поля имеет место в «наружной трубке» внутреннего рабочего пространства намагничивающего устройства. Ее называют *областью уверенного выявления дефектов*.

Если размеры детали таковы, что она выходит за пределы указанной области, то деталь контролируют по частям. С этой целью в течение 0,5 с намагничивают первый участок детали, извлекают деталь из устройства, наносят суспензию, осматривают. Затем, не размагничивая, деталь снова помещают в устройство, но так, чтобы в области уверенного выявления находился ее второй участок, проверяют его и т. д. *Контроль во вращающемся магнитном поле производят способом остаточной намагниченности.* Вид контроля эффективен, если деталь выполнена из материала, имеющего коэрцитивную силу не менее 2000 А/м.

Суперпозиция каких полей участвует в формировании магнитного поля дефекта при контроле во вращающемся магнитном поле?

Образование полей рассеяния дефектов происходит под действием суперпозиции внешнего вращающегося поля и поля индуцированных в детали вихревых токов. При этом вихревые токи играют основную роль, т. к. вектор напряженности вращающегося поля почти нормален к цилиндрической контролируемой поверхности детали (продольные оси детали и цилиндрического рабочего пространства намагничивающей катушки совпадают).

4.8. Сухой магнитный порошок. Магнитные суспензии. Магнитные индикаторные пакеты. Магнитные пасты. Магнитогумированная паста. Нанесение дефектоскопического материала на объект контроля. Проверка дефектоскопических свойств магнитного порошка и суспензии

Что Вам известно о магнитных порошках, используемых для индикации магнитных полей рассеяния, создаваемых дефектами?

Наиболее распространены для этих целей окись-закись железа – магнетит (Fe_3O_4) – порошок черного или темно-коричневого цвета и γ -окись железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) – буровато-красный порошок. Применяют также цветные магнитные порошки, которые получают либо путем окраски темных магнитных порошков, либо подбором химических соединений, имеющих определенный цвет и магнитные свойства. При окрашивании темных магнитных порошков увеличивается их объем, что снижает их чувствительность. Цветные магнитные порошки используют для контроля деталей с темной поверхностью. Для этих же целей применяют магнитно-люминесцентные порошки (а осмотр объекта производят в ультрафиолетовом свете), цветные магнитные порошки либо черный порошок после нанесения на деталь белой нитроокраски при толщине ее слоя до 20 мкм. Нитроокраску наносят на поверхность объекта при отсутствии на ней покрытия.

Частицы магнитного порошка должны быть легкими и подвижными. Не обладают достаточной подвижностью сферические частицы. Поэтому в порошке должны присутствовать также частицы неправильной формы. Дополнительную подвижность частицам магнитного порошка можно придать, покрыв их пигментом с низким коэффициентом трения. При этом цвет пигмента должен быть таким, чтобы обеспечивался максимальный контраст порошка на фоне поверхности контролируемого объекта.

Частицы соединяются друг с другом в короткие цепочки, которые накапливаются над дефектами. Для обеспечения высокой выявляемости трещин размер отдельных частиц порошка не должен превышать 15 мкм (рис. 4.8).

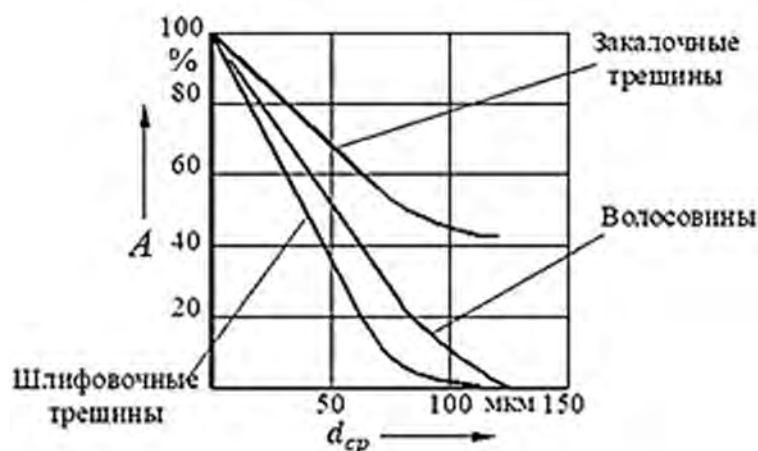


Рис. 4.8. Влияние размеров частиц порошка на чувствительность магнитопорошкового метода контроля: $H = 160$ А/см; вес пробы порошка – 9...10 г

При МПД преимущественно применяют магнитные порошки с размером частиц 1...60 мкм, а иногда и более. Размер частиц основной массы магнитного порошка не должен превышать 30 мкм (преимущественно 5...10 мкм). Количество крупных частиц (более 50 мкм) должно составлять не более 5 %. Магнитный порошок может содержать не более 5 % различных немагнитных примесей. Концентрат магнитного порошка содержит частицы размером около 0,2 мкм.

Для выявления глубоко залегающих дефектов используют более крупный магнитный порошок. При контроле объектов с очень грубой поверхностью размеры частиц могут достигать 2 мм.

Какими магнитными свойствами должны обладать частицы магнитного порошка, применяемого для магнитопорошковой дефектоскопии?

Считается, что однозначной связи между выявляющей способностью магнитных порошков и их магнитными характеристиками нет. Обычно в

качестве индикатора магнитных полей рассеяния используют магнитный порошок с *большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой*. Чем больше магнитная проницаемость частиц магнитного порошка, тем легче они втягиваются слабыми магнитными полями рассеяния дефектов и тем легче обнаруживаются небольшие дефекты. Чтобы предотвратить слипание частиц магнитного порошка после намагничивания, магнитная проницаемость их должна быть максимальной.

Слабая остаточная намагниченность позволяет легко удалять частицы с поверхности объекта контроля, но и индикаторные рисунки плохо удерживаются на поверхности. Для выявления поверхностных дефектов частицы должны иметь небольшую коэрцитивную силу, а для обнаружения глубоких дефектов более эффективны частицы с большой H_c .

Существенное влияние на выявляющую способность порошков оказывают величина частиц, их форма и некоторые другие факторы, которые в совокупности играют более важную роль, чем магнитные характеристики. Так, пульсирующее намагничивающее поле улучшает подвижность частиц магнитного порошка и, следовательно, повышает его выявляющие свойства.

Каковы особенности применения сухого магнитного порошка при магнитопорошковой дефектоскопии?

Сухой магнитный порошок используют при контроле ферромагнитных объектов с *грубой поверхностью* (грубо обработанной или необработанной послековки, прокатки и т. д.) Частицы сухого порошка не скапливаются в неровностях поверхности в отличие от магнитных частиц суспензии. *Контроль осуществляют СПП*, причем, чтобы обеспечить подвижность частиц магнитного порошка, *следует применять пульсирующее магнитное поле* (лучше всего для намагничивания использовать однополупериодный выпрямленный ток). «Сухой» метод *более чувствителен при обнаружении подповерхностных (особенно глубинных) дефектов*, чем «мокрый». Это объясняется тем, что магнитная суспензия обладает определенной вязкостью и для перемещения частицы в ней требуется большая сила, чем для перемещения той же частицы в воздухе. Широко применяют сухой магнитный порошок для обнаружения трещин, усадочных раковин, надрывов в крупногабаритных отливках. При этом намагничивание осуществляют с помощью электроконтактов.

Недостаток – сухие магнитные порошки весьма *чувствительны к воздушным потокам*, которые могут уносить их с поверхности. Поэтому следует принимать меры для устранения сквозняков или конвекционных потоков воздуха, которые могут возникать, например, вследствие нагрева изделий при циркулярном намагничивании сильным током. Кроме того, сухие магнитные порошки *не обеспечивают высокой чувствительности при обнаружении узких*

поверхностных трещин, особенно на гладкой, расположенной не горизонтально поверхности [2–5].

Как наносят высокодисперсный и грубодисперсный сухой магнитный порошок на поверхность объекта контроля?

Высокодисперсный магнитный порошок (с размером частиц 0,1...10 мкм) на деталь наносят в виде воздушной взвеси, получаемой распылением порошка в специальных установках, а также погружением в емкость с порошком. Такой порошок используют для обнаружения подповерхностных дефектов и дефектов, находящихся под слоем немагнитного покрытия толщиной 100...200 мкм.

Грубодисперсный сухой магнитный порошок (с размером частиц 0,05...2,0 мм) наносят с помощью пульверизатора, резиновой груши, сита. Применяют его для обнаружения сравнительно крупных поверхностных и подповерхностных дефектов, для контроля деталей с грубо обработанной поверхностью.

В каких случаях используют способ воздушной взвеси?

Способ воздушной взвеси применяют для выявления подповерхностных дефектов, а также несплошностей, находящихся под слоем немагнитного покрытия толщиной от 100 до 200 мкм. Для этих целей используют высокодисперсный сухой магнитный порошок с размерами частиц 0,1...10 мкм. При этом частицы магнитного порошка должны медленно распределяться по поверхности объекта контроля, не ударяясь об нее.

Почему при нанесении магнитного порошка на объект контроля способом воздушной взвеси мелкие частицы магнитного порошка парят в потоке воздуха?

Это объясняется большим отношением площади поперечного сечения мелкой частицы к ее массе. Поясним изложенное. Пусть частица магнитного порошка имеет шарообразную форму. Ее масса пропорциональна объему $\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)$, т. е. третьей степени радиуса, а сечение, на которое действует воздушный поток, – пропорционально второй степени радиуса πr^2 . Если радиус частицы уменьшится в 100 раз, то ее масса уменьшится в 10^6 раз, а максимальное сечение – только в 10^4 раз. То есть с уменьшением частицы ее масса убывает быстрее, чем наибольшее сечение, а потому отношение площади поперечного сечения мелкой частицы к ее массе будет огромно. Поэтому мелкие магнитные частицы легко переносятся потоком воздуха, а крупные – падают.

Что собой представляет магнитная суспензия?

Магнитная суспензия представляет собой взвесь магнитного или люминесцентного магнитного порошка с размером частиц до 10...15 мкм в дисперсионной среде, содержащей улучшающие смачиваемость, антикоррозионные, а при необходимости, антивспенивающие, антикоагулирующие и другие добавки. Так, для предотвращения слипания частиц в коллоид вводят такие поверхностно-активные вещества (ПАВ), как эмульгатор ОП-5, ОП-7, стабилизационную присадку Акор-1 (1...0,5 г/л), сульфанол и др. Антикоррозионные свойства водной суспензии могут быть повышены путем добавления в нее моноэтаноламина ((4 ± 1) г/л), щелочи, жидкого стекла. Добавление мыла (5...6 г/л) улучшает смачиваемость поверхности объекта контроля.

Каковы особенности магнитопорошкового контроля, основанного на применении магнитных суспензий?

Для выявления трещин в деталях с хорошо обработанными поверхностями (шлифовкой, полированием) служит жидкая магнитная суспензия. Суспензии очень чувствительны к трещинам малого раскрытия благодаря тому, что дисперсионная среда удерживает частицы магнитного порошка вблизи поверхности. Причем хорошие результаты получаются как при применении СПП, так и СОН. Магнитные суспензии можно наносить погружением объекта контроля в суспензию, поливом, а также аэрозольным способом.

При контроле объектов с грубой поверхностью магнитные суспензии не так эффективны, как сухие порошки. Менее эффективны суспензии и при обнаружении глубинных дефектов.

Какие свойства магнитной суспензии влияют на выявляемость дефектов?

На выявляющую способность магнитной суспензии влияют состав, концентрация и свойства отдельных ее компонентов. Если магнитная суспензия приготовлена из частиц, которые остаются постоянно взвешенными в среде и не оседают, то в этом случае дефекты не будут обнаружены. Дисперсионная среда магнитной суспензии должна иметь вязкость не более $30 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Магнитные частицы меньше некоторого размера не осаждаются в применяемой дисперсионной среде.

Приблизительно качество магнитной суспензии можно оценить по времени осаждения магнитного порошка. С этой целью заливают магнитную суспензию в стеклянный сосуд, тщательно взбалтывают ее и дают возможность отстояться. Время осаждения частиц зависит от их размера, формы, а также вязкости дисперсионной среды. Суспензию считают качественной, если примерно через 30 мин она разделяется на слой чистой жидкости и слой частиц.

Какие дисперсионные среды применяют при магнитопорошковой дефектоскопии для приготовления магнитных суспензий?

В качестве дисперсионной среды используется вода, минеральные масла, керосин, трансформаторное масло, смесь трансформаторного масла и керосина. Нормативные документы Белорусской железной дороги рекомендуют в качестве дисперсионной среды применять также дизельное топливо.

Спиртовые суспензии повышают чувствительность метода, но удорожают контроль.

Водная суспензия, кроме воды, содержит антикоррозионные и поверхностно-активные добавки, а также вещества, препятствующие пенообразованию и улучшающие смачиваемость контролируемой поверхности.

Трансформаторное масло может быть использовано для приготовления суспензий с использованием флуоресцентного магнитного порошка, если применяемое масло не обладает флуоресцентным свечением в ультрафиолетовом свете.

Какой механизм действия поверхностно-активных веществ в суспензии?

Частицы магнитного порошка в суспензии соединяются в агрегаты под действием молекулярных сил. Эти силы возникают вследствие большой поверхностной энергии частиц. Для снижения интенсивности укрупнения частиц в суспензию вводят ПАВ, молекулы которых имеют дипольное строение. В результате адсорбции таких молекул на частицах порошка последние приобретают электростатический заряд одинакового знака. Вследствие этого между частицами появляются силы отталкивания, препятствующие их соединению в агрегаты.

Каким требованиям должна удовлетворять дисперсионная среда магнитной суспензии?

Дисперсионная среда должна удовлетворять следующим требованиям:

- иметь вязкость при температуре проведения контроля не более $30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- хорошо смачивать поверхность контролируемой детали;
- не быть коррозионно-активной по отношению к объекту контроля;
- не иметь резкого запаха;
- не быть токсичной.

Приведите пример состава магнитной суспензии.

Состав водной магнитной суспензии.

1. Черный магнитный порошок – (25 ± 5) г, хромпик калиевый ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) – (4 ± 1) г, сода кальцинированная (Na_2CO_3) – (10 ± 1) г, эмульгатор ОП-7 (или ОП-10) – (5 ± 1) г, вода водопроводная – до 1 л.

2. Черный магнитный порошок – (20 ± 5) г, углекислый натрий – (10 ± 1) г, хозяйственное мыло – (15 ± 5) г, вода – 1 л.

3. Черный магнитный порошок – (20 ± 5) г, хозяйственное мыло – 1 г, кальцинированная сода – (12 ± 2) г, вода – 1 л.

Для приготовления суспензии растворяют в воде, нагретой до температуры 40...50 °С, поверхностно-активные и антикоррозионные вещества, затем магнитный порошок смешивают с небольшим количеством дисперсионной среды до получения сметанообразной консистенции, после чего добавляют в полученную массу дисперсионную среду, доводя ее до нужной концентрации.

Замечание. Водную магнитную суспензию следует предохранять от попадания масла, т. к. оно вызывает коагуляцию магнитного порошка. Это снижает чувствительность метода.

Состав керосино-масляной суспензии.

1. В состав суспензии входят керосин и трансформаторное масло в равных количествах, а также черный магнитный порошок при концентрации 5...6 г/л.

2. Суспензия состоит из (20 ± 5) г черного магнитного порошка, 0,5 л трансформаторного масла и 0,5 л керосина.

Состав масляной суспензии.

1. Суспензия включает (20 ± 5) г черного магнитного порошка и 1 л масла РМ.

2. В состав суспензии входят черный магнитный порошок (ТУ 6-14-1009–79) в количестве (20 ± 5) г и 1 л трансформаторного масла. Если контроль осуществляется при низкой температуре, то в масло можно добавить керосин.

Допускается ли изменять концентрацию магнитного порошка в магнитной суспензии?

Как правило, концентрация магнитного порошка в суспензии должна составлять (25 ± 5) г/л, а магнитно-люминесцентного – (4 ± 1) г/л. Однако содержание порошка в суспензии зависит от способа контроля, напряженности магнитного поля, формы контролируемой поверхности и т. д. Поэтому в технически обоснованных случаях допускается устанавливать другие значения концентрации магнитного порошка в суспензии.

Например, при контроле резьб, а также других объектов, если при намагничивании используют магнитные поля напряженностью 100 А/см и выше, содержание магнитного порошка уменьшают до 5 г/л.

Для контроля различных *силовых деталей СОН* (валы, шестерни, балки, цилиндры, лонжероны и т. д.) применяют керосиновую, масляную суспензию, их смесь либо водную магнитную суспензию при концентрации магнитного порошка 20...25 г/л.

Если контролируют *места перехода головки болта к цилиндрической части, галтельные переходы в деталях*, то используют водную или керосиновую суспензию с концентрацией магнитного порошка 10...15 г/л.

При контроле *деталей в узле без его демонтажа* применяют суспензию на основе 50 % керосина и 50 % трансформаторного масла с содержанием магнитного порошка 20...25 г/л.

Если в процессе контроля *мелких резьб* (менее М12) возникают трудности в расшифровке индикаторных рисунков при использовании суспензии с нормальной концентрацией магнитного порошка, то применяют керосиновую или водную суспензию с концентрацией порошка 5...7 г/л.

Если контроль объекта производят СПП и намагничивают его с помощью электромагнита при $H \leq 12000$ А/м, то используют магнитную суспензию на основе масла или смеси керосина и масла в равных количествах при концентрации магнитного порошка 5...6 г/л. Если же $H \geq 12000$ А/м, то применяют дисперсионную среду на основе масла МК-8 или трансформаторного масла с содержанием магнитного порошка 3...5 г/л [2].

Каковы особенности применения флуоресцентных магнитных порошков при магнитопорошковой дефектоскопии?

Осмотр контролируемой поверхности при использовании флуоресцентного магнитного порошка осуществляют в ультрафиолетовом свете (например, с применением ультрафиолетового облучателя КД-3-3Л). Дисперсионная среда суспензий с люминесцентными магнитными порошками не должна ухудшать светокolorистических свойств порошка, а ее собственная люминесценция не должна искажать результаты контроля. В частности, *нельзя использовать для приготовления магнитно-люминесцентных суспензий трансформаторное масло*, которое само обладает флуоресцентным свечением в ультрафиолетовом свете.

С какой целью иногда размагничивают магнитный порошок в суспензии?

Чтобы устранить магнитную коагуляцию порошка, снижающую его выявляющую способность, производят размагничивание магнитного порошка в суспензии с помощью соленоида переменного тока. С этой целью шланг для стекания суспензии в накопительный бак и поливной шланг пропускают внутри размагничивающих соленоидов, запитанных от источника переменного тока. В этом случае суспензия будет содержать меньше агрегатов и длинных цепочек магнитных частиц, которые создают общий фон и затрудняют расшифровку индикаторных рисунков дефектов.

Как осуществляют подготовку поверхности детали перед применением водной и масляной суспензии?

В случае использования водной суспензии поверхности деталей должны быть обезжирены, т. е. тщательно промыты органическими растворителями (бензи-

ном, ацетоном) или другими средствами, не содержащими легко воспламеняющихся веществ, например, водными растворами препаратов МС-8, МС-15.

В случае применения масляной суспензии, кроме названных препаратов, могут быть использованы растворы препарата МС-6.

С помощью каких средств и способов наносят магнитную суспензию на объект контроля?

Магнитную суспензию на контролируемую поверхность наносят путем полива из шланга, резиновых груш, бачков, пипеток, путем погружения в ванну, а также аэрозольным способом. Если суспензию наносят поливом, то делают это слабой струей, чтобы не смыть осевший над дефектами магнитный порошок. Суспензия должна стекать с контролируемой поверхности. Поэтому деталь располагают так, чтобы контролируемая поверхность располагалась с небольшим наклоном. Суспензию нужно постоянно взбалтывать, чтобы магнитный порошок не оседал на дно бачка.

Почему сухой магнитный порошок позволяет обнаруживать более глубоко расположенные в объекте контроля дефекты, чем магнитная суспензия?

Дисперсионная среда имеет определенную вязкость и оказывает большее сопротивление движению магнитных частиц в направлении дефекта по сравнению с воздухом. Поэтому при обнаружении глубоко расположенных дефектов чувствительность может быть повышена, если в качестве дефектоскопического материала применить сухой магнитный порошок. Однако при этом движение воздуха ухудшает условия обнаружения дефектов. Поэтому следует принимать меры, устраняющие сквозняки или конвекционные потоки воздуха, что имеет место, например, при циркулярном намагничивании объекта сильным током, который нагревает объект.

Когда при контроле СПП и СОН на поверхность объекта наносится суспензия?

При контроле СПП нанесение магнитной суспензии на поверхность объекта осуществляется во время его намагничивания *до выключения поля*. Возможно и предварительное нанесение суспензии до создания намагничивающего поля.

При контроле СОН нанесение суспензии на поверхность детали осуществляют не позднее, чем через час после прекращения намагничивания объекта.

Таким образом, при контроле СПП накопление магнитного порошка над дефектом происходит в основном в приложенном поле, а при СОН – в поле остаточной намагниченности объекта.

Как удаляют остатки магнитной суспензии с объекта контроля?

Способ удаления остатков магнитной суспензии зависит от дисперсионной среды, на которой приготовлена суспензия, а также назначения и особенностей эксплуатации объекта после контроля. Так, керосиновая суспензия с детали может быть удалена промывкой бензином.

Если контролю предшествовало нанесение контрастной краски и использовали керосино-масляную суспензию, то для ее удаления применяют ацетон.

Водная суспензия может быть удалена струей воды с последующим промоканием ветошью и просушкой горячим воздухом. В случае использования водных суспензий для контроля деталей из высокопрочных сталей, в том числе имеющих защитные покрытия (хром, кадмий, кадмий и оксидный фосфат), объекты контроля должны быть промыты водой и просушены горячим воздухом не позднее, чем через 6 ч после контроля.

С некоторых объектов остатки магнитной суспензии (включая и керосино-масляную) удаляют протиркой ветошью и просушкой воздухом.

Как устроены магнитные индикаторные пакеты, применяемые для магнитопорошковой дефектоскопии?

Магнитные индикаторные пакеты являются упаковкой для магнитной суспензии. Верхняя часть пакета изготовлена из прозрачного пластика. Нижняя, прилегающая к поверхности контролируемого изделия, для повышения контрастности изображения имеет белый цвет. Ее толщина составляет не более 30...50 мкм. Перед выполнением контроля содержимое пакета тщательно перемешивают, чтобы получить однородную среду. Если контроль производят в приложенном магнитном поле, то вначале пакет прикладывают к контролируемой поверхности, а затем включают ток в катушке электромагнита намагничивающего устройства.

Основные достоинства магнитопорошковой дефектоскопии при применении магнитных индикаторных пакетов – снижение расхода суспензии, перспективность использования метода для подводной дефектоскопии, исключение возможности снижения чувствительности контроля вследствие загрязнения полости дефекта магнитными частицами при многократной дефектоскопии. При подготовке поверхности объекта контроля не требуется удаление с нее жира и влаги, нужна лишь очистка от загрязнений. Нет необходимости покрывать контролируемую поверхность белой нитрокраской. МПД с использованием магнитных индикаторных пакетов позволяет достичь любого уровня чувствительности (А, Б, В) по ГОСТ 21105–87.

Как осуществляют проверку дефектоскопических свойств магнитного порошка и магнитной суспензии при поверке?

Проверка качества магнитных порошков и суспензий для магнито-порошковой дефектоскопии может осуществляться по следующим параметрам: дисперсность порошка, его магнитные свойства, концентрация в суспензии, кинематическая вязкость дисперсионной среды, цвет и др.

Дисперсность магнитного порошка определяют методом отстоя в этиловом спирте или просеиванием через сетку № 0053 (ГОСТ 6613–73). В первом случае в стеклянную трубку длиной 400 мм с внутренним диаметром 10 мм заливают этиловый спирт до высоты столба 300 мм и засыпают в нее 3 г исследуемого магнитного порошка. После взбалтывания полученную спиртовую суспензию устанавливают в штатив для отстоя в течение 3 мин. Порошок считают пригодным, если высота темной части столба жидкости будет не менее 180 мм.

Магнитно-весовой пробой называют количество порошка, удерживаемого специальным электромагнитом с латунной прокладкой. Магнитно-весовая проба магнетита должна быть не менее 7 г, окрашенных порошков – не менее 10 г.

Концентрацию магнитного порошка в суспензии можно определить приборами К-1, АКС-1, АКС-1с и др. Для этого суспензию заливают в стеклянную воронку, которую охватывает электрическая обмотка. Включают ток в обмотке. Под действием магнитного поля происходят быстрая коагуляция магнитных частиц в воронке и выпадение их в осадок. По высоте осадка в измерительной части воронки определяют концентрацию магнитного порошка. Содержание магнитного порошка в пересчете на 1 л должно быть (20 ± 5) г, а магнитно-люминесцентного порошка – (4 ± 1) г.

Кинематическая вязкость масляной и керосино-масляной дисперсионной среды определяется вискозиметром. При этом вязкость не должна превышать $30 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Если вязкость суспензии выше $10 \cdot 10^{-6}$ м²/с, то техническая документация должна содержать информацию о времени стекания суспензии, после которого разрешается выполнять осмотр объекта контроля.

Содержание хромпика калиевого, соды кальцинированной и эмульгатора в водной суспензии определяют химическим анализом.

Обобщенную проверку качества магнитных порошков и суспензий проводят не менее чем на двух стандартных образцах: с грубыми дефектами вида закалочной трещины и с тонкими – вида шлифовочных трещин. Методика изготовления стандартных образцов приведена в ГОСТ 21105–87. При проверке качества магнитного порошка или суспензии сравнивают индикаторный рисунок осаждения магнитного порошка над трещинами образца с индикаторным рисунком этих же дефектов при заведомо хорошей суспензии и исправном дефектоскопе. Отношение общей длины валиков магнитного порошка индикаторного рисунка, образованных на образце, имеющем дефекты,

с помощью исследуемого индикаторного материала, к общей длине валиков порошка, которые образовались на той же детали при использовании порошка, принятого в качестве образцового, характеризует выявляющие свойства суспензии и работоспособность дефектоскопа.

Замечание. Свойства сухого магнитного порошка и суспензии нужно проверять перед каждой сменой *на контрольных образцах*. Его проверяют путем выявления трещин на контрольных образцах в приложенном магнитном поле. Для этого соленоид надевают на контрольный образец с трещиной, поверхность образца опыляют порошком и включают переменный ток. При этом частицы порошка должны собраться у трещины и четко обрисовать ее контур.

Для чего при МПД применяют магнитные пасты?

Магнитные пасты служат для приготовления магнитных суспензий и содержат все необходимые для этого вещества. Дефектоскопист должен развести некоторое количество пасты в соответствующей дисперсионной среде. В зависимости от типа используемой жидкой среды магнитные пасты подразделяются на водные и масляные.

Магнитная паста представляет собой густую смесь, содержащую магнитный или магнитно-люминесцентный порошок, связующую (легко растворяющуюся в воде или масле), ПАВ, активспенивающие, антикоррозионные и другие добавки.

Для магнитопорошковой дефектоскопии широко применяют магнитные пасты: черную водяную ЧВ-1, красную водяную КВ-1, красную керосино-масляную КМ-К, магнитно-люминесцентные зеленые МЛ-1 и МЛ-2 и др.

Какой должна быть концентрация магнитной пасты в дисперсионной среде?

Если применяют пасту ЧВ-1 черного цвета, используя в качестве дисперсионной среды водопроводную воду, то оптимальная концентрация материала в дисперсионной среде (60 ± 3) г/л (в этом случае концентрация магнитного порошка в суспензии составит $(30 \pm 1,5)$ г/л).

При применении пасты КВ-1 красного цвета для приготовления водной суспензии оптимальная концентрация (80 ± 4) г/л (концентрация порошка – $(30 \pm 1,5)$ г/л).

В случае использования пасты КМ-К (МП-75) красного цвета для приготовления суспензии на основе трансформаторного масла, керосина, керосино-масляной смеси оптимальная концентрация материала в дисперсионной среде должна составлять (40 ± 2) г/л (концентрация порошка в среде составит (20 ± 1)).

Если применяется магнитно-люминесцентная паста МЛ-1 для приготовления водной суспензии, то оптимальная концентрация ее должна состав-

лять (42 ± 2) г/л. В этом случае концентрация магнитного порошка в суспензии составит ($5 \pm 0,25$) г/л.

При использовании *концентрата* магнитного порошка в инструкции по его применению будет указана необходимая концентрация в дисперсионной среде (обычно 5...7 г/л). Концентрат магнитного порошка содержит в своем составе все ингредиенты, необходимые для приготовления магнитной суспензии. Для приготовления суспензии следует развести требуемое количество *концентрата* порошка в соответствующей дисперсионной среде [2–5].

Что такое магнитогумированная паста?

Магнитогумированная паста представляет собой смесь магнитного порошка и затвердевающих органических полимерных веществ. Ее применяют для дефектоскопии стенок полостей в деталях. Существуют магнитогумированные пасты с временем затвердевания от нескольких десятков секунд до 6 ч.

В каких случаях и как применяют способ магнитогумированной пасты?

Способ магнитогумированной пасты применяют при контроле стенок полостей диаметром менее 20 мм при отношении глубины к диаметру не менее 1 к 10. Магнитогумированную пасту готовят непосредственно перед контролем и наносят на контролируемую поверхность намагниченной детали в жидком виде, не допуская образования в ней пузырьков воздуха. После затвердевания полученную реплику извлекают и по наличию скоплений магнитного порошка на ней судят о наличии трещин в стенке полости. Для улучшения извлечения реплик контролируемую поверхность целесообразно перед заполнением полости пастой смочить минеральным маслом РМ. Известны пасты с временем затвердевания от 30 с до 6 ч. Реплика позволяет сохранить индикаторные рисунки, а также дает возможность использовать оптические и другие средства для ее исследования.

По данным литературы, контроль объектов с использованием магнитогумированной пасты осуществляют СОН. Поэтому при контроле СПИ дефекты будут обнаруживаться с помощью магнитогумированной пасты с пониженной чувствительностью. Выявляющая способность магнитогумированной пасты составляет 70...75 % от выявляющей способности суспензии, приготовленной на основе трансформаторного масла.

4.9. Осмотр деталей. Типичные признаки дефектов по картине осаждения магнитного порошка

Как производят осмотр деталей при магнитопорошковой дефектоскопии?

При контроле СОН осмотр производят после извлечения детали из ванны или полива (после стекания основной массы суспензии), если применяют керосиновую или водную суспензию, и не ранее чем через 4...6 мин, если используют масляную суспензию.

При контроле СПП, согласно ГОСТ 21105–87, осмотр проводят после прекращения намагничивания.

Осмотр контролируемой поверхности и регистрацию индикаторных рисунков выявляемых дефектов проводят визуально или с применением систем обработки изображений. При визуальном осмотре могут быть использованы различные оптические устройства (лупы, микроскопы, эндоскопы). Выбираемое увеличение оптического устройства зависит от шероховатости поверхности детали, вида и типа обнаруживаемых дефектов, условий контроля и т. д. и, как правило, не превышает 24 крат (обычно 2...4 крат).

Освещенность контролируемой поверхности при использовании магнитных порошков естественной окраски должна быть не менее 1000 лк. При этом следует применять комбинированное освещение (общее и местное).

При использовании люминесцентных магнитных порошков осмотр контролируемой поверхности следует проводить при ультрафиолетовом облучении источником с длиной волны 315...400 нм. Для этих целей могут быть использованы ультрафиолетовый облучатель КД-3-3Л и облучатели, входящие в комплект дефектоскопа. Ультрафиолетовая облученность контролируемой поверхности должна быть не менее 2000 мкВт/см².

Детали с немагнитными покрытиями иногда осматривают, не извлекая их из суспензии. Для этого применяют экраны с прозрачным дном, выполненные по профилю контролируемой детали. Осмотр могут производить и без экранов. Для этого деталь погружают в суспензию на глубину, при которой контролируемая поверхность покрыта слоем суспензии толщиной 1...2 мм. Через этот слой суспензии производят осмотр детали. Описанный способ позволяет обнаруживать дефекты, находящиеся под слоем немагнитного покрытия толщиной 80...100 мкм.

При контроле шлифованных поверхностей осмотр целесообразно проводить в рассеянном свете или покрывать блестящую поверхность слоем краски толщиной до 20 мкм, например, нитроэмалью НЦ-25.

Если на поверхности контролируемой детали имеется покрытие, то нитрокраску не наносят.

Каковы типичные признаки дефектов по картине осаждения магнитного порошка?

Поверхностные трещины создают узкий и четкий индикаторный рисунок, *подповерхностные* – широкий и расплывчатый. Если на поверхности контролируемого объекта имеется немагнитное покрытие, то индикаторный рисунок, создаваемый находящейся в нем трещиной, будет такой же, как и в случае подповерхностного дефекта.

Над *закалочными трещинами* накопление магнитного порошка имеет вид плотных извилистых рельефных линий.

Индикаторные рисунки *шлифовочных трещин* имеют вид тонких четких линий, представляющих собой сетку или короткие черточки.

Усталостные трещины обнаруживаются индикаторными рисунками в виде резко очерченных плотных, четких линий, полос или жилок чаще всего в местах концентраций напряжений.

Термические трещины выявляются так же, как и шлифовочные. Они располагаются на поверхностях трения.

Индикаторные рисунки *волосовин* обнаруживаются в виде прямых линий различной длины, расположенных вдоль волокон.

Неметаллические (шлаковые) включения выявляются индикаторными рисунками в виде цепочек или точечных скоплений.

Индикаторные рисунки *надрывов* имеют вид скобочек, часто по всей поверхности или большей ее части. После удаления магнитного порошка надрывы можно увидеть с помощью лупы. Иногда в поверхностном слое заметны места с выкрошившимся металлом.

Индикаторные рисунки *флокенов* наблюдаются в виде отдельных прямолинейных или искривленных черточек длиной до 30 мм, расположенных преимущественно группами и имеющих различное направление.

Закаты обнаруживаются, как правило, в приложенном поле. Их индикаторные рисунки имеют вид серии извилистых линий.

4.10. Мнимые дефекты. Отстройка от мешающих факторов при магнитопорошковой дефектоскопии

Что такое мнимые дефекты?

Магнитные поля рассеяния возникают не только над дефектами. Образование поля рассеяния может происходить при структурной неоднородности, по месту раздела двух структур, по границам зон термического влияния и границам сварных швов, по волокнам металла при ярко выраженной текстуре, при наличии концентрации механических напряжений, карбидной полосчатости и ликвации, в местах повышенной шероховатости поверхности,

при резком сужении детали, по следу соприкосновения намагниченной детали с каким-либо ферромагнитным предметом, в местах наклепа, по рискам, ворсинкам от тканей, на острых кромках деталей и т. д.

Существуют специальные приемы, позволяющие отличить мнимый дефект от реального.

Укажите пути устранения мнимых дефектов.

Для отстройки от мешающих факторов при МПД весьма часто производят повторное намагничивание и контроль детали, проводят отжиг объекта, а в сомнительных случаях дублируют контроль капиллярным методом.

Причиной мнимых дефектов может быть *изменение поперечного сечения объекта контроля и его геометрии* (внутренние полости, пазы, резкое изменение сечения объекта). Если ожидаются усталостные трещины в области таких элементов, то для обнаружения дефектов следует применить более слабое намагничивающее поле или, например, в отверстие вставить болт.

Мнимые дефекты могут появляться и вследствие *неудовлетворительной подготовки контролируемой поверхности* (частицы порошка скапливаются в местах масляных загрязнений, оставшейся окалины, лакокрасочных покрытий, сильной шероховатости поверхности). Для их устранения следует более тщательно зачищать контролируемую поверхность.

Чрезмерное намагничивание может привести к образованию полей рассеяния на кромках, торцах, в углах деталей. Ориентиром для дефектоскописта в данном случае может быть скопление магнитного порошка в местах резкого изменения поперечного сечения детали.

Вследствие уменьшения магнитной проницаемости материала *в зоне термического влияния* может наблюдаться скопление магнитного порошка. Порошок осаждается в виде размытых неплотных полосок, повторяя форму границы сварного шва. Для прояснения ситуации следует провести повторный магнитопорошковый или капиллярный контроль.

Скопление частиц магнитного порошка может происходить и *в зонах структурной неоднородности, локальных местах отпуски, местах обезуглероживания, зоне пластической деформации, по границам зерен в крупнозернистых сплавах*. Для их устранения рекомендуют произвести контроль при более низком режиме намагничивания.

Осаждение магнитного порошка может наблюдаться в виде цепочек, ориентированных по линиям магнитного поля. Чаще оно возникает при контроле способом приложенного поля. Возможные причины – чрезмерная концентрация магнитного порошка, большая остаточная намагниченность порошка вследствие продолжительного использования суспензии, неправильно выбранная вязкость дисперсионной среды суспензии, слишком высокая напряженность намагничивающего поля.

При контроле способом воздушной взвеси *в приложенном поле* может происходить накопление магнитного порошка *вдоль волокон металла*. Чтобы его уменьшить, следует снизить оптимальный ток намагничивания на 10...20 %. Если осаждение порошка не уменьшилось, то для обнаружения дефектов следует применить другие методы контроля, например, капиллярный.

Осаждение магнитного порошка может происходить и *по границам сварных швов* вследствие резкого перехода от шва к основному металлу. Чтобы его устранить следует сгладить этот резкий переход (зашлифовать), а затем провести повторный контроль.

В местах *карбидной полосчатости и ликвации* наблюдается интенсивное накопление магнитного порошка, аналогичное осаждению его над трещинами. Отличить карбидную полосчатость и ликвации от трещин бывает трудно, поэтому в этих случаях магнитный контроль следует сочетать с другими методами (например, капиллярным).

В местах *наклепа* после удаления осевшего порошка иногда видна светлая наклепанная полоса.

Забоины видны при визуальном осмотре и без предварительного нанесения магнитного порошка.

По следу соприкосновения намагниченной детали с каким-либо острым ферромагнитным предметом может произойти осаждение магнитного порошка. Если деталь намагнитить повторно и произвести ее контроль, то такого осаждения порошка не будет.

Как при магнитопорошковой дефектоскопии определить, есть ли на дне риски трещина?

Место расположения риски на детали наблюдают через лупу или бинокулярный микроскоп и одновременно наносят каплями из пипетки керосиновую или водную суспензию, отстоявшуюся 3...5 мин после размешивания. Если на поверхности объекта контроля имеется только риска, то накопление магнитного порошка на поверхности риски происходит в три стадии: сначала появляются отдельные точечные скопления, затем образуются короткие цепочки, на окончательной стадии полость риски полностью заполняется частицами.

Если же на дне риски имеется трещина, то на первой и третьей стадиях накопление магнитного порошка близко к предыдущему случаю, однако на второй стадии происходит сильное накопление магнитного порошка по всей длине трещины, четко обрисовывая ее очертания.

Многое зависит и от назначения объекта контроля. Иногда контролируемую поверхность можно зачистить до удаления риски.

4.11. Способы изготовления дефектограмм

Что такое дефектограмма?

Дефектограмма – это изображение части изделия с индикаторным рисунком выявленных дефектов, полученное фотографическим путем, при помощи реплик или другими способами.

Приведите примеры способов изготовления дефектограмм.

Способ, основанный на применении клеевой суспензии.

На поверхность образца накладывают плотную тонкую подложку. Приготавливают суспензию на основе быстро высыхающего клея. Наносят ее на подложку. Образец намагничивают. После высыхания клея подложку вместе с осевшим магнитным порошком снимают с объекта.

Способ, основанный на применении целлофана и резинового клея.

Образец контролируют с применением обычной керосино-масляной суспензии. Затем осторожно промывают в бензине для удаления ее остатков, но так, чтобы не смыть осевший над трещинами порошок. На полоску целлофана наносят тонкий слой резинового клея, дают ему несколько затвердеть и прокатывают по нему образец. На целлофане остается дефектограмма трещин.

Способ, основанный на фотографировании.

Чтобы устранить блики при фотографировании, применяют поляризационные светофильтры. Полученное изображение выводят на экран компьютера; при необходимости его увеличивают.

4.12. Стандартные образцы

Для чего применяют стандартные образцы при магнитопорошковой дефектоскопии?

Стандартные образцы при МПД используют для проверки работоспособности дефектоскопов и качества дефектоскопических материалов. Стандартные образцы специально изготавливают или отбирают из числа забракованных изделий с дефектами, размеры которых соответствуют принятому уровню чувствительности. Технология изготовления стандартных образцов описана в ГОСТ 21105–87. Она включает от шести до восьми операций. При такой сложной технологии изготовления образцов на их поверхности образуются трещины, раскрытие которых отличается незначительно.

Приведите пример технологии изготовления стандартного образца.

Образец № 4 (ГОСТ 21105–87). Заготовку образца изготавливают из стали У10А по ГОСТ 1435–99 в виде цилиндра (длина 250...300 мм,

диаметр 25 мм). Заготовку образца закаливают до твердости 60...63 HRC. Шлифуют цилиндрическую поверхность. Параметр шероховатости поверхности $Ra \leq 0,80$ мкм по ГОСТ 2789–73. На цилиндрическую поверхность заготовки наносят электролитически слой хрома толщиной 0,25...0,30 мм (по технологии пористого хромирования). Шлифуют на глубину 0,1 мм твердым (Т и СТ) абразивным кругом без охлаждения при поперечной подаче 0,03...0,05 мм на один двойной ход и при продольной подаче 1...3 м/мин. При этом в хромовом покрытии и стальной основе образуются трещины. Заготовку подвергают отпуску при температуре 160...180 °С. С поверхности заготовки электролитически удаляют слой хрома. Ширину трещин на поверхности образца измеряют на металлографическом микроскопе.

Что собой представляет тест-образец ТО-1?

Тест-образец состоит из корпуса в виде диска диаметром 21 мм, толщиной 2,5 мм, шарнирно закрепленного на ручке. На обеих плоскостях диска имеется по две группы взаимно перпендикулярных дефектов. Тест-образец накладывают на контролируемый участок объекта той или иной плоскостью сверху в соответствии с необходимой чувствительностью, создают требуемый режим намагничивания и наносят суспензию. Индикаторные рисунки дефектов объекта контроля на тест-образце обнаруживаются только при качественной суспензии и правильно выбранном режиме намагничивания.

4.13. Контроль деталей сложной формы, пружин, шайб, сварных швов, литья, зубчатых колес, лопаток турбин и объектов в процессе их эксплуатации. Организация ремонта дефектных объектов контроля

Как намагничивают крупные детали сложной формы при магнитопорошковой дефектоскопии?

Детали сложной формы, имеющие различные выступы, шлицы и т. д., намагничивают несколько раз, чтобы на всей контролируемой поверхности могли быть выявлены дефекты различной ориентации (как минимум в двух взаимно перпендикулярных направлениях). При одном из них режим намагничивания увеличивают в 1,4 раза. Намагничивание осуществляют в дефектоскопах большой мощности или объект намагничивают по частям с помощью выносных электромагнитов.

Как намагничивают при магнитопорошковой дефектоскопии мелкие детали сложной формы?

Для намагничивания мелких деталей сложной формы применяют импульсный ток. Трудности контроля таких объектов обусловлены появлением на выступах и в местах резких изменений сечения объекта магнитных полюсов, оказывающих размагничивающее действие в контролируемых зонах объекта. Для уверенного обнаружения дефектов в таких объектах используют магнитную суспензию с пониженной концентрацией магнитного порошка и добавками антикоагулянта.

Как контролируют при МПД детали с резьбовой поверхностью?

Для дефектоскопии применяют керосиновую суспензию с пониженной концентрацией магнитного порошка и добавками антикоагулянта. Если при намагничивании используют магнитные поля напряженностью 100 А/см и выше, содержание магнитного порошка уменьшают до 5 г/л. Предварительно из суспензии удаляют путем фильтрации крупные и слипшиеся частицы магнитного порошка. Сложность магнитопорошковой дефектоскопии деталей с резьбовой поверхностью объясняется образованием магнитной полюсности при продольном намагничивании объекта.

Как намагничивают пружины при магнитопорошковой дефектоскопии?

Применяют циркулярное намагничивание, пропуская ток через стержень, проходящий внутри пружины, а затем по проволоке, из которой изготовлена пружина. Намагничивающие токи в обоих случаях определяют по формуле $I = 3 H_{mp} d$. Они будут отличаться в силу различия диаметров пружины и проволоки. Если контролю подлежит пружина растяжения, то отдельные ее витки нужно предварительно раздвинуть с помощью диэлектрических клиньев.

Как контролируют детали в виде шайб, если внутренний и наружный диаметры близки?

Ток при циркулярном намагничивании определяют по формуле $I = 3 H_{mp} d$, где d – больший диаметр шайбы.

Как контролируют детали вида шайб, если наружный и внутренний диаметры сильно отличаются?

Если наружный и внутренний диаметры детали в виде шайбы сильно отличаются, то деталь разделяют на кольцевые зоны. Контроль каждой кольцевой зоны производят отдельно. Ток при их циркулярном намагничи-

вании определяют по формуле $I = 3 H_{mp} d$, где d – больший диаметр каждой кольцевой зоны.

Как контролируют магнитопорошковым методом сварные соединения со снятой выпуклостью шва?

Соединения со снятой выпуклостью шва или грата (выполненные аргонодуговой, под флюсом, контактной стыковой и электронно-лучевой сваркой) контролируют так же, как и несварные объекты аналогичной формы, изготовленные из тех же материалов.

Каковы особенности магнитопорошкового контроля соединений, выполненных сваркой плавлением?

Сварные соединения, выполненные ручной сваркой, могут контролироваться с чувствительностью, не превышающей уровня B , остальные – не выше B . Снижение реальной чувствительности контроля вызывается в этом случае наличием «ложных» оседаний порошка по границам «шов – основной металл», а также по чешуйкам шва, затрудняющих распознавание более мелких дефектов. Для устранения «ложного» оседания порошка рекомендуют применять механическую подготовку поверхности шва.

Часто на расстоянии 4...8 мм от краев выпуклости шва происходит оседание магнитного порошка по границе зоны термического влияния. Однако в этом случае скопление магнитного порошка менее четкое, чем над дефектом, что позволяет отличить его от оседаний над несплошностями, т. е. отличить мнимый дефект от реального. Если же в зоне перехода от шва к основному металлу и по границе зоны термического влияния наблюдается более интенсивное скопление магнитного порошка, то это место следует зачистить и провести повторный контроль. Если после такой подготовки поверхности оседание порошка увеличится, то это может указывать на наличие трещины. В затруднительных случаях рекомендуется дополнительно применять контроль капиллярным методом.

Как при магнитопорошковой дефектоскопии намагничивают соединения, выполненные сваркой плавлением?

Контроль сварных соединений в приложенном магнитном поле с использованием электроконтактов затруднен в связи с опасностью прижогов, сложностью нанесения суспензии непосредственно при намагничивании объекта контроля и т. д. Поэтому при контроле СПП намагничивание осуществляют электромагнитами, причем если ориентация дефектов неизвестна, то объект намагничивают в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Ширина контролируемой зоны равна длине проекции (или диаметру) полюса намагничивающего устройства на объект. Так, при применении дефектоскопа МД-50 ПК11У она равна 60 мм. Длина контролируемого участка равна минимальному расстоянию между полюсами за вычетом двух участков шириной по 10...20 мм, примыкающих к полюсам, т. к. на этих участках слишком большое отношение $\frac{H_n}{H_\tau}$ и дефекты не обнаруживаются. Это объясняется

высоким градиентом напряженности магнитного поля, вследствие чего частицы магнитного порошка вымываются из указанных зон, прилегающих к полюсам электромагнита. Положение зоны контроля $АВВГ$ относительно полюсных наконечников электромагнита показано на рис. 4.9. Дефекты сплошности в этой зоне обнаруживаются удовлетворительно.

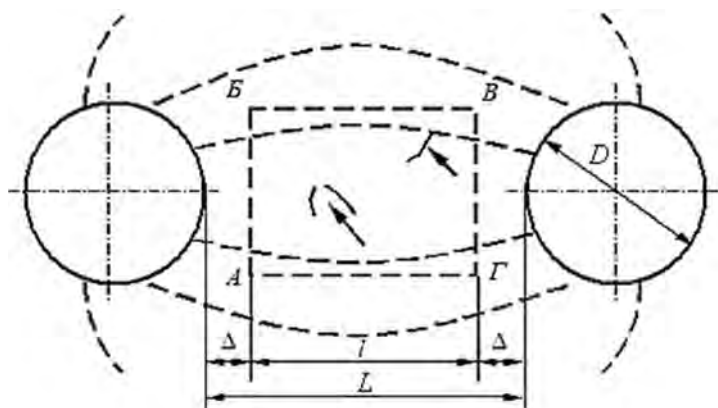


Рис. 4.9. Положение зоны контроля в межполюсном пространстве электромагнита: $АВВГ$ – контролируемая зона; Δ – участок неудовлетворительного обнаружения дефектов; стрелки указывают на выявленные трещины

Чтобы обнаружить продольные трещины, сварной шов намагничивают в поперечном направлении. Каждую зону контролируют отдельно. При этом зоны контроля соприкасаются или перекрываются (рис. 4.10, а). Для обнаружения поперечных трещин в шве намагничивание осуществляют вдоль продольной оси шва. Контроль объекта проводят участками, причем контролируемые области соприкасаются или перекрываются на 0,5...1 см (рис. 4.10, б).

Промежуточное размагничивание объекта контроля (после обнаружения продольных трещин) не требуется.

Если сварной шов протяженный, то для выявления СОН продольных трещин его намагничивают полностью. С этой целью электроконтакты устанавливают на расстоянии 150...200 мм друг от друга, включают импульсный ток (3–5 раз), затем перемещают электроконтакты на расстояние 150...200 мм вдоль шва, снова намагничивают тремя-пятью импульсами и т. д., пока не намагнитят весь шов. Затем на поверхность шва наносят магнитную суспензию и делают заключение о наличии продольных трещин.

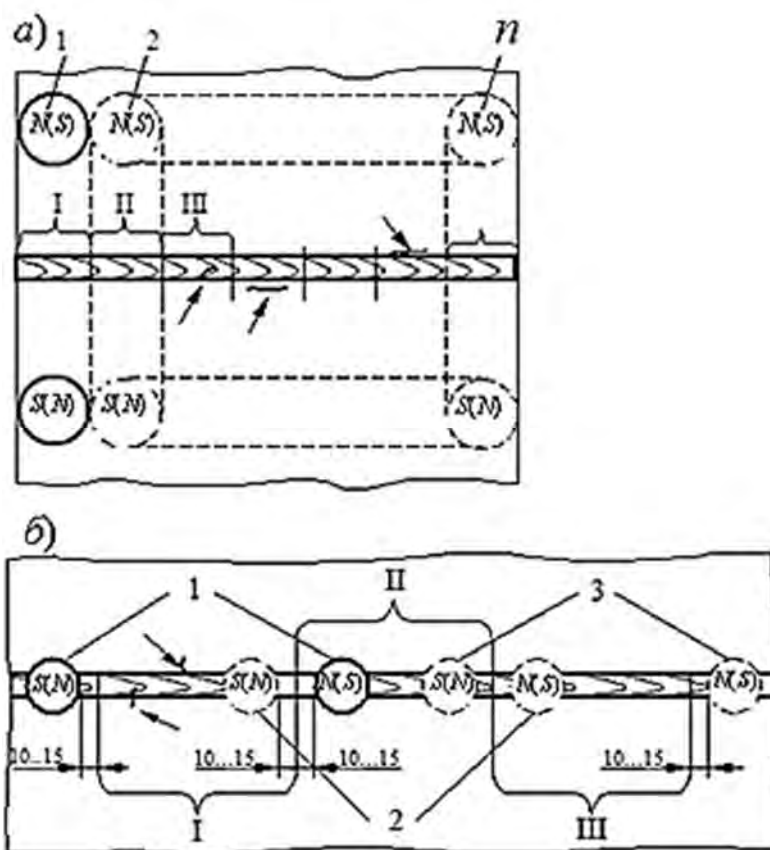


Рис. 4.10. Расположение контролируемых участков при магнитном контроле сварных соединений с применением переносного магнита: *а* – для обнаружения дефектов, ориентированных вдоль шва; *б* – для обнаружения поперечных дефектов; 1, 2, 3 – первое, второе, третье расположения электромагнита соответственно; I, II, III – контролируемые участки шва и околошовной зоны; стрелки указывают на обнаруживаемые дефекты

Не производя промежуточного размагничивания, сварной шов контролируют на наличие поперечных (и ориентированных под углом к оси) трещин. С этой целью объект размечают на зоны шириной 30...60 мм. Режим намагничивания увеличивают в 1,4 раза. Для этого посередине первой зоны по разные стороны шва на расстоянии 60...150 мм друг от друга устанавливают электроконтакты и тремя-пятью импульсами намагничивают первую зону, наносят на поверхность шва суспензию и делают заключение о наличии трещин. Не производя размагничивание, аналогично контролируют участок шва, находящийся во второй зоне, и т. д.

Режим циркулярного намагничивания определяют по формуле $I_{mp} = 1,5H_{mp}\sqrt{l^2 + c^2}$ (где l – расстояние между местами установки электроконтактов, c – ширина зоны контроля) либо по графику (рис. 4.11).

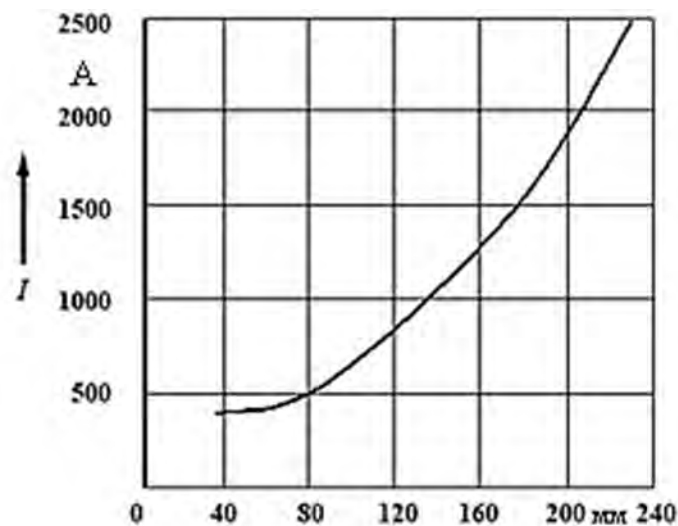


Рис. 4.11. График для выбора тока циркулярного намагничивания крупногабаритных объектов

Как контролируют детали, изготовленные литьем?

Детали, полученные *методами точного литья*, могут контролироваться с чувствительностью не выше уровня *Б*, детали, изготовленные *методами литья в землю и кокиль* – с чувствительностью не выше уровня *В*. Это обусловлено большей шероховатостью поверхности литых объектов.

На некоторых участках при намагничивании литых деталей сложной формы может образоваться местная магнитная полюсность, приводящая к ложным скоплениям магнитного порошка, что затруднит распознавание дефектов по их индикаторным рисункам. Если контроль таких изделий осуществляется в приложенном магнитном поле, то в этом случае следует использовать суспензию с пониженной концентрацией магнитного порошка (до 15 г/л). Применение суспензии такой концентрации при контроле на остаточной намагниченности может привести к снижению чувствительности метода.

Для улучшения обнаружения *плен и включений* рекомендуют производить механическую обработку поверхности отливки перед ее дефектоскопией. Иногда магнитный порошок не скапливается над *неслитинами*, которые могут быть видны даже невооруженным глазом. Это обусловлено тем, что неслитины наклонены под очень малым углом (менее 20°) к поверхности отливки, что приводит к слабому возмущению магнитного потока.

Дополнительные трудности при МПД литых изделий может внести *аустенит*, если он имеется в структуре сплава. Он может обусловить скопление магнитного порошка в виде изогнутых черточек, напоминающих скопления над трещинами. Во всех сомнительных случаях следует дополнительно применять капиллярные методы контроля.

Как контролируют зубчатые колеса, а также детали, имеющие фигурные выступы?

При контроле таких деталей целесообразно использовать импульсное намагничивание. В этом случае вследствие скин-эффекта и уменьшения полюсности лучше намагничивается поверхностный слой выступающих частей объектов.

Каковы особенности магнитопорошковой дефектоскопии ферромагнитных лопаток турбин?

К качеству лопаток турбин предъявляются очень высокие требования. Подавляющее большинство несплошностей в этих деталях располагается под углом, близким к 20° к поверхности, что сильно затрудняет их выявление. Поэтому контроль таких объектов производят СПП при намагничивании полем напряженностью 120...160 А/см электромагнитами *постоянного* тока. Рекомендуют также снизить концентрацию магнитного порошка до 5...10 г/л.

Каковы особенности магнитопорошкового контроля объектов в процессе их эксплуатации, а также при проведении ремонта?

В процессе эксплуатации машин и механизмов в деталях могут появиться *усталостные, коррозионные трещины* и другие дефекты. МПД этих деталей следует проводить на наличие именно этих дефектов. При этом *нецелесообразно проводить контроль деталей, бывших в эксплуатации, на наличие тех дефектов, которые должны быть обнаружены в процессе изготовления деталей.*

Объем, периодичность и уровень чувствительности контроля в процессе эксплуатации объектов указываются в нормативной документации.

Как организуют ремонт дефектных объектов контроля?

После окончания магнитопорошковой дефектоскопии все прижоги металла в местах контакта токоподводящих электродов удаляются абразивным инструментом. Прижоги считаются недопустимыми дефектами, т. к. они могут стать причиной зарождения трещин в объекте контроля.

Ремонт забракованных деталей производят в соответствии с техническими условиями на объект. После ремонта дефектных мест их повторно контролируют.

4.14. Магнитопорошковые дефектоскопы

Приведите основные технические характеристики известного Вам магнитопорошкового дефектоскопа.

Дефектоскоп МД-М.

Дефектоскоп конструктивно выполнен из трех функционально законченных самостоятельных модулей:

- модуль импульсного тока МД-И (формирует импульсное магнитное поле в изделии при намагничивании, а также убывающее магнитное поле меняющейся полярности при размагничивании с помощью кабеля или электроконтактов);
- модуль соленоида МД-С (позволяет намагничивать и размагничивать мелкие детали переменным магнитным полем соленоида);
- модуль электромагнита МД-Э (позволяет создать в изделии постоянное магнитное поле при намагничивании и убывающее магнитное поле меняющейся полярности при размагничивании объекта электромагнитом).

Техническая характеристика модуля импульсного тока.

Регулировка тока:

- в намагничивающем кабеле – от 100 до 4500 А;
- через электроконтакты – от 100 до 1200 А.

Длительность импульса тока – от 1,4 до 1,8 мс.

Намагничивание изделий осуществляется:

- одиночным импульсом тока;
- повторяющимися импульсами тока одной полярности с частотой повторения от 0,7 до 1,7 Гц.

Регулировка тока:

- в намагничивающем кабеле – от 100 до 4500 А;
- через электроконтакты – от 100 до 1200 А.

Длительность автоматического процесса размагничивания по заданной программе – 30; 60; 120 с.

Частота автоматического повторения разнополярных убывающих по величине импульсов тока от заданного значения до нуля в режиме размагничивания – 1 Гц.

Техническая характеристика модуля соленоида.

Максимальная напряженность поля в центре соленоида при питании его от модуля – не менее 390 А/см.

Напряженность поля в центре соленоида при питании его от непосредственно от сети (220 ± 22) В – не менее 700 А/см.

Длительность тока в соленоиде при контроле СОН – от 1 до 10 с.

Длительность паузы – от 1 до 10 с.

Длительность автоматического процесса размагничивания по встроенной программе – 30; 60; 120 с.

Максимальная величина тока обмотке соленоида, подключенного к модулю, – не более 2,5 А.

Техническая характеристика модуля электромагнита.

Напряженность постоянного магнитного поля при токе через обмотку 5 А в центре воздушного зазора при расстоянии 100 мм между центрами полюсных наконечников электромагнита – не менее 230 А/см.

Регулируемая сила тока в обмотке электромагнита – от 0,1 до 5 А.

Длительность автоматического процесса размагничивания разнополярными импульсами, убывающими по амплитуде до нуля, по встроенной программе – 30; 60; 120 с.

Электромагнит имеет шарнирно раскрывающийся сердечник.

Дефектоскоп МД-50 ПК-ПУ.

Дефектоскоп может быть использован для контроля мелких и средних объектов. Крупные изделия можно контролировать по частям. Циркулярное намагничивание осуществляется с помощью электроконтактов импульсным, выпрямленным или переменным током частотой 50 Гц. Продольное намагничивание производится с помощью электромагнита или соленоида. Дефектоскоп обеспечивает размагничивание деталей после их контроля. Это осуществляется путем автоматического реверса и снижения амплитуды импульсов тока через гибкий кабель, электроконтакты или путем снижения величины переменного тока частотой 50 Гц, протекающего через соленоид или электромагнит. Убывание поля может быть также получено путем удаления источника магнитного поля от детали или детали от него.

Техническая характеристика дефектоскопа МД-50 ПК-ПУ.

Максимальная величина импульсного тока намагничивания, создаваемого в кабеле, – 5500 А.

Максимальная напряженность магнитного поля в середине промежутка между полюсами шарнирного электромагнита при расстоянии между ними 100 мм – не менее $20 \cdot 10^3$ А/м.

Максимальная амплитуда тока циркулярного намагничивания:

- при намагничивании током 50 Гц – 1000 А;
- при намагничивании выпрямленным током – 400 А.

Габаритные размеры дефектоскопа – 1450 × 660 × 800 мм.

Масса дефектоскопа – 280 кг.

Что предусмотрено в магнитопорошковых дефектоскопах для уменьшения опасности прижогов?

При циркулярном намагничивании изделий в процессе магнитопорошкового контроля через объект пропускают сильные токи, что может вызвать прижог его поверхности. Для уменьшения опасности прижога на контактных пластинах укрепляют медные сетки или их обкладывают свинцовыми пластинами, в электроконтактах используют свинцовые накопечники. Это позволяет увеличить площадь контакта. С этой же целью для намагничивания применяют импульсный ток.

4.15. Требования, предъявляемые к участку магнитопорошкового контроля на предприятии. Требования техники безопасности при магнитопорошковой дефектоскопии

Какие требования предъявляют к участку магнитопорошкового контроля?

Чтобы исключить быстрое загрязнение суспензии и необходимость ее частой замены, участок магнитопорошкового контроля должен быть защищен от попадания пыли, грязи, стружек и т. д. Если возможно, он должен располагаться в отдельном, защищенном от шума помещении с подведенной горячей и холодной водой. Общая вентиляция должна обеспечивать 5-кратный обмен воздуха.

Участок магнитопорошкового контроля должен быть снабжен дефектограммами с видами индикаторных рисунков характерных дефектов, а также стандартным образцом. Стандартный образец должен иметь паспорт и дефектограмму.

Назовите основные правила безопасной эксплуатации магнитопорошковых дефектоскопов и выполнения контроля объектов.

При работе на магнитных дефектоскопах следует соблюдать общие требования техники безопасности эксплуатации электрического оборудования. Органы управления должны быть вынесены за пределы зоны действия полей напряженностью более 80 А/см. Рядом с дефектоскопом необходимо иметь углекислотные огнетушители. Работа на дефектоскопе разрешается только специалистам, обученным магнитному контролю и знающим устройство дефектоскопа и правила работы с ним.

Вблизи дефектоскопов нельзя хранить легко воспламеняющиеся вещества бензин, ацетон, смывки. Запрещается применять открытый огонь. Промасленные обтирочные материалы (тряпки, салфетки, ветошь) при

работе следует складывать в металлический ящик, обязательно опорожняемый по окончании работ.

Для защиты рук от вредного воздействия суспензии следует применять резиновые перчатки. Работы, связанные с нанесением мелкого сухого порошка на поверхность детали (при контроле способом воздушной взвеси), следует проводить только при работе вентиляции с местным боковым отсосом. При циркулярном намагничивании следует применять щитки для защиты лица от возможного попадания мелких частиц.

Для приготовления суспензии не допускается применять керосин с температурой вспышки менее 50 °С. При контроле СПП с циркулярным намагничиванием нельзя применять керосиновую и керосино-масляную суспензию.

Почему промасленные обтирочные материалы в лаборатории магнитопорошковой дефектоскопии следует складывать в металлический ящик, обязательно опорожняемый в конце смены?

Промасленные обтирочные материалы (ветошь, салфетки) в лаборатории магнитопорошковой дефектоскопии следует складывать в металлический ящик, обязательно опорожняемый в конце смены, чтобы исключить возможные последствия их самовозгорания, которое может произойти под действием кислорода в воздухе.

4.16. Краткое руководство по разработке технологической карты магнитопорошкового контроля

При разработке технологической карты следует использовать ГОСТ 21105–87 и отраслевые нормативные документы.

ГОСТ 21105–87 распространяется на магнитопорошковый метод контроля объектов из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40. Если $\mu_{r\max} < 40$, то вопрос о возможности применения магнитопорошкового метода контроля решается на основе результатов предварительно проведенных экспериментальных исследований по возможности достижения требуемого уровня чувствительности при обнаружении дефектов на объектах из данного материала. Поэтому если значение $\mu_{r\max}$ не указано в задании, то его следует вычислить.

Для вычисления $\mu_{r\max}$ по табличным данным строят основную кривую намагничивания материала контролируемого изделия (табл. Б.1), проводят касательную к ней через начало координат и для точки касания определяют

$$\mu_{r \max} = \frac{B_1}{\mu_0 H_1},$$

где B_1 и H_1 – индукция и напряженность материала, соответствующие точке касания.

Возможен и второй путь: определяют приближенное значение $H_1 \cong 1,3 H_c$, где H_c – коэрцитивная сила материала контролируемого изделия (см. табл. А.1), затем по табличным данным (см. табл. Б.1) или кривой намагничивания находят соответствующее значение B_1 и определяют $\mu_{r \max} = \frac{B_1}{\mu_0 H_1}$.

1. Эскиз или рисунок контролируемого изделия должен давать общее представление об объекте контроля без излишней детализации.

2. Подготовка к контролю должна включать:

- подготовку объекта к операциям контроля;
- проверку работоспособности дефектоскопов;
- проверку качества дефектоскопических материалов.

При *подготовке объекта* с контролируемой поверхности необходимо удалить продукты коррозии, остатки окалины, масляные *загрязнения*, а при необходимости следы лакокрасочных покрытий.

Для удаления загрязнений из пазов, отверстий полостей применяют хлопчатобумажную неворсистую ветошь. С ответственных и прецизионных деталей загрязнения удаляют волосяными щетками, деревянными и пластмассовыми скребками, растворителями (бензин, ацетон). Лакокрасочные покрытия толщиной более 0,03 мм удаляют смывками СД-1, АФТ-1 и др., а также пескоструйной обработкой с последующим обдувом, если это допускается технологией ремонта. Если деталь будет подвергаться МПД с применением водной суспензии, то ее следует также тщательно обезжирить органическим растворителем (бензином, ацетоном) либо препаратами МС-6, МС-15, не содержащими легко воспламеняющихся веществ. Для этих же целей применяют моющий раствор: 4...5 г эмульгатора ОП-7 или ОП-10 и 96...95 мл питьевой воды соответственно.

3. Проверку работоспособности дефектоскопов и качества дефектоскопических материалов осуществляют при помощи стандартных образцов предприятий, специально изготовленных или отобранных из числа забракованных изделий с дефектами, размеры которых соответствуют принятому уровню чувствительности.

4. Условный уровень чувствительности определяется в зависимости от минимального раскрытия Δ недопустимого дефекта:

А, если $\Delta = 2,0$ мкм;

B , если $\Delta = 10,0$ мкм;

B , если $\Delta = 25$ мкм.

Если метод контроля позволяет, например, обнаруживать трещины раскрытием 5 мкм, то достигим уровень чувствительности B , а A – нет. То есть если минимальное допустимое раскрытие дефекта 5 мкм, то следует выбрать условный уровень чувствительности A .

5. Требуемая шероховатость поверхности.

Условный уровень чувствительности A достигается при параметре шероховатости контролируемой поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм, уровни чувствительности B и B – при $Ra \leq 10$ мкм. При выявлении подповерхностных дефектов, а также при $Ra > 10$ чувствительность метода снижается и условный уровень чувствительности *не нормируется*. При контроле изделий с немагнитными покрытиями с увеличением толщины покрытия чувствительность метода понижается.

6. Выбор способа магнитопорошкового контроля.

СОН более удобен и прост в осуществлении. Поэтому в равных условиях ему следует отдавать предпочтение. СОН применяют при одновременном выполнении следующих четырех условий:

– $H_c > 1000$ А/м;

– $B_r \geq 0,5$ Тл;

– если при этом достигается требуемый уровень чувствительности (последнее определяется по графикам (рис. 4.12); с этой целью из точек H_c и B_r соответствующих осей координат восстанавливают перпендикуляры до их пересечения; если точка пересечения перпендикуляров находится на кривой или выше кривой соответствующего уровня чувствительности, то требуемый условный уровень чувствительности достижим);

– если толщина немагнитного покрытия на поверхности объекта контроля не превышает 30 мкм (для авиационных деталей 20 мкм).

Если не выполняется хотя бы одно из перечисленных выше условий, то используют способ приложенного поля (СПП).

СПП применяют также:

– если деталь изготовлена из магнитомягкого материала;

– если деталь имеет сложную форму или малое удлинение (отношение длины к наибольшему поперечному размеру меньше 5);

– деталь контролируют для обнаружения подповерхностных дефектов, расположенных на глубине более 0,01 мм;

– мощность дефектоскопа не позволяет намагнитить всю деталь из-за ее больших размеров;

– объект контролируют по участкам, намагничивая электромагнитами или постоянными магнитами.

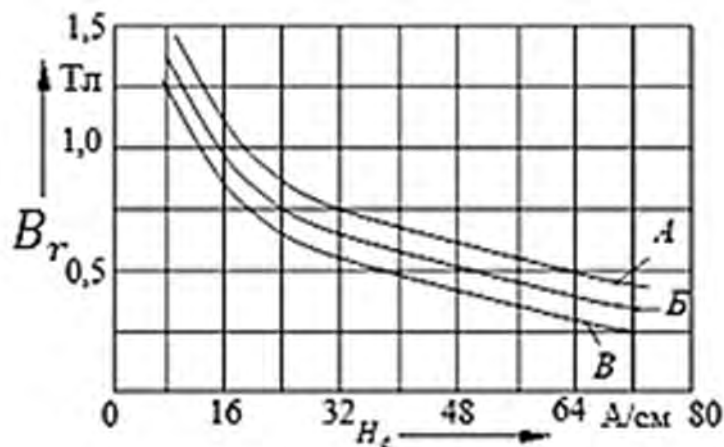


Рис. 4.12. К определению достижения требуемого условного уровня чувствительности при выборе способа контроля

7. Намагничивание объекта контроля (вид, способ и схема намагничивания).

Согласно ГОСТ 21105–87, при МПД применяют четыре вида намагничивания: циркулярное, полюсное, комбинированное и во вращающемся магнитном поле. В большинстве случаев может быть использован любой вид, однако *предпочтение следует отдавать более простому в осуществлении*. Выбирают такие способ и схему намагничивания, чтобы угол α между вектором напряженности намагничивающего поля и направлением распространения дефекта был близок к 90° .

Если ориентация дефектов не известна, то объект контроля намагничивают в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При одном из них $H_{тр}$ необходимо увеличить в 1,4 раза.

Если дефекты имеют различную ориентацию, то можно применить комбинированный вид намагничивания или намагничивание во вращающемся поле. Комбинированный вид намагничивания используют *только при контроле СПП*. При этом вектор напряженности намагничивающего поля поворачивается или вращается. Намагничивание во вращающемся магнитном поле осуществляют *при контроле СОН*.

При оценке выполнения данного пункта учитывают не только правильность выбора вида, способа и схемы намагничивания, но и создание наиболее рациональных условий контроля (выстраивание объектов контроля в цепочки, применение удлинителей, центрирующих втулок и т. д.) при малом размагничивающем факторе объектов контроля.

Обычно, если деталь контролируют СОН, то намагничивание зоны контроля производят с помощью электроконтактов, используя импульсный, переменный или постоянный ток. При контроле СПП намагничивание объекта осуществляют с помощью электромагнитов.

8. Род тока.

Применяют постоянный, переменный промышленной и повышенной частоты, выпрямленный однополупериодный, двухполупериодный и трехфазный, импульсный ток. Импульсный ток обычно используют для циркулярного и полюсного намагничивания. Для циркулярного, полюсного и комбинированного намагничивания применяют переменный, выпрямленный и постоянный токи. Считают, что постоянный ток наиболее удобен для выявления внутренних дефектов, находящихся на глубине до 2...3 мм. Однако детали с толщиной стенки более 20 мм не следует намагничивать постоянным током, т. к. детали после контроля трудно размагнитить. Кроме того, такие дефекты можно выявить с помощью переменного (и импульсного) тока, если амплитуду увеличить в 1,5–2,5 раза по сравнению с амплитудой тока, рассчитанной для выявления поверхностных дефектов.

9. Режим намагничивания. Требуемая напряженность поля.

Если применяют способ приложенного поля, то H_{mp} определяют по графикам в зависимости от коэрцитивной силы H_c и условного уровня чувствительности (рис. 4.13).

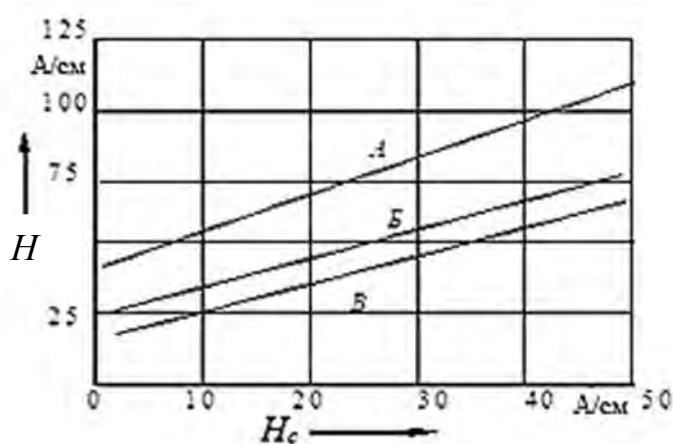


Рис. 4.13. К определению режима намагничивания СПП

Если используют способ остаточной намагниченности, то H_{mp} равно напряженности магнитного поля, необходимой для получения $B_{r\max}$. Это значение берется из таблиц, например, в [3].

10. Намагничивающий ток.

Если применяют циркулярный вид намагничивания, то можно определить намагничивающий ток по формулам:

$$- I = 3 H_{mp} d \text{ — при намагничивании цилиндрического объекта диаметром } d;$$

$$- I = 2 H_{mp} a \text{ — при намагничивании пластины сечением } a \times b \left(\frac{a}{b} \geq 10 \right);$$

$-I = 2H_{mp} (a + b)$ – при намагничивании бруска сечением $a \times b$

$(1/10 < \frac{a}{b} < 10)$;

$- I_{mp} = 1,5H_{mp} \sqrt{l^2 + c^2}$ – при контроле крупногабаритных изделий (здесь

l – расстояние между токоподводящими электродами, c – ширина контролируемой зоны).

При контроле СОН в приведенных выше формулах H_{mp} – напряженность поля, соответствующая техническому насыщению материала детали (выбирают из таблиц – напряженность поля, необходимая для получения $B_{r \max}$). При контроле СПП значение H_{mp} определяют по графикам (см. рис. 4.13). В обоих случаях H_{mp} – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля.

В приведенных выше формулах единицы измерения величин должны быть согласованы.

Если применяют *комбинированный вид* намагничивания, то при использовании постоянного полюсного и переменного циркулярного магнитных полей напряженность поля полюсного намагничивания определяют при помощи графиков (см. рис. 4.13, режим приложенного поля). Напряженность поля циркулярного намагничивания устанавливают в 2–3 раза больше напряженности поля полюсного намагничивания, если применяют водную суспензию, суспензию на основе масла РМ (кинематическая вязкость суспензии не превышает $20 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Если же дисперсионной средой суспензии является трансформаторное масло, то напряженности магнитных полей при комбинированном намагничивании могут быть одинаковыми.

Если в комбинированном намагничивании участвуют *токи одного рода*, то напряженности их полей должны быть одинаковыми.

11. Тип дефектоскопа.

При МПД широкое применение нашли дефектоскопы МД-М, МД-50П или более старые УМДЭ-10000, ДМП-2, 77ПМД-3м, ПМД-70 и др. Их выбор следует производить, основываясь на требуемых режимах намагничивания и технических характеристиках приборов.

12. Цвет порошка.

Черные магнитные порошки используют для контроля деталей со светлой поверхностью. При контроле деталей с черной поверхностью применяют магнитно-люминесцентный порошок, а осмотр производят в ультрафиолетовом свете. Для этих же целей может быть использован буровато-красный магнитный порошок, а также порошок черного цвета, если поверхность детали предварительно покрыть слоем белой нитрокраски (толщиной до 20 мкм). Нитрокраску

не наносят, если на контролируемом объекте имеется покрытие. Применяют также светлые магнитные порошки.

13. Дисперсионная среда.

Для нанесения магнитного порошка на поверхность объекта используют способы магнитной суспензии, сухого магнитного порошка и магнитогумированной пасты. Чаще применяют способ магнитной суспензии. В качестве дисперсионной среды используются вода с различными добавками, минеральные масла, керосин, смесь трансформаторного масла с керосином. При СПП с циркулярным намагничиванием не допускается применять керосиновую или керосино-масляную суспензию. Для приготовления суспензий не допускается использовать керосин с температурой вспышки ниже 30 °С (в инструкции к МД-М – 50 °С).

Пример состава водной суспензии в граммах на литр.

Чёрный магнитный порошок – (25 ± 5) г/л.

Хромпик калиевый $K_2Cr_2O_7$ – (4 ± 1) г/л.

Сода кальцинированная – (10 ± 1) г/л.

Эмульгатор ОП-7 или ОП-10 – (5 ± 1) г/л.

Вода водопроводная – до 1 л.

Как отмечалось ранее, водная суспензия, кроме воды и магнитного порошка, содержит антикоррозионные, поверхностно-активные добавки, вещества, препятствующие образованию пены, улучшающие смачиваемость.

14. Нанесение магнитного порошка, суспензии или магнитогумированной пасты.

Магнитную суспензию на контролируемую поверхность наносят путем полива из шланга, резиновых груш, бачков, пипеток, путем погружения в ванну (если СОН), аэрозольным способом.

Сухой магнитный порошок наносят на контролируемую поверхность при помощи различных распылителей, погружением объекта в емкость с порошком, а также способом воздушной взвеси. Способ воздушной взвеси применяют для выявления подповерхностных дефектов, а также дефектов, находящихся под слоем немагнитного покрытия толщиной от 100 до 200 мкм.

Магнитогумированную пасту готовят непосредственно перед использованием и наносят на контролируемую поверхность в жидком виде. Способ магнитогумированной пасты применяют при контроле внутренних стенок полостей диаметром менее 20 мм при отношении глубины к диаметру не менее 1/10.

15. Осмотр детали.

Осмотр производят без применения и с применением оптических средств (1,25–24 крат).

Осмотр при контроле СОН производят непосредственно после извлечения детали из ванны или полива, *после стекания основной массы суспензии*, если используют керосиновую или водную суспензию, и не ранее 4...6 мин, если применяют масляную суспензию.

При контроле СПП осмотр производят *во время и после нанесения суспензии на объект контроля*.

16. Типичные признаки дефектов по картине осаждения порошка.

Поверхностные трещины создают узкий и четкий индикаторный рисунок, *подповерхностные* – широкий и расплывчатый. Если на поверхности контролируемого объекта имеется немагнитное покрытие, то индикаторный рисунок, создаваемый находящейся в нем трещиной, будет такой же, как и в случае подповерхностного дефекта.

Над *закалочными трещинами* накопление магнитного порошка имеет вид плотных извилистых рельефных линий.

Индикаторные рисунки *шлифовочных трещин* имеют вид тонких четких линий, представляющих собой сетку или короткие черточки.

Усталостные трещины обнаруживаются индикаторными рисунками в виде резко очерченных плотных, четких линий, полос или жилок чаще всего в местах концентраций напряжений.

Термические трещины выявляются так же, как и шлифовочные. Они располагаются на поверхностях трения.

Индикаторные рисунки *волосовин* обнаруживаются в виде прямых линий различной длины, расположенных вдоль волокон.

Неметаллические (шлаковые) включения выявляются индикаторными рисунками в виде цепочек или точечных скоплений.

Индикаторные рисунки *надрывов* имеют вид скобочек, часто по всей поверхности или большей ее части. После удаления магнитного порошка надрывы можно увидеть с помощью лупы. Иногда в поверхностном слое заметны места с выкрошившимся металлом.

Индикаторные рисунки *флокенов* наблюдаются в виде отдельных прямолинейных или искривленных черточек длиной до 30 мм, расположенных преимущественно группами и имеющих различное направление.

Закаты обнаруживаются, как правило, в приложенном поле. Их индикаторные рисунки имеют вид серии извилистых линий.

17. Удаление магнитного порошка с поверхности объекта.

Удаление магнитного порошка осуществляется с помощью хлопчатобумажной неворсистой ветоши или промывкой в проточной воде с последующей просушкой струей теплого воздуха.

18. Размагничивание объектов контроля.

Размагничивание изделий производят с помощью демагнетизатора либо непосредственно в дефектоскопе переменным магнитным полем с убывающей

до нуля амплитудой. Максимальная амплитуда переменного поля должна быть не менее наибольшей напряженности намагничивающего поля. Количество циклов – не менее 40.

19. Проверка качества размагничивания объекта контроля.

Проверку качества размагничивания деталей производят с помощью измерительных приборов ИОН-3, ФП-1, ПКФ-1 и др. Показатель размагниченности K не должен превышать, как правило, 3.

$$K = C_6 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \leq 3,$$

где C_6 – поправочный коэффициент, если деталь в процессе измерений располагалась вертикально (он постоянен для данной географической точки и берется из справочника); α_1 – отклонение стрелки измерителя напряженности магнитного поля при первом измерении, когда преобразователь располагается у конца детали; α_2 – то же после поворота детали вместе с преобразователем на 180° вокруг малой оси детали.

При определении показателя размагниченности деталь располагают вертикально, замеряют напряженность поля у одного ее конца ($H_1 = \alpha_1$), затем поворачивают деталь вместе с преобразователем измерительного прибора на 180° вокруг ее малой оси и снова измеряют напряженность поля ($H_2 = \alpha_2$). Полученные значения α_1 и α_2 подставляют в формулу.

Если деталь невозможно расположить вертикально, то ее располагают горизонтально, ориентируя с севера на юг. В последнем случае в приведенной выше формуле вместо коэффициента C_6 используют C_2 .

Если производят проверку качества размагничивания крупногабаритных деталей, то замеряют значение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля у поверхности детали (ИОН-3, ФП-1, ПКФ-1 и др.). Оно не должно превышать значения, указанного в ТУ.

20. Техника безопасности.

При работе на магнитных дефектоскопах следует соблюдать общие требования техники безопасности эксплуатации электрических установок.

В помещении, где установлен стационарный магнитопорошковый дефектоскоп, должна быть общая вытяжная вентиляция с трёхкратным обменом воздуха в час, а у дефектоскопа – местные боковые отсосы.

Вблизи дефектоскопов нельзя хранить легковоспламеняющиеся вещества: ацетон, бензин и др.

Запрещается применять открытый огонь.

Промасленные обтирочные материалы следует складывать в металлический ящик, обязательно опорожняемый в конце смены.

Рядом с дефектоскопом необходимо иметь углекислотный огнетушитель.

Для защиты рук от вредного воздействия магнитной суспензии нужно применять резиновые перчатки.

Работы, связанные с нанесением тонкого слоя магнитного порошка на объект контроля, следует проводить при работе вентиляции с местным боковым отсосом.

При циркулярном намагничивании объектов путём пропускания тока по ОК необходимо использовать защитные щитки.

Органы управления дефектоскопа должны быть вынесены за пределы зоны действия магнитных полей напряженностью более 80 А/см.

При СПП и намагничивании объекта пропусканием тока не допускается применять керосиновую или керосино-масляную суспензию.

Для изготовления магнитной суспензии не допускается использовать керосин с температурой вспышки менее 30 °С.

К работам на дефектоскопе разрешается привлекать специалистов, обученных магнитному контролю, знающих устройство дефектоскопа и правила работы с ним.

21. Метрологическое обеспечение средств контроля.

Методика изготовления контрольных образцов описана в [1].

5. МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Сущность метода. Физические основы записи магнитных полей на магнитный носитель. Преобразование магнитного отпечатка на ленте в электрический сигнал. Вид сигналограмм. Чувствительность метода. Особенности контроля сварных соединений. Обобщенный параметр выпуклости шва. Испытательный образец. Отстройка от мешающих факторов при магнитографической дефектоскопии. Принцип отдельного контроля. Способы повышения чувствительности и разрешающей способности метода. Магнитографические дефектоскопы.

5.1. Сущность метода. Области применения

В чем сущность магнитографического метода контроля (МГК)?

Магнитографический метод заключается в намагничивании контролируемого металла объекта вместе с прижатым к его поверхности эластичным магнитоносителем (магнитной лентой), фиксации на нем возникающих в местах дефектов сплошности магнитных полей рассеяния и последующем воспроизведении полученной записи [30].

Укажите основные области применения магнитографической дефектоскопии.

Магнитографическая дефектоскопия применяется для обнаружения дефектов сплошности изделий из ферромагнитных материалов – трещин, непроваров, подрезов, пор, шлаковых включений и т. д. в строительстве, энергетике, химическом и общем машиностроении, судостроении и других отраслях народного хозяйства.

5.2. Физические основы записи магнитных полей дефектов на магнитную ленту

Какие магнитные ленты применяют для магнитографической дефектоскопии?

При магнитографической дефектоскопии применяют двухслойные, многослойные и монолитные магнитные ленты.

Двухслойные магнитные ленты состоят из немагнитной основы толщиной 10...40 мкм, на которую нанесен магнитоактивный рабочий слой. Он представляет собой пленку высохшего лака, в котором равномерно распределены частицы окисла железа. Линейный размер частиц магнитного порошка 0,1...1 мкм, объемная концентрация – 30...45 %. Частицы имеют

кубическую или игольчатую форму. Толщина рабочего слоя ленты составляет 5...25 мкм. При большей толщине он разрушается.

Чтобы увеличить массу частиц, сохранив прочность магнитно-активного слоя, иногда используют *пакет магнитных лент*. В этом случае амплитуда сигнала от сравнительно крупного дефекта при магнитографическом контроле в достаточно большом диапазоне толщин пакета увеличивается в n раз, где n – число лент в пакете.

Иногда применяют магнитные ленты, состоящие из немагнитной основы и двух *нанесенных друг на друга* магнитно-активных слоев. Слои имеют существенно отличающуюся коэрцитивную силу. Это позволяет расширить рабочий диапазон записываемых на ленту полей дефектов.

Стандартное обозначение двухслойной магнитной ленты включает пять основных элементов. Первый элемент – буква – указывает на основное назначение ленты: А – звукозапись, В – вычислительная техника, И – точная магнитная запись, Т – видеозапись. Второй элемент – цифра (от 0 до 9) – обозначает материал основы ленты: 2 – диацетат, 3 – триацетат, 4 – лавсан. Третий элемент – также цифра (от 0 до 9) – обозначает номинальную толщину ленты. Например, цифрам 2, 3, 4, ... лент типа А соответствуют толщины от 15 до 20, от 20 до 30, от 30 до 40 мкм. Четвертый элемент – цифровой индекс (от 01 до 99) – номер технологической разработки по системе нумерации, принятой на предприятии. Пятый элемент – округленное (до 0,25 мм) значение ширины ленты в миллиметрах. Дополнительные буквы Б, П, Р, приводимые после стандартного обозначения ленты, обозначают: Б – для бытовой аппаратуры, П – перфорированная, Р – для радиовещания.

Пример обозначения магнитной ленты: И4701-35 – лента для точной магнитной записи, изготовлена на лавсановой основе, номинальная толщина – 60...70 мкм, номер технологической разработки – 01, ширина ленты – 35 мм.

Ко второй группе относятся *монолитные* магнитные ленты, или однослойные, в которых магнитный порошок входит в основу как наполнитель. В качестве основы таких лент применяют полиамидные смолы и пластмассы. Магнитные ленты на полиамидной основе имеют значительную прочность, создают на порядок больший остаточный магнитный поток, чем ленты двухслойные, поэтому величина сигнала от крупного дефекта при считывании записи с такой ленты в несколько раз больше, чем при считывании с двухслойных. Однако такие магнитные ленты имеют недостатки – значительное остаточное удлинение при механических нагрузках, хрупкость при отрицательных температурах.

Поясните физику процесса записи магнитных полей рассеяния, создаваемых дефектами, на магнитную ленту.

При магнитографической дефектоскопии магнитная лента, плотно прижатая к поверхности объекта контроля, подвергается воздействию внешнего магнитного поля H_0 , возникающего на поверхности металла между полюсами намагничивающего устройства (рис. 5.1). В местах, где в изделии имеются дефекты сплошности, над поверхностью металла образуются магнитные поля рассеяния, также воздействующие на магнитно-активный слой ленты и вызывающие местное приращение напряженности поля на фоне внешнего поля H_0 . При уменьшении внешнего магнитного поля до нуля вся магнитная лента приобретает остаточную намагниченность M_1 , а ее участки, дополнительно находившиеся под действием поля дефекта, – M_2 (см. рис. 5.1). Разность $M_2 - M_1 = \Delta M_{12}$ называется контрастом магнитной записи на ленте.

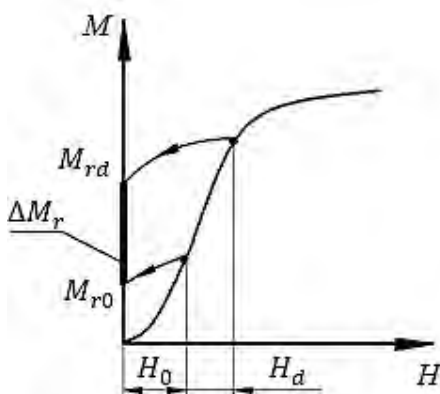


Рис. 5.1. Запись магнитных полей рассеяния на магнитную ленту

Итак, магнитная лента приобрела остаточную намагниченность и, будучи удаленной от изделия, образует собственное магнитное поле. Как будет показано далее, именно приращение этого остаточного поля в месте действия поля дефекта обуславливает сигнал, характеризующий дефект, на экране дефектоскопа при считывании записи с ленты [6, 7].

Почему график зависимости амплитуды сигнала, обусловленного дефектом, от напряженности намагничивающего поля (или величины тока в обмотке намагничивающего устройства) имеет максимум?

Контраст магнитной записи на ленте зависит от крутизны характеристики ленты, а значит, и от положения ее рабочей точки (точка кривой намагничивания ленты, соответствующая напряженности поля H_0). Чем круче характеристика, тем больше контраст магнитной записи на ленте. При возрастании напряженности приложенного магнитного поля изменяется положение рабочей

точки характеристики магнитной ленты. Так как крутизна характеристики вначале возрастает, а затем убывает, то даже при постоянной напряженности поля рассеяния дефекта контраст записи (а значит, и амплитуда сигнала от дефекта) вначале возрастает, достигая максимума, а затем убывает.

Какая суперпозиция магнитных полей записывается на магнитную ленту при поперечном намагничивании сварных соединений?

При поперечном намагничивании в процессе магнитографического контроля стыковых сварных соединений на магнитную ленту записывается в основном суперпозиция магнитостатических полей следующих видов: тангенциальные составляющие внешнего намагничивающего поля, поля валика шва и поля дефекта. Магнитными полями, обусловленными термическими неоднородностями, неоднородностями химического состава и структуры, чешуйчатостью шва можно пренебречь при контроле сварных соединений изделий из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, выполненных автоматической сваркой под слоем флюса.

Изобразите вид топографии тангенциальных составляющих внешнего намагничивающего поля, поля валика шва, а также суперпозиции магнитных полей, воздействующих на магнитную ленту на поверхности сварного соединения, при поперечном намагничивании шва.

Характер изменения топографии тангенциальной составляющей внешнего магнитного поля, поля валика шва и результирующего поля на поверхности качественного сварного соединения при его поперечном намагничивании изображен на рис. 5.2–5.4. Из рисунков видно, что тангенциальная составляющая поля валика шва на всей поверхности шва, кроме участков у его краев, направлена навстречу внешнему магнитному полю.

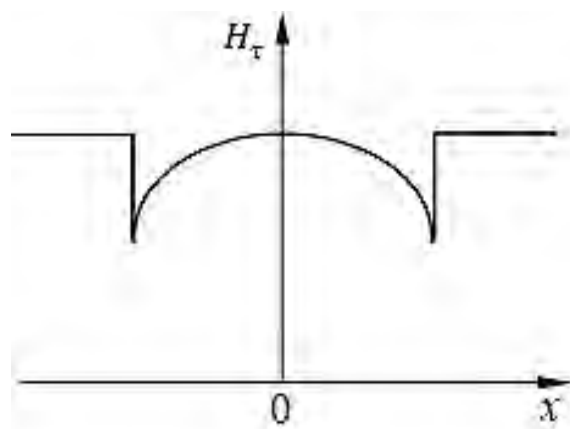


Рис. 5.2. Изменение тангенциальной составляющей напряженности внешнего поля на поверхности сварного соединения при намагничивании шва в поперечном направлении

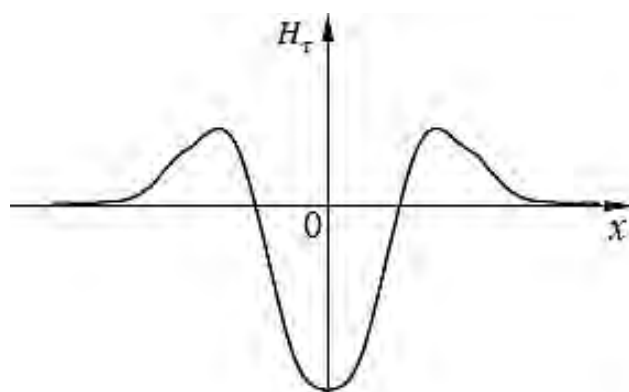


Рис. 5.3. Изменение тангенциальной составляющей поля выпуклости шва на поверхности сварного соединения

Объясняется это тем, что на выступающей поверхности выпуклости шва образуются магнитные полюсы, которые создают в шве поле, направленное навстречу внешнему полю. Поэтому сварной шов в поперечном направлении намагничен слабее окружающего его основного металла (см. рис. 5.4).

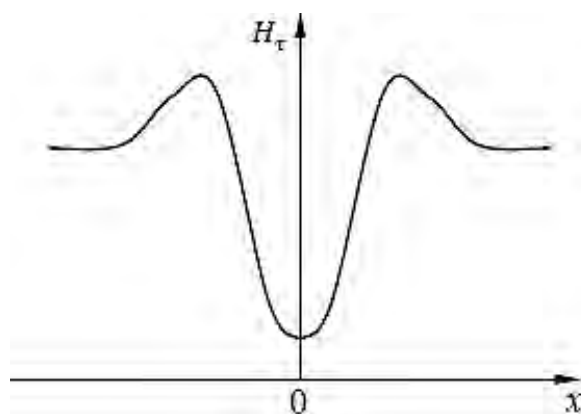


Рис. 5.4. Изменение тангенциальной составляющей результирующего магнитного поля на поверхности сварного соединения при намагничивании шва в поперечном направлении

Результирующее магнитное поле также изменяется неравномерно по ширине шва. Наиболее слабо сварной шов намагничен в плоскости его симметрии. Именно поэтому хуже всего при магнитографическом контроле обнаруживаются дефекты, находящиеся в плоскости симметрии шва. Чем меньше ширина и больше высота выпуклости шва, тем больше размагничивающее действие выпуклости шва и тем слабее намагничен шов.

Из рис. 5.4 видно, что сварной шов намагничен значительно слабее основного металла, находящегося в околошовной зоне. Этим объясняется ухудшение выявляемости несплошностей, расположенных в металле шва по сравнению со случаем контроля объектов, не имеющих выпуклости шва [7].

5.3. Преобразование магнитного отпечатка на ленте в электрический сигнал. Вид сигналограмм

В чем состоит принцип работы воспроизводящей индукционной магнитной головки?

Принцип работы воспроизводящей магнитной головки заключается в ответвлении части внешнего магнитного потока Φ_r , создаваемого намагниченными отпечатками на магнитной ленте, через сердечник головки. Полусные грани рабочего зазора головки при считывании записи с магнитной ленты должны перемещаться вдоль направления поляризации магнитной ленты. Для получения больших сигналов всегда стремятся достичь большего коэффициента шунтирования $A = \frac{\Psi}{\Phi_r} = \frac{r_3}{R_m + r_3}$. Здесь Ψ – магнитный поток, замыкающийся через сердечник магнитной головки, r_3 – магнитное сопротивление рабочего зазора магнитной головки, R_m – магнитное сопротивление ее сердечника. Обычно коэффициент шунтирования равен 0,85...0,95. Для его увеличения, а значит, и увеличения ЭДС на выходе индукционной магнитной головки и амплитуды сигнала при считывании записи с ленты в воспроизводящих головках применяют ферритовые сердечники. ЭДС, возникающая в обмотке головки при воспроизведении магнитной записи, определяется из выражения

$$E = w\Phi_r A 2\pi \frac{v}{\lambda} \cos 2\pi \frac{v}{\lambda} t,$$

где w – число витков обмотки; v – скорость воспроизведения; λ – длина записанных на магнитной ленте полуволновых диполей в направлении поляризации [6].

Что такое щелевая функция воспроизводящей магнитной головки?

Щелевой функцией воспроизводящей магнитной головки называют зависимость ЭДС в ее обмотке только от длины волны считываемой записи (рис. 5.5). Из графика щелевой функции следует, что по мере уменьшения длины волны λ считываемых с магнитной ленты магнитных диполей (при одинаковом уровне остаточной намагниченности этих участков ленты) ЭДС в обмотке воспроизводящей головки увеличивается. Это происходит до тех пор, пока длина полуволновых диполей не станет равной ширине рабочего зазора головки. В этом случае на выходе головки возникает наибольшая ЭДС. Повышение ЭДС в головке с укорочением длины волны считываемых диполей объясняется увеличением скорости изменения магнитного потока в сердечнике головки при постоянной скорости воспроизведения.

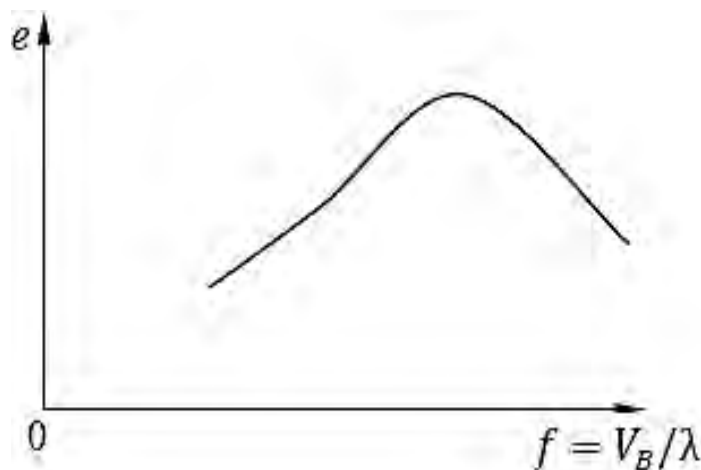


Рис. 5.5. Щелевая функция воспроизводящей магнитной головки

Что происходит при укорочении длины волны записанных на ленте магнитных отпечатков, когда длина их полуволновых диполей становится меньше ширины рабочего зазора воспроизводящей головки?

Когда длина полуволновых диполей становится меньше ширины рабочего зазора воспроизводящей головки, величина возникающей ЭДС круто падает. Это объясняется тем, что магнитный поток этих диполей начинает замыкаться внутри немагнитного зазора головки, не ответвляясь через ее сердечник и не пересекая витков обмотки. Кроме того, в этом случае возникают значительные частотные потери, связанные с ростом вихревых токов в сердечнике головки.

Как выбирают ширину рабочей щели воспроизводящих магнитных головок?

Ширину рабочей щели воспроизводящих головок выбирают из расчета $0,5...0,7$ от наименьшей длины волны полуволновых диполей магнитных отпечатков, которые создают поля дефектов на ленте (т. е. дефекта наружной поверхности, соответствующего наименьшему браковочному уровню). Это обеспечивает высокую чувствительность воспроизводящей головки в заданном диапазоне частот.

Для чего в магнитографических дефектоскопах применяют электронные усилители воспроизведения и какие требования предъявляют к ним?

Сигналы, снимаемые при считывании с воспроизводящих головок, необходимо предварительно усиливать. Для этого применяют электронные усилители воспроизведения. При разработке схемы усилителя воспроизведения магнитографических дефектоскопов, во избежание частотных искажений,

необходимо строго учитывать щелевую функцию считывающей головки, зависящую от ширины ее рабочей щели. Спад частотной характеристики усилителя следует рассчитывать таким образом, чтобы в результате сложения ее со щелевой функцией головки получилась суммарная частотная характеристика, близкая к прямой линии (рис. 5.6) [6].

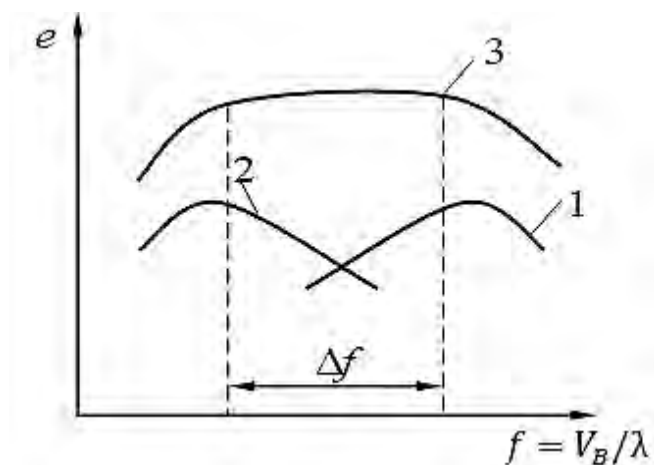


Рис. 5.6. К выбору частотной характеристики электронного усилителя воспроизведения: Δf – рабочая частота воспроизведения сигнала

Объясните вид сигналограммы на экране магнитографического дефектоскопа.

Пусть сварное соединение намагничивается в поперечном направлении. Если контроль происходит в приложенном магнитном поле, то в случае отсутствия дефекта в сварном шве магнитная лента получит различную намагниченность в зонах A , B и C (рис. 5.7, a).

Из рисунка видно, что две крайние зоны (A и C) будут иметь намагниченность, определяемую внешним полем H_0 , а зона B получит добавочную намагниченность, обусловленную действием поля выпуклости шва. При движении индукционной магнитной головки поперек ленты магнитный поток в сердечнике головки будет претерпевать изменения в четырех точках: при входе в зону A на одном краю ленты, в точке перехода из зоны A в B , т. к. зона B имеет отличную от A намагниченность; то же самое в точке перехода из B и C и при выходе из зоны C , только с противоположным знаком, т. к. здесь изменение магнитного потока противоположно (сравните возрастание и убывание магнитного потока в аналогичных точках перехода).

На экране осциллографа магнитографического дефектоскопа наблюдают сигналограмму, пропорциональную скорости изменения магнитного потока на ленте. Поэтому амплитуда сигнала в критических точках равна нулю. Аналогично можно объяснить вид сигналограммы, наблюдаемой при контроле

дефектного участка шва (рис. 5.7, б). От помех, обусловленных краями магнитной ленты, отстраиваются с помощью временной селекции [7].

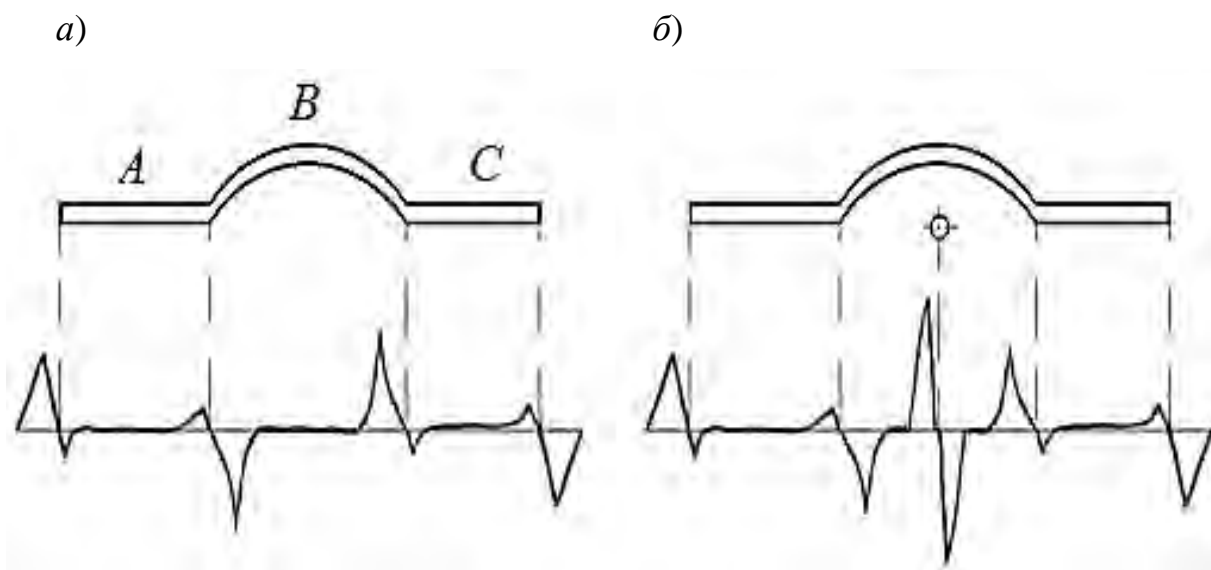


Рис. 5.7. Вид сигналограмм при отсутствии (а) и при наличии (б) дефекта в шве

Назовите основные характеристики сигнала от дефекта при магнитографической дефектоскопии.

Основными характеристиками сигнала от дефекта являются амплитуда и длительность импульса сигнала, обусловленного дефектом, на экране импульсной индикации дефектоскопа или уровень диаграммы на носителе регистратора.

Назовите основные характеристики выявленного дефекта при магнитографической дефектоскопии.

Основными характеристиками выявленного дефекта при магнитографическом контроле являются условная протяженность дефекта вдоль сварного шва при данной чувствительности дефектоскопа, условное расстояние между соседними дефектами, расположение дефектов по ширине шва.

5.4. Требования к сварным соединениям. Подготовка объекта контроля. Основные операции контроля

Каким требованиям, согласно ГОСТ 25225–82, должен удовлетворять сварной шов, подвергаемый магнитографическому контролю?

Магнитографическому контролю могут подвергаться стыковые сварные соединения, выполненные автоматической, полуавтоматической, ручной дуговой или газовой сваркой. Такие соединения должны быть приняты по внешнему виду и иметь:

- плавный переход от наплавленного металла шва к основному;
 - высоту выпуклости шва не более 25 % толщины основного металла для объектов с толщиной стенки до 16 мм и не более 4 мм для изделий с большей толщиной стенки;
 - коэффициент формы выпуклости шва (отношение ширины шва к высоте выпуклости) – не менее 7;
 - коэффициент формы сварного шва (отношение ширины шва к глубине проплавления) – не менее 2,5 для толщины основного металла до 8 мм, не менее значений от 2,5 до 2 – для толщин от 8 до 16 мм включительно и не менее 1,8 – для толщины свыше 16 мм;
 - высоту неровностей (чешуйчатости) на поверхности шва – не более 25 % высоты выпуклости шва, но не выше 1 мм.
- Магнитографическому контролю могут подвергаться и сварные швы со снятой (удаленной) выпуклостью шва.

Какая предельная толщина контролируемого металла при магнитографическом контроле?

Контролю подлежат изделия с толщиной стенки от 2 до 25 мм при одностороннем подходе к объекту [30].

Какую температуру не должен превышать металл контролируемого участка при магнитографическом контроле?

Металл контролируемой зоны должен иметь температуру не более 60 °С. Такие ограничения налагаются, т. к. для дефектоскопии ферромагнитных объектов применяют магнитные ленты на ацетатной, лавсановой или полиамидной основе, которые при высоких температурах теряют свои механические свойства.

Какие операции включает подготовка объекта к магнитографическому контролю?

Перед проведением магнитографического контроля сварной шов должен быть проверен внешним осмотром на отсутствие недопустимых наружных дефектов. С поверхности шва и околошовной зоны шириной не менее 20 мм с каждой стороны выпуклости шва должны быть устранены грубые неровности (чрезмерная чешуйчатость, затвердевшие брызги расплавленного металла и наплывы, высота которых превышает установленные нормы). Кроме того, должны быть удалены остатки шлака, грязь, лед и другие посторонние наслоения, мешающие плотному прилеганию магнитной ленты.

Какие операции выполняют при магнитографическом контроле?

Сначала производят подготовку объекта к магнитографическому контролю. Затем на поверхность *подготовленного* объекта, например сварного шва, следует наложить магнитную ленту так, чтобы она магнитным слоем плотно прилегала к его поверхности, огибая выпуклость по ширине шва. Ленту следует располагать симметрично шву по всему его периметру (допускаются местные ее смещения не более 3 мм; возможно повторное применение бывших в употреблении отрезков магнитной ленты после размагничивания, если на них отсутствуют местные повреждения). Длина используемой магнитной ленты должна превышать длину контролируемого шва не меньше чем на 120 мм.

Перед контролем следует осуществить привязку магнитной ленты к изделию. С этой целью на одном из ее концов мягким простым карандашом нужно пометить начало шва, указать наименование объекта и толщину стенки. Следует также пометить номер шва или номер чертежа, клеймо сварщика. Кроме того, на ленте надо указать тип намагничивающего устройства, режим намагничивания, дату контроля и фамилию дефектоскописта.

Магнитная лента должна быть зафиксирована на поверхности шва. Это можно сделать, например, с помощью резинового пояса или поролоновой подушки, если не применяется магнитоноситель, обладающий адгезией по отношению к металлу. Объект контроля вместе с плотно прижатой к нему магнитной лентой должен быть намагничен при режиме, указанном в технической документации. После намагничивания контролируемого изделия магнитная лента должна быть снята с объекта контроля и доставлена на место воспроизведения магнитной записи, при этом не допускают воздействия на нее магнитных полей напряженностью выше коэрцитивной силы ленты.

Перед воспроизведением магнитной записи дефектоскоп должен быть настроен по контрольной магнитограмме (эталонной ленте) или по встроенному калибратору. Запись эталонной ленты производят на сварном шве испытательного образца. Браковочный уровень на шкале импульсной индикации или на диаграмме регистратора должен соответствовать минимальной величине недопустимого дефекта, установленного нормативно-технической документацией.

При воспроизведении записи с магнитной ленты определяют вид и величину дефекта. По виду изображения магнитограммы на экране яркостной индикации дефектоскопа определяют характер дефекта, его местоположение по ширине сварного шва и протяженность. По виду сигналограммы на экране импульсной индикации определяют относительную величину дефекта, сравнивая амплитуду сигнала с браковочным уровнем. Если амплитуда сигнала от выявленной несплошности превышает браковочный уровень, то ее величина считается недопустимой [30].

5.5. Оборудование и материалы. Требования к намагничивающим устройствам. Магнитная лента. Ленточный локальный магнитоноситель

Какие устройства и материалы применяют при магнитографической дефектоскопии?

Для проведения магнитографической дефектоскопии изделий применяют:

- магнитную ленту;
- намагничивающие устройства;
- воспроизводящее устройство (дефектоскоп);
- источник электрического тока для питания намагничивающего устройства;
- устройство для прижатия магнитной ленты к поверхности контролируемого сварного шва;
- размагничивающее устройство;
- испытательный образец для изготовления контрольной магнитограммы;
- контрольную магнитограмму (эталонную ленту) для настройки чувствительности дефектоскопа;
- штангенциркуль, устройство для измерения высоты выпуклости шва, устройство для зачистки поверхности шва, если высота неровностей (чешуйчатости) на поверхности шва более 25 % высоты выпуклости шва.

Почему при МГК не нашло применение перпендикулярное намагничивание контролируемых сварных соединений с помощью соленоида?

Такая схема намагничивания, в связи с наличием поверхностных неровностей, приводила к фиксации на магнитной ленте множества полей рассеяния от поверхностных неровностей, которые создавали большой фон помех при контроле. Поэтому указанный способ намагничивания при магнитографическом контроле применения не нашел. Чаще всего для этих целей используют электромагниты с П-образными сердечниками.

Какие требования предъявляют к намагничивающим устройствам для МГК?

Намагничивающие устройства (НУ) должны обеспечивать возможность намагничивания сварного соединения перпендикулярно его продольной оси (если дефекты сплошности по статистическим данным ориентированы вдоль шва); предпочтительно исключать растекание магнитного потока в изделии; следует промагничивать объект на всю глубину (если не нужно обнаруживать только поверхностные дефекты). Последнее условие выполняется, если толщина

полюсов электромагнита в 2–3 раза превышает толщину стенки контролируемого изделия, а при толщине стенки 2 мм – в 10 раз. При этом должен обеспечиваться минимальный зазор между полюсами устройства и объектом контроля. Полюсы устройства не должны касаться магнитной ленты, уложенной на поверхность объекта.

Создаваемая напряженность магнитного поля должна доводить контролируемую зону до намагниченности, близкой к насыщению.

Устройство, по возможности, должно иметь минимальный вес и потреблять минимальную мощность.

Какие типы намагничивающих устройств для магнитографической дефектоскопии Вам известны?

Это подвижное намагничивающее устройство (ПНУ), дисковый электромагнит, намагничивающие вилки, намагничивающие пояса, намагничивающие клещи, «шагун».

Дисковый электромагнит состоит из двух дисков из магнитомягкого материала (обычно это сталь Ст 3, сталь 10, 09Г2 и т. д.) и соединяющей их перемычки, на которой размещена намагничивающая обмотка. На ней закреплено резиновое кольцо для прижатия магнитной ленты к поверхности изделия. Достоинства намагничивающего устройства – высокая производительность и удобство. Недостаток – величина магнитной индукции в контролируемых сечениях объекта невелика вследствие значительного растекания магнитного потока из-за линейного контакта между полюсами электромагнита и поверхностью изделия.

Подвижное намагничивающее устройство состоит из двух полюсов в виде параллелепипеда, скрепленных стальным сердечником, на котором находится электрическая катушка. Устройство опирается на четыре немагнитных (или магнитных) ролика. Ролики расположены таким образом, чтобы при установке намагничивающего устройства на контролируемое изделие между полюсами и объектом контроля возник зазор 2...3 мм. Наличие зазора облегчает перемещение намагничивающего устройства по поверхности изделия, однако зазор приводит к снижению индукции в контролируемом объекте.

Устройство типа «шагун» позволяет намагничивать изделие при минимальном зазоре между полюсами и объектом контроля. В нем полюсы электромагнита соединены с осями колес с помощью пружин. Электрическая и кинематическая схемы устройства позволяют выполнять следующие операции: при небольшом токе в катушке электромагнита полюсы устройства притягиваются к изделию, затем включается рабочий ток в катушке электромагнита, через 2...3 с отключается, устройство перемещают на некоторое расстояние, после чего цикл повторяется. Включение и выключение тока в катушке электромагнита после перемещения устройства на расстояние, близкое к длине

полюсов электромагнита, происходит автоматически. Перемещение устройства осуществляют вручную. Намагничивание изделия происходит при минимальном зазоре между полюсами электромагнита и изделием, что является достоинством устройства. Недостаток – большая масса устройства (35 кг).

Намагничивающие клещи представляют собой шарнирно раскрывающийся электромагнит. Он охватывает поперечное сечение контролируемой трубы по всему периметру, исключая растекание магнитного потока. Магнитная лента прижимается к поверхности кольцевого сварного шва с помощью резинового пояса. Устройство предназначено для контроля кольцевых сварных швов малого диаметра (до 114 мм).

Намагничивающие вилки представляют собой электромагнит с П-образным сердечником, полюсы которого содержат фасонные проемы, позволяющие обхватить половину окружности поперечного сечения намагничиваемой трубы. При этом магнитная лента охватывает шов по всему периметру, а намагничивание наиболее удаленного участка шва происходит благодаря растеканию магнитного потока в трубе. Намагничивающие вилки применяют для намагничивания кольцевых сварных швов труб малого диаметра (24,5 мм), например, экономайзера.

Намагничивающие пояса представляют собой два жгута изолированного провода, охватывающие трубу по обе стороны стыка (контролируемого сварного шва). Обмотки питаются от импульсного источника тока и создают магнитное поле, направленное вдоль оси трубы в одном направлении.

Назовите способы прижатия магнитной ленты к поверхности объекта контроля.

Магнитную ленту (магнитоноситель) прижимают к контролируемому изделию с помощью резиновых поясов, обрезиненных немагнитных роликов, поролоновой подушки. Разработаны также магнитные ленты, обладающие адгезией по отношению к металлу.

Назовите наиболее важные свойства магнитной ленты.

Основные свойства магнитной ленты:

- на магнитную ленту записывается преимущественно тангенциальная составляющая магнитного поля (расположенная в плоскости ленты);
- магнитная лента намагничивается до насыщения в сильных полях ($H > (5...8) H_c$ ленты);
- размагниченная магнитная лента нечувствительна к слабым магнитным полям $H < (0,35...0,4) H_c$;
- под действием магнитного поля лента приобретает остаточную намагниченность и позволяет длительно хранить запись;

– если магнитную ленту намагнитить полем H_1 , то она приобретет остаточную намагниченность и станет нечувствительной к полям того же направления напряженностью $H \leq H_1$.

Какие типы магнитных лент рекомендует ГОСТ 25225–82 для контроля изделий магнитографическим методом?

Для магнитографического контроля объектов из магнитомягких сталей с коэрцитивной силой $H_c < 10$ А/см следует применять магнитную ленту с H_c от 80 до 100 А/см.

При контроле изделий из высоколегированных и высокоуглеродистых сталей, имеющих $H_c > 10$ А/см, тип и параметры применяемой магнитной ленты в каждом конкретном случае должны быть оговорены в технической документации на магнитографический контроль объекта.

Магнитную ленту какой ширины следует применять при магнитографическом контроле сварных соединений?

Для магнитографического контроля должна применяться магнитная лента, ширина которой не меньше чем на 10 мм превышает ширину выпуклости сварного шва.

Как выбрать тип ленты при магнитографическом контроле?

Для выбора типа магнитной ленты необходимо знать оптимальное значение магнитной индукции в контролируемых сечениях сварного шва и кривую намагничивания материала изделия. Экспериментально установлено, что для обнаружения непровара величиной 10 % нужно создать в контролируемых сечениях индукцию 1,6...1,7 Тл. Поэтому для выбора типа магнитной ленты вначале по кривой намагничивания материала контролируемого изделия определяют напряженность поля, необходимую для получения этого значения индукции. Для большой группы низкоуглеродистых и низколегированных сталей $H_{cp} = 75...80$ А/см. Так как при намагничивании объекта в процессе контроля составляющая вектора напряженности магнитного поля, параллельная границе раздела сред, имеет по обе стороны границы одинаковые значения, а ферромагнитный слой ленты находится почти у самой поверхности, то на магнитно-активный слой ленты в его плоскости воздействует поле напряженностью H_{cp} . Это поле определяет положение рабочей характеристики магнитной ленты (рис. 5.8).

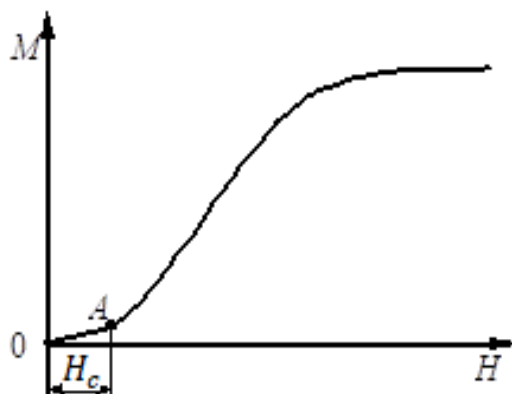


Рис. 5.8. Выбор типа ленты при магнитографическом контроле

Для получения широкого рабочего диапазона характеристики ленты рекомендуют использовать ленту такого типа, чтобы ее рабочая точка A совпадала с начальной точкой крутого возрастающего участка характеристики ленты. Напряженность поля, необходимая для намагничивания магнитного слоя ленты до указанной точки, приблизительно равна ее коэрцитивной силе. По таблице (табл. Б.2) для контроля таких сталей выбирают магнитную ленту И4701-35 с коэрцитивной силой $H_c = 80 \text{ А/см} \approx H_{cp}$, что хорошо согласуется с ГОСТ 25225–82 [6, 7].

Что собой представляет ленточный локальный магнитоноситель (ЛЛМ) и почему с его помощью можно выполнять измерения напряженности магнитного поля?

ЛЛМ представляет собой полоску магнитной ленты шириной 1,5...2 мм. Важной особенностью ЛЛМ является то, что его магнитный слой имеет толщину 5...25 мкм, т. е. представляет собой исключительно малую массу ферромагнетика. Поэтому можно считать, что ЛЛМ не может существенно исказить измеряемое магнитное поле. Кроме того, магнитный слой ЛЛМ, плотно прижатый к поверхности объекта, в силу непрерывности тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности раздела двух сред с различной магнитной проницаемостью, позволяет регистрировать величину тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля внутри изделия. Исследования показывают, что при использовании намагничивающих устройств, применяемых в магнитографической дефектоскопии, тангенциальные составляющие напряженности поля на обеих сторонах стенки объекта одинаковы. Это свидетельствует о том, что индукция по толщине стенки объекта приблизительно одинакова. Поэтому, если измерить тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля на поверхности объекта с одной его стороны, можно по кривой намагничивания материала определить значение индукции в соответствующем сечении стенки изделия [7].

Почему для измерения напряженности магнитного поля на поверхности сварного соединения нецелесообразно использовать преобразователи Холла, феррозондовые, магниторезистивные и другие преобразователи?

При магнитографическом контроле интерес представляют величина напряженности магнитного поля непосредственно у поверхности сварного шва и значение магнитной индукции в контролируемых сечениях шва. В этом случае применение известных методов магнитных измерений весьма затруднительно из-за больших размеров преобразователей. Кроме того, известные магнитные преобразователи трудно выставить у криволинейной поверхности шва так, чтобы измерить соответствующую составляющую напряженности магнитного поля. Поэтому при выполнении измерений напряженности магнитного поля непосредственно у поверхности шва целесообразно использовать промежуточный носитель информации о магнитном поле – ленточный локальный магнитоноситель.

Как градуируют ЛЛМ?

Градуировку ЛЛМ производят в однородном магнитном поле бесконечно длинного соленоида. С этой целью ЛЛМ закрепляют на немагнитной цилиндрической вставке (он принимает форму кольца) и помещают внутрь соленоида таким образом, чтобы оси соленоида и кольца совпадали. Кратковременно в соленоиде создают магнитное поле известной напряженности. Затем ЛЛМ извлекают и считывают запись, например, индукционной головкой магнитографического дефектоскопа. ЛЛМ размагничивают и повторяют описанные выше исследования при других значениях напряженности магнитного поля в соленоиде. Строят график зависимости амплитуды сигнала, обусловленного изменением остаточного магнитного потока при набегании индукционной головки на край ЛЛМ, от напряженности магнитного поля. Полученную градуировочную кривую в дальнейшем используют для измерения напряженности магнитного поля на поверхности сварного соединения [7].

Размагниченный ЛЛМ не позволяет измерять поля напряженностью $H < (0,3...0,4)H_c$ ленты, т. к. в этом случае лента намагничивается на участке начального (обратимого) намагничивания. Для измерения слабых магнитных полей можно использовать *поляризованный* (предварительно намагниченный, необязательно до насыщения ЛЛМ) [8, 9].

Поясним физику процесса записи магнитных полей в этом случае. В результате поляризации (намагничивания полем напряженностью H_{pp}) ЛЛМ приобретает остаточную намагниченность M_{rpp} (рис. 5.9). Если такой ЛЛМ поместить на штанге внутрь соленоида, то при намагничивании его полем противоположного направления H_1 остаточная намагниченность уменьшится

до M_{r1} . Причем чем больше $|H_1|$, тем меньшую остаточную намагниченность будет иметь поляризованный ЛЛМ.

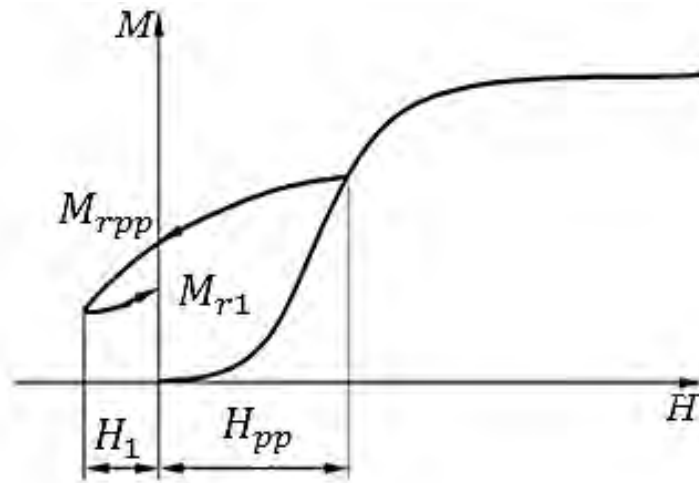


Рис. 5.9. Измерение магнитных полей с помощью поляризованного ЛЛМ

График зависимости остаточной намагниченности поляризованного ЛЛМ от напряженности поля представлен на рис. 5.10.

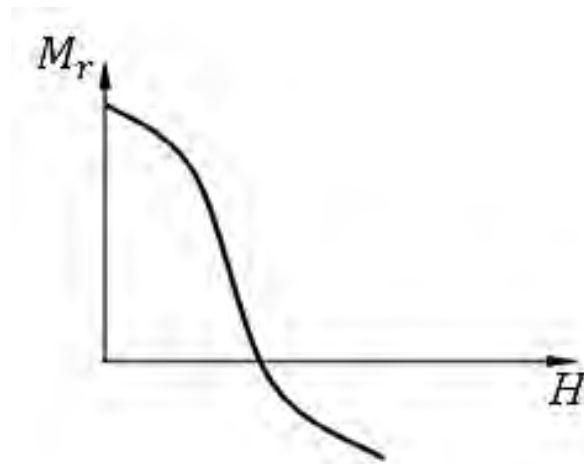


Рис. 5.10. Схематическая иллюстрация зависимости остаточной намагниченности поляризованного ЛЛМ от напряженности поля

Следовательно, поляризованный ЛЛМ позволяет измерять напряженности слабых магнитных полей [8, 9].

5.6. Определение режима намагничивания. Обобщенный параметр валика шва

Что такое обобщенный параметр выпуклости шва при магнитографическом контроле сварных соединений?

Под обобщенным параметром выпуклости шва при МГК понимают функцию $\psi = \frac{B}{C}$ (отношение ширины выпуклости к ее высоте), равным значениям которой, независимо от отдельно взятых B и C , всегда соответствует одинаковое значение размагничивающего поля выпуклости шва. Для предварительного выбора режима намагничивания при контроле сварных соединений, отличающихся только размерами выпуклости шва, построен график зависимости напряженности намагничивающего поля от обобщенного параметра выпуклости шва ψ , при котором на поверхности выпуклости шва обеспечивается одинаковое значение напряженности магнитного поля $H_{тр} = 75$ А/см в плоскости ее симметрии (рис. 5.11).

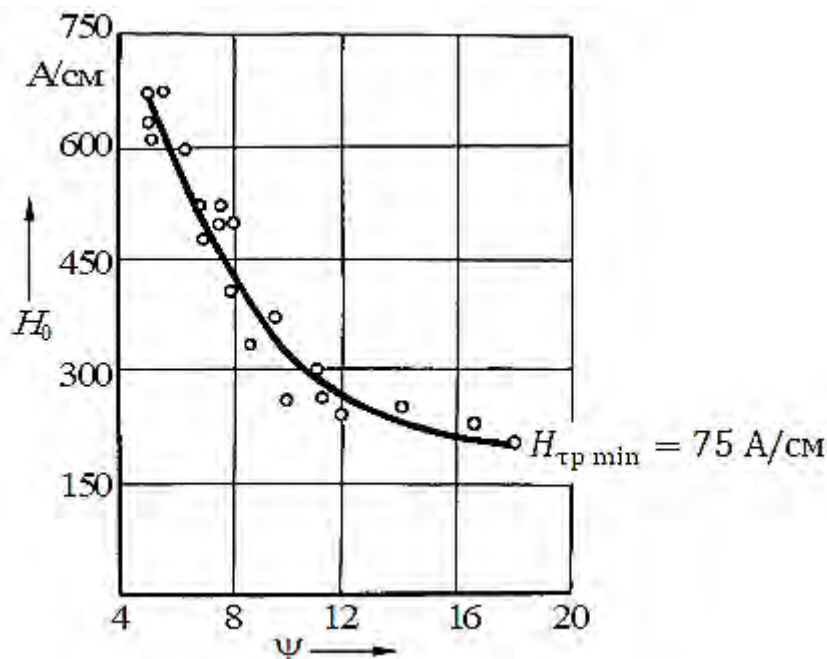


Рис. 5.11. Влияние коэффициента формы выпуклости шва на выбор режима намагничивания при магнитографическом контроле сварных соединений

Для сравнения на рис. 5.12 построена аналогичная зависимость от радиуса кривизны R_0 валика шва в плоскости его симметрии. Из графиков видно, что напряженность намагничивающего поля, обуславливающая одинаковые значения напряженности результирующего поля на поверхности шва в плоскости его симметрии, тесно коррелирует с ψ и в гораздо меньшей степени с R_0 [10].

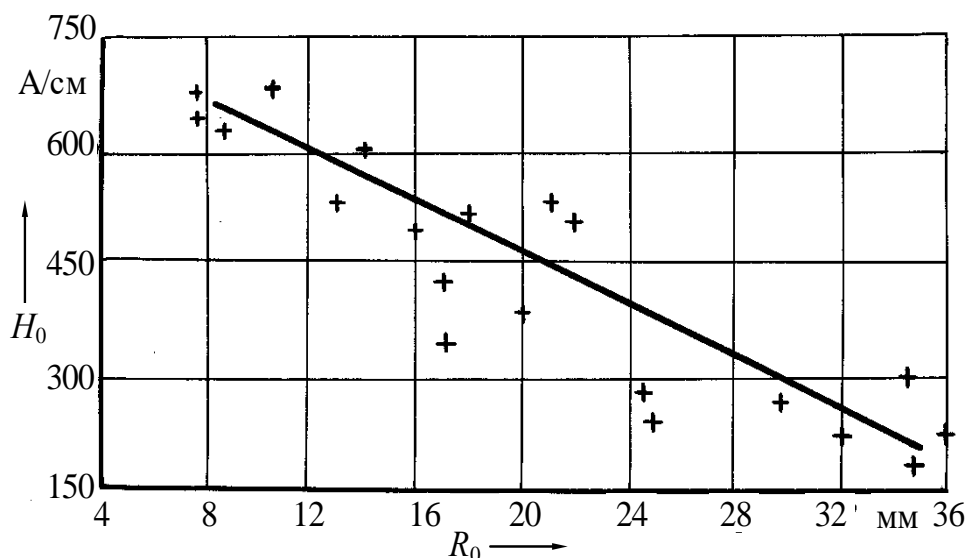


Рис. 5.12. Влияние радиуса кривизны выпуклости шва на выбор режима намагничивания при магнитографическом контроле сварных соединений

Как на практике можно установить требуемое значение напряженности магнитного поля на поверхности валика сварного шва?

Напряженность поля на поверхности шва в плоскости его симметрии измеряют с помощью проградуированного ЛЛМ. С этой целью ЛЛМ плотно прижимают ферромагнитным слоем к поверхности сварного шва таким образом, чтобы его край совпадал с плоскостью симметрии шва. Затем объект контроля вместе с ЛЛМ намагничивают полем рабочей напряженности. При этом вектор напряженности магнитного поля направлен поперек ЛЛМ. После отключения намагничивающего тока ЛЛМ снимают с поверхности объекта контроля и считывают запись с его края каким-нибудь преобразователем, например, индукционной магнитной головкой магнитографического дефектоскопа. Измеряют амплитуду сигнала, обусловленного изменением остаточного магнитного потока при набегании индукционной головки на край ЛЛМ. По предварительно построенной градуировочной кривой находят соответствующее значение напряженности магнитного поля.

Если напряженность поля не равна требуемому значению, то изменяют ток в катушке электромагнита намагничивающего устройства и измерение повторяют до тех пор, пока значение H_{cp} не станет равно $H_{тр}$.

5.7. Области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении. Чувствительность и разрешающая способность метода. Повышение эффективности МГК. Принцип раздельного контроля в магнитографической дефектоскопии

Объект намагничивают постоянным полем параллельно плоской поверхности. Как изменяются тангенциальная и нормальная составляющие поля дефекта на плоской поверхности объекта при увеличении глубины его расположения?

Характер изменения тангенциальной и нормальной составляющей поля внутреннего дефекта при увеличении глубины его залегания от поверхности изображен на рис. 5.13 и 5.14. Из рис. 5.13 видно, что максимум H_{xd} всегда находится в плоскости симметрии дефекта, перпендикулярной поверхности объекта. Но с увеличением глубины залегания дефекта H_{xd} убывает, а ее изменение поперек дефекта становится более плавным.

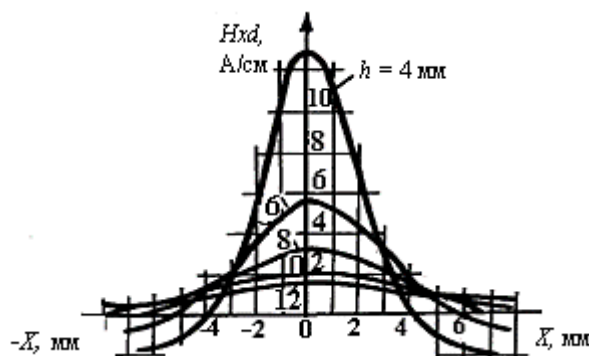


Рис. 5.13. Изменение тангенциальной составляющей поля дефекта на плоской поверхности с увеличением глубины его залегания h

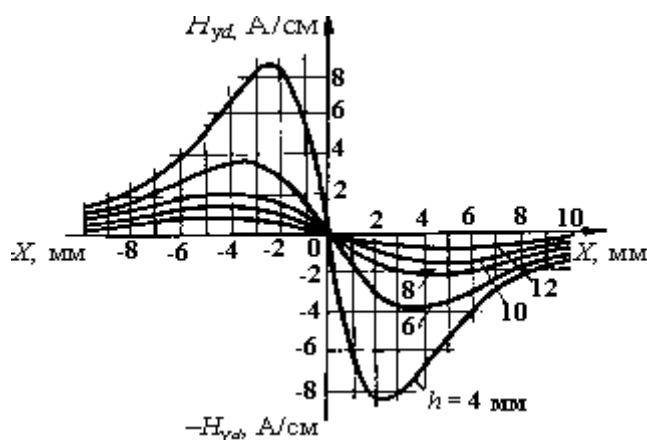


Рис. 5.14. Изменение нормальной составляющей поля дефекта на плоской поверхности с увеличением глубины его залегания h

H_{yd} в плоскости симметрии дефекта, перпендикулярной поверхности объекта, равно нулю, а ее экстремальные значения противоположного знака уменьшаются по модулю с увеличением глубины расположения дефекта.

Сварной шов намагничивают в поперечном направлении. Как изменяется тангенциальная составляющая поля дефекта на поверхности соединения при увеличении глубины расположения дефекта в плоскости симметрии шва?

Начиная с некоторой глубины залегания дефекта, зависящей от параметров валика шва, тангенциальная составляющая поля дефекта из колоколообразной трансформируется в двугорбую кривую, максимумы которой смещаются к краям выпуклости шва (рис. 5.15) [10].

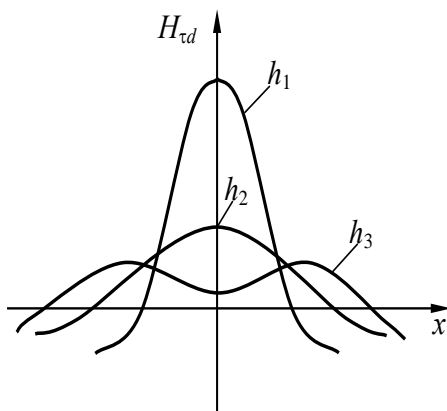


Рис. 5.15. Изменение тангенциальной составляющей поля дефекта при увеличении глубины его расположения в плоскости симметрии сварного шва $h_1 < h_2 < h_3$

Как изменяется топография результирующего магнитного поля на поверхности сварного соединения при поперечном намагничивании шва с увеличением глубины залегания дефекта?

На магнитную ленту в процессе намагничивания сварных соединений из низкоуглеродистых и ряда низколегированных сталей в поперечном направлении при магнитографическом контроле записывается в основном суперпозиция тангенциальных составляющих внешнего поля, поля валика шва и поля дефекта. Для изучения характера изменения тангенциальной составляющей результирующего поля на поверхности сварного соединения с увеличением глубины залегания дефекта необходимо суммировать указанные выше кривые.

Дадим схематическую иллюстрацию изменения выявляемости дефектов в сварном соединении при увеличении глубины расположения дефекта в плоскости симметрии шва.

Из полученных в результате суммирования графиков (рис. 5.16) видно, что с ростом глубины залегания дефекта в плоскости симметрии шва он вначале

проявляет себя колоколообразным выступом на кривой топографии результирующего поля на поверхности соединения (см. рис. 5.16, а, III), затем максимум исчезает и происходит лишь повышение уровня суммарной кривой (см. рис. 5.16, б, III). При дальнейшем увеличении глубины залегания дефекта на кривой топографии результирующего поля появляются либо два излома (см. рис. 5.16, в, III), если дефект имеет небольшую величину или намагничивающее поле недостаточно, либо два максимума (см. рис. 5.16, г, III). При дальнейшем увеличении глубины залегания дефекта эти максимумы смещаются к краям выпуклости шва, сливаясь с максимумами, обусловленными выпуклостью шва (см. рис. 5.16, д, III) [10].

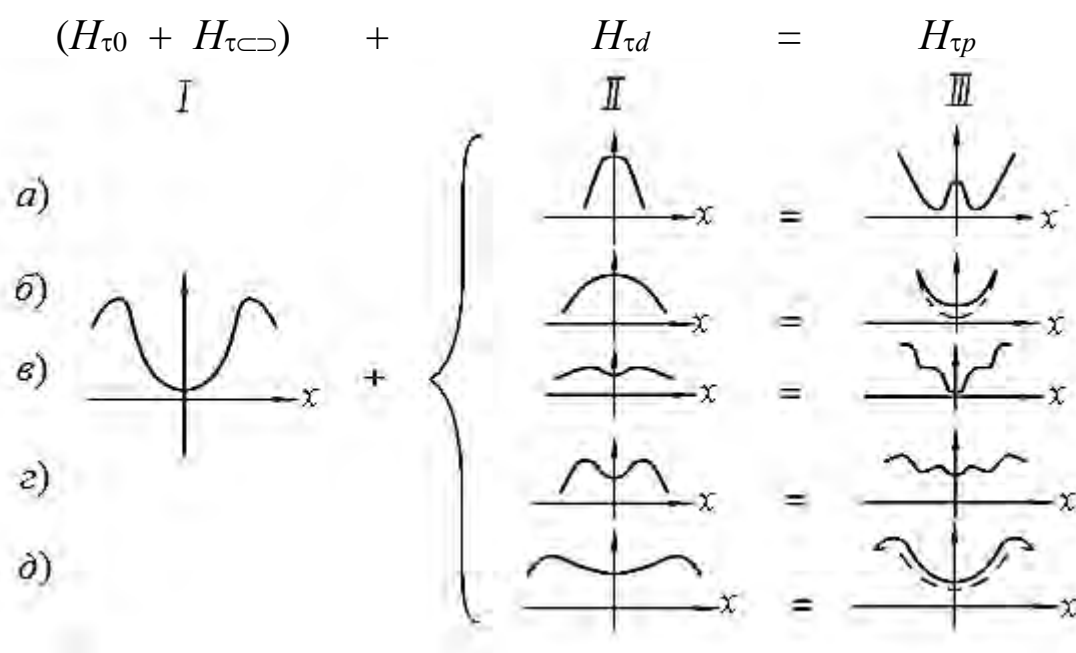


Рис. 5.16. Схематическая иллюстрация изменения тангенциальной составляющей внешнего магнитного поля и поля выпуклости шва, а также поля рассеяния дефекта и суперпозиции магнитных полей на поверхности сварного соединения при увеличении глубины расположения дефекта в плоскости симметрии шва

Укажите области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении.

Расчетным и экспериментальным путем определены также области качественно разной выявляемости дефектов и в точках, не совпадающих с плоскостью симметрии шва. Границы областей качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении при намагничивании объекта контроля поперек шва изображены на рис. 5.17.

Будем считать, что дефект обнаруживается однозначно, если одному-двум сигналам на экране дефектоскопа соответствует такое же число импульсов. Анализ топографий результирующих полей на поверхности сварного соеди-

нения показал, что если дефект находится в области Ia, то он обнаруживается однозначно, с возможностью завышения величины. В остальных областях дефект обнаруживается неоднозначно, причем в II, III, IV, V – с возможностью занижения величины, а в областях Ib – с возможностью завышения величины. Это может привести в первом и третьем случаях к перебраковке, а во втором – к недобраковке изделий.

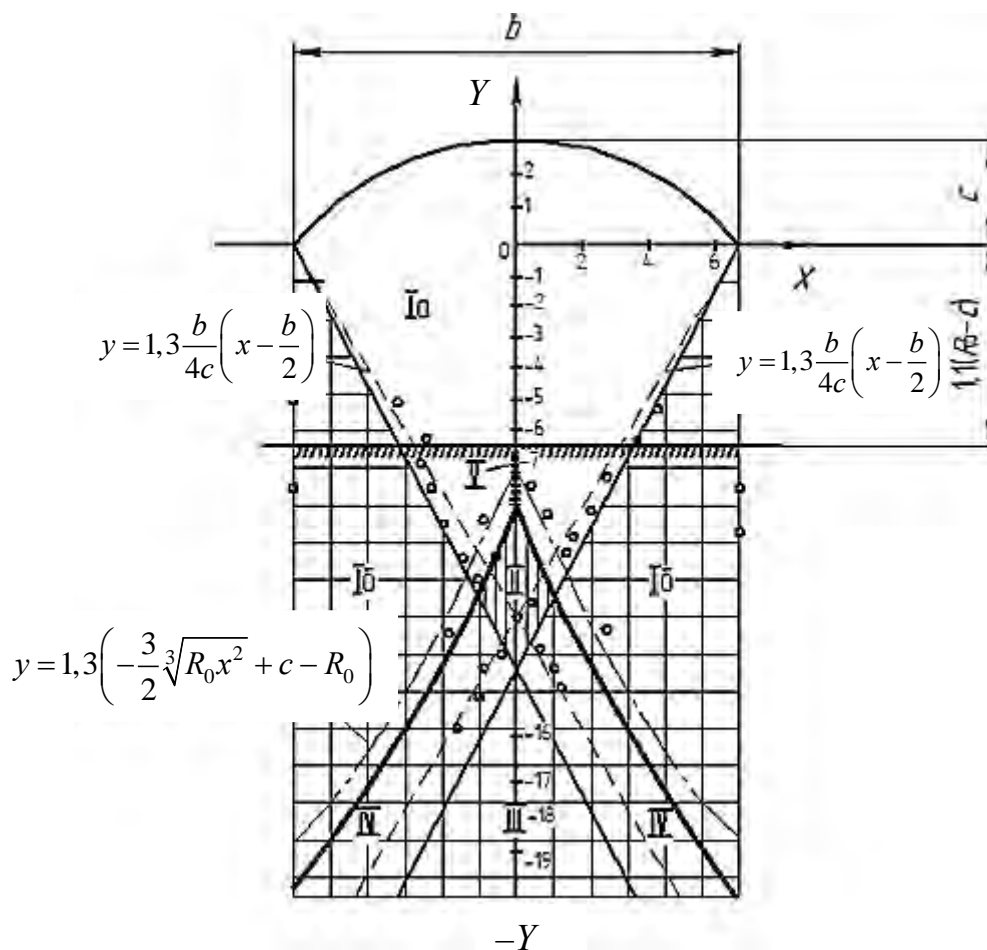


Рис. 5.17. Области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении

Чтобы исключить недобраковку изделий вследствие неоднозначности обнаружения дефектов, следует ограничить контролируемую толщину только теми областями, в которых дефекты обнаруживаются с возможностью завышения величины. Эта толщина зависит от расстояния до области Y и составляет приблизительно $1,1(R_0 - c)$, где $R_0 = v^2/8c$ – радиус кривизны выпуклости шва в плоскости его симметрии, где v – ширина шва; c – высота валика шва. Построены также номограммы, позволяющие по известным параметрам выпуклости шва (ширине v и высоте c) определить максимальную толщину контролируемого металла, в которой дефекты сплошности обнаруживаются с возможностью завышения величины (рис. 5.18) [10].

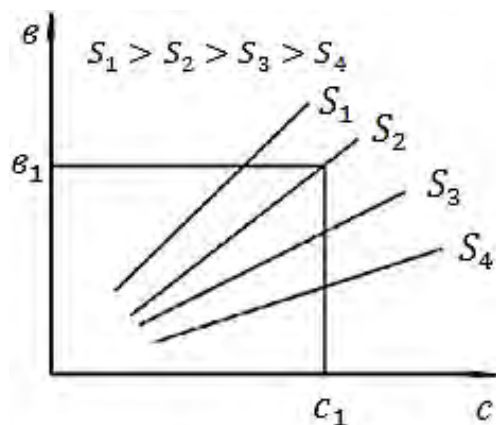


Рис. 5.18. Номограммы для определения области применения магнитографического метода при контроле сварных соединений

Для определения толщины S из точек осей координат c и b восстанавливают перпендикуляры, точка их пересечения укажет предельную толщину основного металла S , в которой протяженные несплошности выявляются только с возможностью перебраковки ($S_1 > S_2 > S_3 > S_4$).

Можно ли ожидать при магнитографической дефектоскопии сварных соединений большой перебраковки изделий?

Нет. Согласно статистическим данным, подавляющее большинство дефектов сплошности стыковых сварных соединений, выполненных плавлением, располагается в корне сварного шва. Речь идет о контроле изделий из низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Что такое предельная и реальная чувствительность метода контроля?

Предельная чувствительность метода контроля определяется минимальной величиной (в процентах от толщины стенки) уверенно обнаруживаемой модели дефекта.

Реальная чувствительность определяется минимальной величиной уверенно обнаруживаемого *реального* дефекта.

Считается, что дефект обнаруживается уверенно, если отношение амплитуд «сигнал – шум» не менее двух.

Какая реальная чувствительность магнитографического метода контроля ферромагнитных изделий?

При контроле сварных соединений без выпуклости сварного шва обнаруживаются непровары и трещины величиной 2...5 % и более, расположенные в корне шва поры и шлаковые включения – 15...18 %.

При контроле соединений с выпуклостью шва магнитографическим методом обнаруживаются непровары и трещины величиной 8...10 %, поры и шлаковые включения, находящиеся в корне шва, величиной 15...18 % от толщины. Такая чувствительность может быть достигнута только при соблюдении *принципа раздельного контроля сварных швов на наличие дефектов различных видов*. Он, в частности, предполагает для уверенного обнаружения компактных дефектов (пор и шлаковых включений) объект контроля намагничивать вдоль продольной оси шва, а запись с магнитной ленты считывать в направлении ее остаточной намагниченности. Если же сварной шов намагничивать в поперечном направлении, то при наличии выпуклости шва могут не обнаруживаться поры и непровары величиной до 80...90 % от толщины основного металла.

Почему при контроле сварных соединений изделий из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей рекомендуют изделие намагничивать поперек шва?

подавляющее большинство дефектов сплошности (непровары, подрезы, цепочки пор) в сварных соединениях из таких сталей ориентировано вдоль продольной оси шва. При намагничивании шва в поперечном направлении вектор напряженности намагничивающего поля ориентирован перпендикулярно направлению распространения дефектов и создаваемые ими поля рассеяния будут максимальными. Поэтому выявляемость таких дефектов будет наилучшая.

Почему при магнитографическом контроле сварных соединений, имеющих выпуклость шва, дефекты сплошности обнаруживаются хуже, чем в соединениях без выпуклости шва?

При намагничивании сварного шва в поперечном направлении на поверхности выпуклости шва появляются магнитные полюсы, которые создают внутри шва магнитное поле, направленное навстречу внешнему полю. В результате сварной шов оказывается намагниченным слабо (значительно слабее окружающего его основного металла). Это является основной причиной ухудшения выявляемости дефектов в сварных соединениях с выпуклостью шва.

Как изменится топография результирующего магнитного поля на поверхности сварного соединения, если сварной шов намагнитить под углом к его продольной оси?

Если сварной шов намагнитить под углом к продольной оси, то он будет намагничен сильнее по сравнению со случаем его намагничивания в поперечном направлении (рис. 5.19). Это обусловлено снижением размагничивающего фактора выпуклости шва. Последнее объясняется тем, что ширина шва вдоль этого направления больше его ширины в поперечном направлении (рис. 5.20).

Размагничивающее действие выпуклости шва обусловлено появлением магнитных полюсов на поверхности шва при намагничивании объекта, которые создают внутри соединения магнитное поле, направленное навстречу внешнему полю [10, 11].

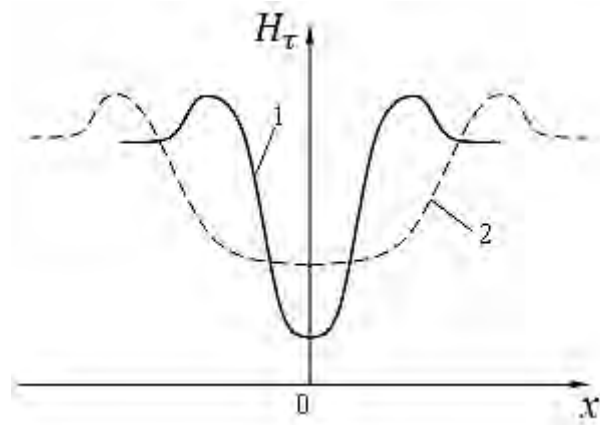


Рис. 5.19. Изменение топографии тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности сварного соединения: 1 – при намагничивании шва в поперечном направлении; 2 – при намагничивании под углом к продольной оси шва

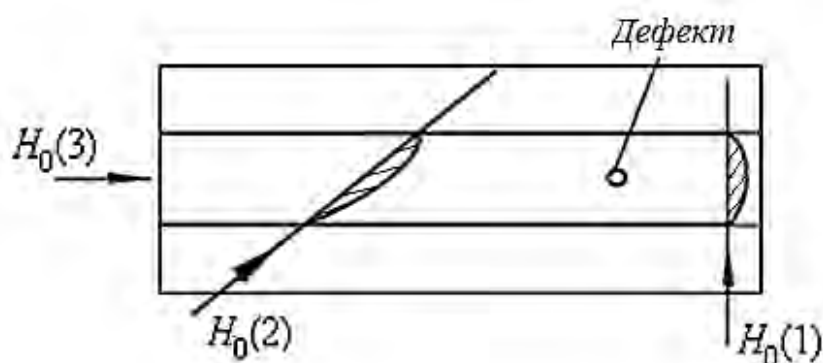


Рис. 5.20. К пояснению влияния направления намагничивания шва на обнаружение компактных дефектов при магнитном контроле: 1 – поперек шва; 2 – под углом к продольной оси шва; 3 – вдоль продольной оси шва; заштрихованы сечения выпуклости шва

Почему при намагничивании сварного соединения вдоль продольной оси шва и считывании записи с магнитной ленты вдоль линии намагничивания одиночные поры и шлаковые включения обнаруживаются лучше, чем при намагничивании шва в поперечном направлении?

При намагничивании сварного соединения вдоль продольной оси шва полностью исчезает размагничивающее действие выпуклости (валика) шва. Сварной шов оказывается намагниченным в продольном направлении до уровня основного металла. При этом возрастает тангенциальная составляющая поля компактного дефекта, т. к. она пропорциональна напряженности поля,

действующего в зоне дефекта. Это приводит к увеличению чувствительности контроля.

На рис. 5.21 схематично показан вид сигналограмм на экране магнитографического дефектоскопа при намагничивании сварного шва в поперечном (см. рис. 5.21, а, б) и в продольном направлениях (см. рис. 5.21, в, г).

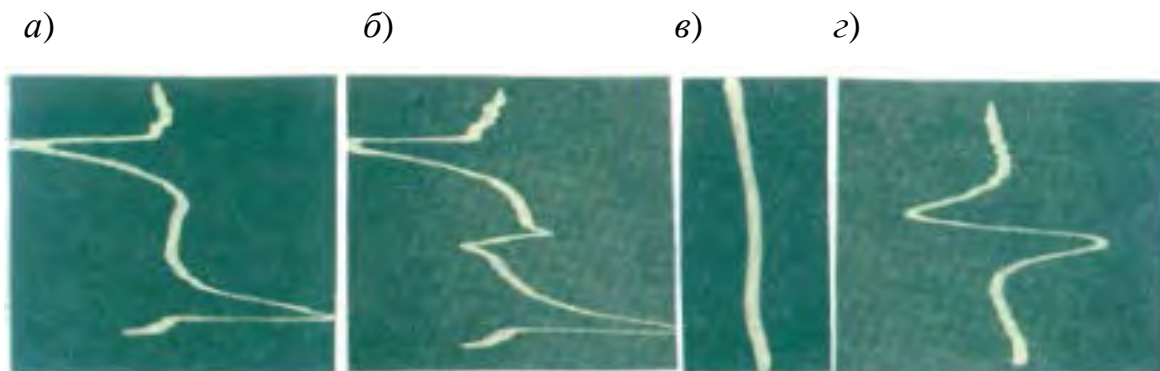


Рис. 5.21. Вид сигналограмм на экране магнитографического дефектоскопа в зависимости от направления намагничивания сварного шва: а – при намагничивании в поперечном направлении бездефектного шва; б – при намагничивании в поперечном направлении шва со сквозной порой ($d = 1,5$ мм; $h_p = 130$ % от толщины основного металла); в – при намагничивании в продольном направлении бездефектного шва; г – при намагничивании в продольном направлении шва с порой, находящейся в корне шва ($d = 1,5$ мм; $h_p = 40$ % от толщины основного металла)

Как видно из рисунков, если в сварном шве отсутствуют дефекты сплошности, то при традиционном способе магнитографического контроля краям шва соответствуют помехи на экране дефектоскопа (см. рис. 5.21, а). При намагничивании шва в продольном направлении такие помехи отсутствуют, т. к. выпуклость шва не создает возмущения магнитного потока (см. рис. 5.21, в). Амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, при продольном намагничивании значительно больше (см. рис. 5.21, г, б). Так, если при намагничивании шва в поперечном направлении могут не обнаруживаться поры и шлаковые включения, находящиеся в корне шва, величиной 80...90 % от толщины основного металла, то при намагничивании шва вдоль его продольной оси – от 15 до 20 %. То есть чувствительность метода возрастает в 4–5 раз по сравнению с традиционным методом магнитографического контроля [10–12].

Что такое разрешающая способность метода?

Разрешающая способность метода определяется минимальным расстоянием между двумя уверенно различаемыми дефектами в изделии при нормальных настройке дефектоскопа и условий контроля.

Объект контроля намагничивают вдоль цепочки пор. Запись с магнитной ленты считывают вдоль направления остаточной намагниченности ленты. Почему происходит повышение разрешающей способности метода по сравнению со случаем намагничивания объекта поперек цепочки пор?

При режимах, характерных для магнитного контроля, магнитные поля рассеяния компактных дефектов вытягиваются перпендикулярно вектору напряженности намагничивающего поля. Линии равных значений напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля имеют вид эллипсов (рис. 5.22).

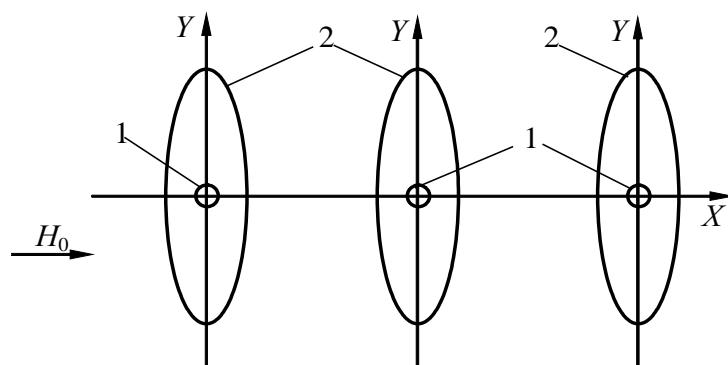


Рис. 5.22. Ориентация полей компактных дефектов при намагничивании объекта контроля вдоль цепочки несплошностей: 1 – дефект; 2 – линии равных значений напряженности магнитного поля в зоне компактных дефектов

Большие оси эллипсов перпендикулярны вектору напряженности намагничивающего поля. Поэтому при намагничивании изделия вдоль цепочки несплошностей (см. рис. 5.22) поля компактных дефектов будут ориентированы поперек цепочки и станут перекрываться при меньшем расстоянии между дефектами по сравнению со случаем намагничивания изделия поперек цепочки дефектов (рис. 5.23).

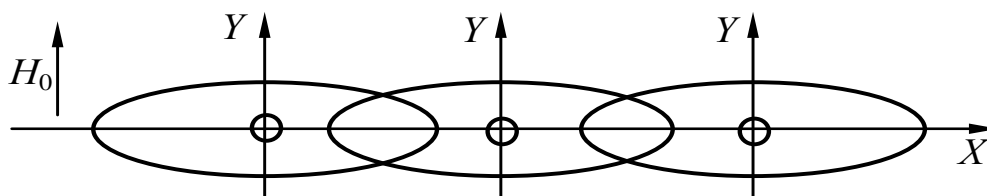


Рис. 5.23. Ориентация полей компактных дефектов при намагничивании объекта контроля поперек цепочки несплошностей

При этом разрешающая способность метода возрастает в 10–40 раз, удастся различить две находящиеся под краской или заполненные шлаком поры наружной поверхности даже в том случае, если они перекрываются [11, 12, 22].

Что собой представляют концентраторы магнитной индукции и когда их рекомендуют применять при магнитографическом контроле сварных соединений?

Концентраторы магнитной индукции представляют собой две пластины прямоугольного сечения из магнитомягкого материала (чаще всего из стали Ст 3, 09Г2 и др.), крепящиеся к полюсам намагничивающего устройства таким образом, что их рабочие поверхности располагаются по разные стороны выпуклости шва. Они позволяют повысить напряженность магнитного поля, а значит, и индукцию в зоне контроля. Концентраторы магнитной индукции рекомендуют использовать при контроле сварных швов с неблагоприятной выпуклостью (обычно при отношении ширины выпуклости шва к ее высоте менее 7).

Для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов предложено осуществлять намагничивание контролируемого изделия постоянным магнитом путем его перемещения над поверхностью ленты, уложенной на контролируемую поверхность. За счет чего обеспечивается высокая чувствительность метода контроля при небольшой массе магнита?

Высокая чувствительность метода при малой массе магнита (20...50 г) достигается вследствие значительного увеличения напряженности поля, действующего в зоне дефекта, при приближении к нему полюса магнита за счет контроля в приложенном поле, а также небольшого фона помех, т. к. перемещаемый над поверхностью магнитной ленты магнит равномерно намагничивает ее по всей площади. Способ позволяет повысить удобство, производительность и мобильность магнитографического метода контроля различных объектов. При этом снижается потребление электроэнергии и расширяется область применения метода за счет возможности контроля труднодоступных мест изделий, небольших деталей, а также объектов, находящихся во взрывоопасных помещениях, шахтах, под водой и т. д. [13–15].

Укажите назначение, область применения и преимущества способа магнитографического контроля, основанного на намагничивании объекта с уложенной на его поверхность магнитной лентой перемещаемым постоянным магнитом через ленту.

Назначение и область применения.

Объектами контроля являются изделия из ферромагнитных материалов, преимущественно несварные, например, отводы труб, шейки коленчатых валов, винты морских и речных судов, лопасти турбин и лопасти вертолетов, буровое оборудование, главные балки несущих конструкций и т. д. на предприятиях общего, химического, энергетического, транспортного машиностроения.

Обнаруживаются поверхностные и подповерхностные дефекты сплошности в деталях при их изготовлении, при ремонте, а также в труднодоступных местах изделий. Упрощается контроль объектов, находящихся на большой высоте, под водой, деталей без извлечения из узла, в том числе находящихся во взрывоопасных цехах, шахтах и т. д. Контроль может осуществляться как в приложенном поле, так и на остаточной намагниченности объекта. Важной особенностью является применение для намагничивания изделия постоянных магнитов массой 20...50 г, что в 100–200 раз легче традиционных электромагнитов. Это позволяет повысить удобство и мобильность метода, расширить область его применения. Для контроля используются серийные магнитографические дефектоскопы российского производства либо серийное считывающее устройство дефектоскопа совмещают с компьютером.

Преимущества способа: высокая мобильность, низкая трудоемкость, высокая производительность, обнаружение подповерхностных трещин, отсутствие источников питания намагничивающих устройств, незначительное влияние состояния контролируемой поверхности, применение серийного оборудования, простота конструкции, удобство в обслуживании, отсутствие необходимости высокой квалификации персонала, простота расшифровки записи с ленты.

Преимущества по сравнению с методами капиллярной дефектоскопии: появляется возможность обнаружения подповерхностных дефектов, не требуется механическая подготовка объекта контроля; более высокая чувствительность при обнаружении поверхностных трещин, более высокая производительность. *Преимущество по сравнению с магнитопорошковой дефектоскопией:* не требуется механическая подготовка поверхности объекта контроля; более высокая производительность [13–15].

Техническая характеристика.

Минимальное раскрытие обнаруживаемых трещин – 4 мкм.

Масса намагничивающего устройства – от 20 до 50 г.

Ширина магнитной ленты – 35, 50, 75 мм.

Время считывания записи с 1 м магнитной ленты – от 15 до 20 с.

Время на контроль участка 1000 × 75 мм – от 1 до 3 мин.

Обнаруживаются трещины поверхностные и подповерхностные, расположенные на глубине до 2...3 мм.

Почему при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитную ленту можно создать условия, при которых от опасного дефекта (трещины, узкие несплавления) на экране дефектоскопа будет наблюдаться дипольный сигнал, а от неопасного (риски, углубления от поверхностных неровностей) несколько искаженный однополярный сигнал?

При намагничивании объекта вместе с уложенной на его поверхность магнитной лентой перемещаемым постоянным магнитом через магнитную ленту на объект (и ленту) действуют одновременно тангенциальная и нормальная составляющие внешнего поля. Причем нормальная составляющая в несколько раз больше тангенциальной. Если в объекте имеется поверхностная трещина, то в формировании магнитного поля рассеяния дефекта участвует только тангенциальная составляющая внешнего поля, т. к. трещина не имеет «дна». Тангенциальная составляющая поля дефекта, которая воздействует на ленту, имеет колоколообразный вид. Если запись происходит на линейном участке характеристики ленты, а искажения в тракте воспроизведения дефектоскопа невелики, то на экране будет наблюдаться дипольный сигнал, т. к. большинство дефектоскопов оснащены дифференциальными индукционными магнитными головками, ЭДС в которых индуцируется при изменении остаточного магнитного потока на ленте (приблизительно сигнал имеет вид производной от колоколообразной кривой) (рис. 5.24, а).

В случае широкого поверхностного дефекта (риски, углубления) под действием нормальной составляющей поля постоянного магнита на «дне» углубления возникает магнитный полюс. От магнитного полюса «дна» формируется поле рассеяния, силовые линии по разные стороны от плоскости симметрии которого будут иметь противоположное направление. Это подтверждается экспериментально: при изменении направления считывания записи с ленты на противоположную полярность сигнала от углубления не изменяется. Тангенциальная составляющая этого поля рассеяния на поверхности объекта будет иметь синусоидальную форму. На это поле рассеяния налагается незначительное поле, создаваемое краями углубления. Оно возникает под действием слабой тангенциальной составляющей внешнего поля и имеет колоколообразную форму. Тангенциальная составляющая результирующего поля рассеяния углубления на поверхности объекта принимает несколько искаженную синусоидальную форму. Поэтому при считывании записи с ленты на экране дефектоскопа будет наблюдаться остроконечный импульс с двумя отрицательными полуволнами по разные его стороны. Симметрия его будет незначительно искажена из-за разной амплитуды отрицательных полуволн (несколько искаженный однополярный сигнал) (рис. 5.24, б) [15–17].

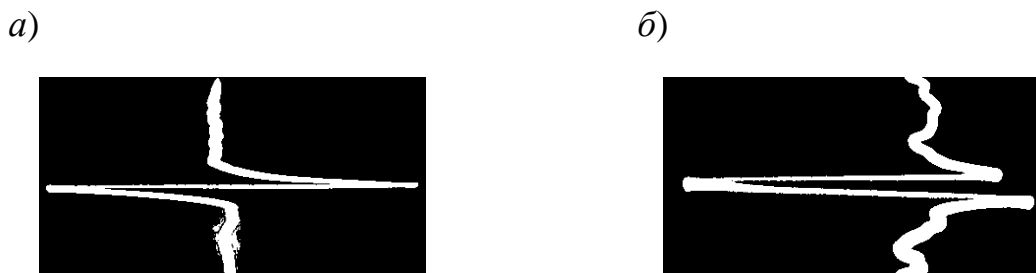


Рис. 5.24. Вид сигналограммы при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта перемещаемым постоянным магнитом через уложенную на его поверхность магнитную ленту: *а* – при обнаружении дефекта в виде трещины или узкого несплавления; *б* – при обнаружении широкого поверхностного дефекта (риски, углубления)

Почему появилась необходимость в новых информативных параметрах сигнала, обусловленного дефектом, при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитную ленту, уложенную на его поверхность?

Для большинства объектов трещины и несплавления являются недопустимыми дефектами. Поэтому определять их параметры (глубину, протяженность) нет необходимости. Допустимость остальных дефектов для данного объекта определяют путем сравнения сигнала, обусловленного ими, с браковочным уровнем. По этой причине, чтобы отличить трещины и узкие несплавления от других дефектов, введены такие информативные параметры сигнала, как *сигнал двуполярный*, если дефект имеет вид трещины или узкого несплавления, и *сигнал однополярный* (несколько искаженный), если дефект имеет вид риски, углубления от поверхностных неровностей или несквозного непровара. Это важно при дефектоскопии объектов, длительное время находившихся в эксплуатации и подвергнутых коррозии, т. к. при их контроле на экране дефектоскопа наблюдается большое количество импульсов. Трещины можно обнаружить по наличию среди них двуполярных импульсов [16, 17].

Почему при магнитографической дефектоскопии с намагничиванием объекта перемещаемым постоянным магнитом через магнитную ленту сигнал на экране дефектоскопа, обусловленный дефектом разной глубины, может приобрести трансформированный вид или иметь разную полярность полувольт?

При намагничивании контролируемого объекта наклоненным к его поверхности перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель тангенциальная составляющая внешнего поля направлена сначала в одну, а затем в противоположную сторону, а напряженности этих полей отличаются по модулю. Характер записи поля рассеяния дефекта на магнитоноситель при изменении глубины дефекта в этом случае проанализирован на рис. 5.25 и 5.26.

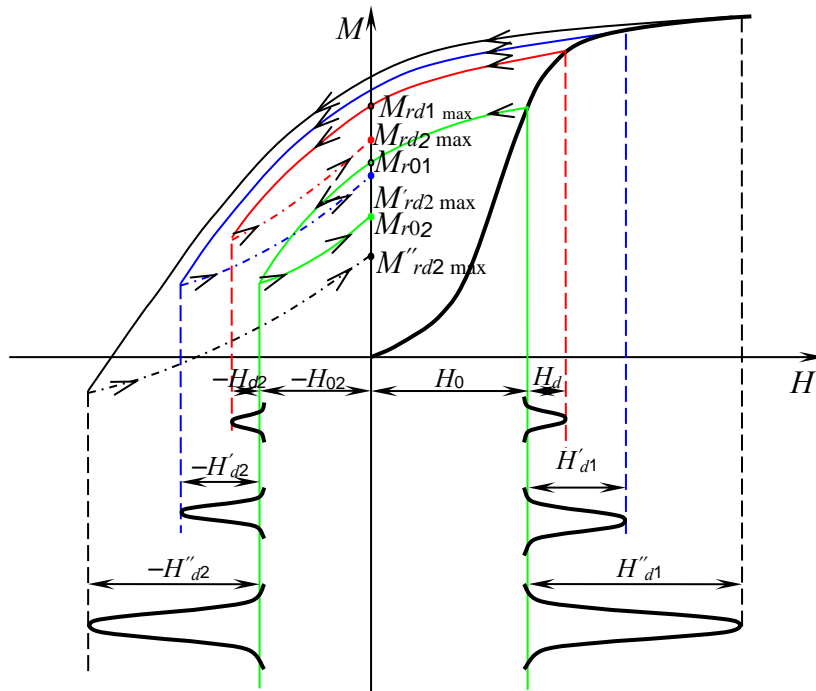


Рис. 5.25. К пояснению записи на магнитноситель полей рассеяния дефектов малой, средней и большой глубины при тангенциальном намагничивании объекта контроля сначала в одном, а затем противоположном направлении

Как видно из рис. 5.25, при намагничивании *в одном направлении*, большей величине поля рассеяния дефекта соответствует большая остаточная намагниченность ленты, т. к. запись полей рассеяния дефектов происходит на возрастающей кривой первоначального намагничивания ее магнитной характеристики.

При намагничивании *в противоположном направлении* вследствие гистерезисных явлений в ленте и записи полей на ниспадающей ветви петли гистерезиса ленты ее участки, находившиеся в поле рассеяния дефекта большей напряженности по мере роста крутизны ветви петли гистерезиса, приобретают меньшую остаточную намагниченность, чем участки, находившиеся в слабом поле. Большему дефекту будет соответствовать меньший размах сигнала.

Поэтому остаточная намагниченность ленты в зоне действия поля несплошности малой глубины имеет колоколообразную, а средней глубины – седлообразную форму (см. рис. 5.26, а, б, I). Соответствующие им сигналограммы имеют двуполярный и трансформированный вид (см. рис. 5.26, а, б, II). При большой глубине несплошности – двуполярный вид (см. рис. 5.26, в, II). Полярность полуволин сигнала зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобрела лента в месте действия поля рассеяния дефекта по сравнению с ее остаточной намагниченностью, обусловленной внешним полем (см. рис. 5.25 и 5.26, а, в, I).

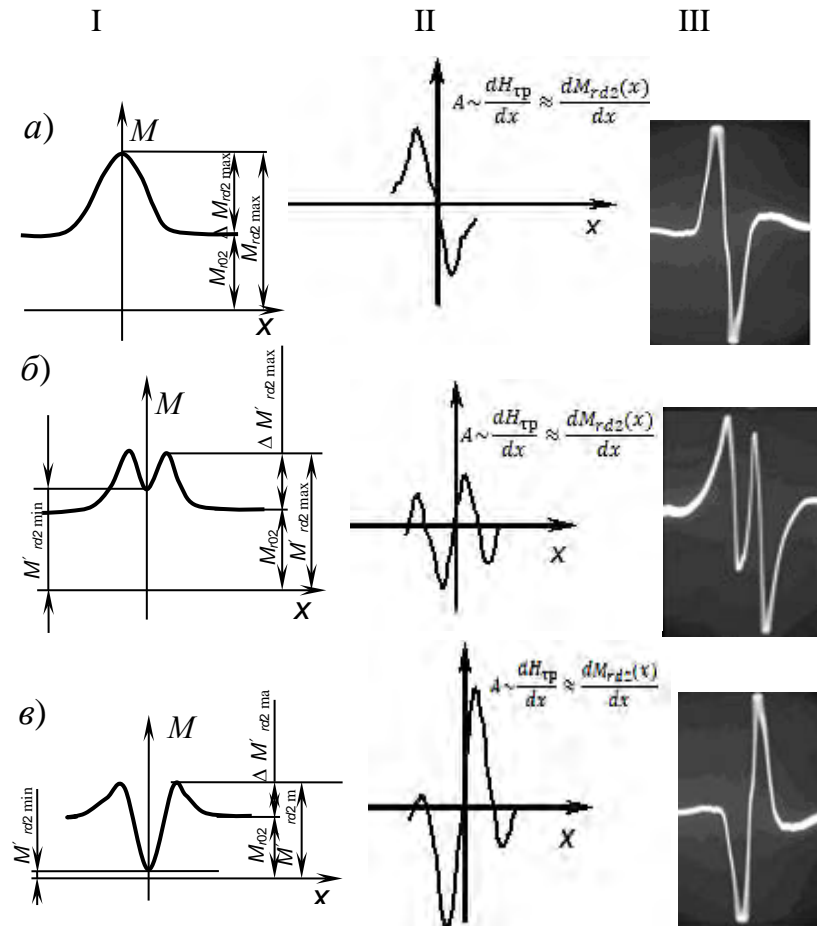


Рис. 5.26. Характер изменения остаточной намагниченности ленты и сигнала от дефекта с увеличением его глубины при намагничивании объекта контроля параллельно поверхности сначала в одном, а затем в противоположном направлении: а–в – остаточная намагниченность магнитной ленты и вид сигналограммы при обнаружении дефектов малой, средней и большой глубины соответственно; I – изменение остаточной намагниченности ленты в зоне действия поля рассеяния дефекта; II, III – теоретические и экспериментальные сигналограммы соответственно

Таким образом, из рис. 5.26, II и III видно, что при действии только тангенциальной составляющей внешнего поля, изменяющего направление на противоположное, вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте сигнал о наличии дефекта при увеличении его глубины может приобрести трансформированный вид или сменить полярность полуволн. Так как остаточная намагниченность ленты в зоне действия поля рассеяния дефекта зависит от величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта и крутизны магнитной характеристики ленты, то от этих факторов зависит вид сигнала (однополярный, двухполярный, трансформированный), обусловленного дефектом.

Это подтверждается экспериментально при моделировании исследуемого способа магнитографического контроля путем намагничивания контроли-

руемой зоны образца полем электромагнита сначала в одном, а затем в противоположном направлении. Для экспериментов использовали образец из стали Ст 3, в котором была профрезерована канавка шириной 0,8 мм, в том числе с монотонно возрастающей глубиной. Образец с уложенной на его поверхность магнитной лентой типа И4732-35 намагничивали перпендикулярно направлению распространения несплошности электромагнитом с П-образным сердечником сначала в одном, а затем в противоположном направлении. Запись с ленты считывали на дефектоскопе МДУ-2У [16–18].

Может ли сигнал, обусловленный несплошностью, сменить полярность при действии только нормальной составляющей поля, создаваемого перемещаемым постоянным магнитом, если объект намагничивают через магнитную ленту?

Экспериментально установлено, что сигнал, обусловленный несплошностью, может изменить полярность при действии только нормальной составляющей поля, создаваемого перемещаемым магнитом (протяженный дефект с «дном» располагается в плоскости симметрии магнита толщиной L). Изменение полярности сигнала происходит, например, при изменении расстояния от магнита с близко расположенными полюсными гранями до объекта или высоты магнита при постоянном расстоянии до объекта. Рассмотрим изменение остаточной намагниченности участка ленты, находящегося над одной половиной дефекта и в ее окрестностях, если намагничивание объекта вместе с магнитной лентой, уложенной на его поверхность, осуществляется перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями ($L = 6,5$ мм).

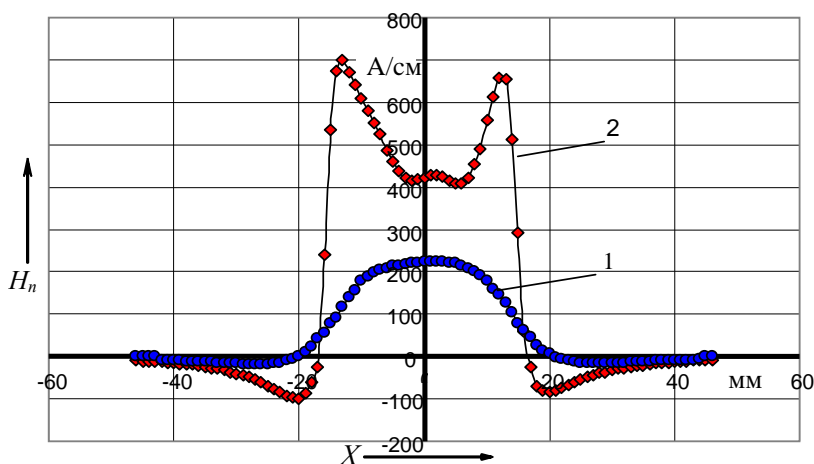


Рис. 5.27. Распределения нормальной составляющей магнитного поля на расстоянии Δ от поверхности грани с одним полюсом магнита в плоскости его симметрии: $L = 6,5$ мм (1 — $\Delta = 4$ мм; 2 — для $\Delta = 0,2$ мм)

Примем допущение, что напряженность тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта с «дном», обусловленного полюсностью «дна», вызванной нормальной составляющей внешнего поля, изменяется аналогично напряженности нормальной составляющей внешнего намагничивающего поля (как показано на рис. 5.27). При этом намагниченность магнитной ленты будет изменяться под действием тангенциальной составляющей поля в соответствии с ее магнитной характеристикой (рис. 5.28).

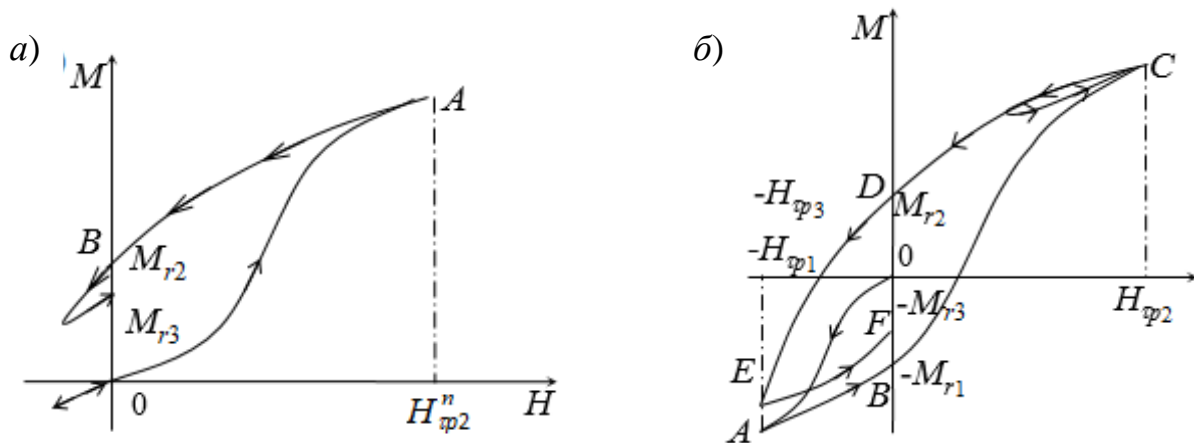


Рис. 5.28. Характер изменения намагниченности ленты при намагничивании объекта перпендикулярно поверхности перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями: *a* – при $\Delta = 4$ мм; *б* – при $\Delta = 0,2$ мм

При расстоянии от полюса магнита до объекта более 3 мм отрицательные экстремальные значения H_n в окрестностях граней магнита невелики (изменение аналогично рис. 5.27, кривая 1). Изменение намагниченности ленты при перемещении магнита в этом случае показано на рис. 5.28, *a*, соответствующий вид сигналограммы – на рис. 5.29, *в*. При уменьшении расстояния от поверхности магнита до объекта отрицательные полуволны H_n достигают 90...95 А/см (изменение нормальной составляющей напряженности поля магнита аналогично рис. 5.27, кривая 2). Такое поле способно вызвать в зоне несплошности сильное магнитное поле, обусловленное магнитными полюсами дна дефекта и поверхности объекта в зоне несплошности, которое запишется на магнитную ленту. В результате остаточная намагниченность над рассматриваемым участком дефекта и его окрестностями приобретет отрицательный знак ($-M_{r3}$), что соответствует смене полярности сигнала (рис. 5.29, *a*).

Трансформация сигнала, обусловленного углублением шириной 0,5 мм, при намагничивании объекта перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями представлена на рис. 5.29 [16, 19, 20].

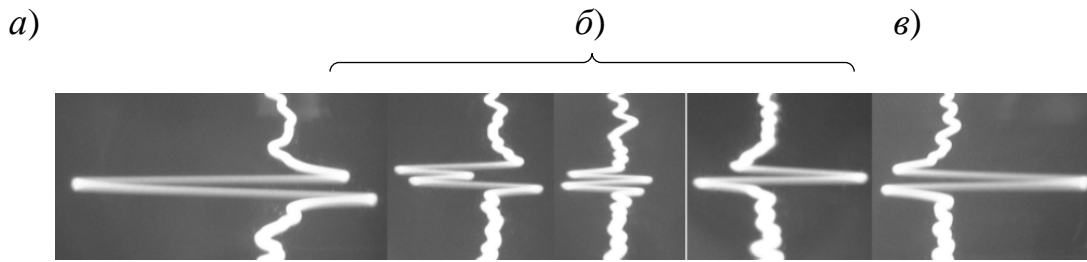


Рис. 5.29. Трансформация сигнала, обусловленного углублением шириной 0,5 мм, при намагничивании объекта перемещаемым постоянным магнитом с близко расположенными полюсными гранями: *a* – расстояние Δ от полюса магнита до объекта 0,2 мм; *б* – $1,75 \text{ мм} \leq \Delta \leq 2,25 \text{ мм}$; *в* – $\Delta = 4 \text{ мм}$

От чего зависит вид сигнала, обусловленного дефектом, при магнитографическом контроле?

Вид сигнала, обусловленного дефектом, зависит от соотношения между остаточной намагниченностью участка ленты, находившегося в зоне действия поля рассеяния дефекта, и ее остаточной намагниченностью, вызванной внешним полем перемещаемого магнита. Это соотношение может изменяться вследствие гистерезисных явлений в магнитной ленте при изменении величины намагничивающего и (или) размагничивающего поля, величины поля рассеяния дефекта, т. к. на следе перемещаемого постоянного магнита направление намагничивания тангенциальное, а в ряде случаев – нормальное поверхности контролируемого объекта изменяется на противоположное.

Сигнал от дефекта при считывании записи с ленты дифференциальной магнитной головкой имеет однополярный (или трансформированный) вид, если одна часть ленты под влиянием поля рассеяния дефекта приобретает большую, вторая – равную, а третья – меньшую остаточную намагниченность M_{rl} , чем лента под действием внешнего поля M_{r0} . Если $M_{rl} > M_{r0}$ или $M_{rl} < M_{r0}$, то сигнал имеет двуполярный вид, а полярность его полуволн зависит от того, большую или меньшую остаточную намагниченность приобретают участки магнитной ленты в зоне дефекта по сравнению с ее участками, находившимися под действием внешнего поля [16–20].

Что собой представляет программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля?

Программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля ферромагнитных объектов включает считывающий узел серийного дефектоскопа, совмещенный с компьютером, и программу обработки информации, позволяющую произвести отстройку от помех и представить результаты контроля в форме, удобной для восприятия: в виде изображения полей рассеяния дефектов, записанных на магнитноситель, или сигналограммы. На сигналограммах дефектам в виде риски, широкого несквозного несплавления, подреза

соответствуют однополярные электрические импульсы, а дефектам в виде трещины или узкого несплавления – двуполярные сигналы. На шкале яркостной индикации первой группе дефектов соответствуют светлые полосы, а второй – черные линии, по обе стороны которых наблюдаются широкие светлые полосы (рис. 5.30 и 5.31) [16, 21].

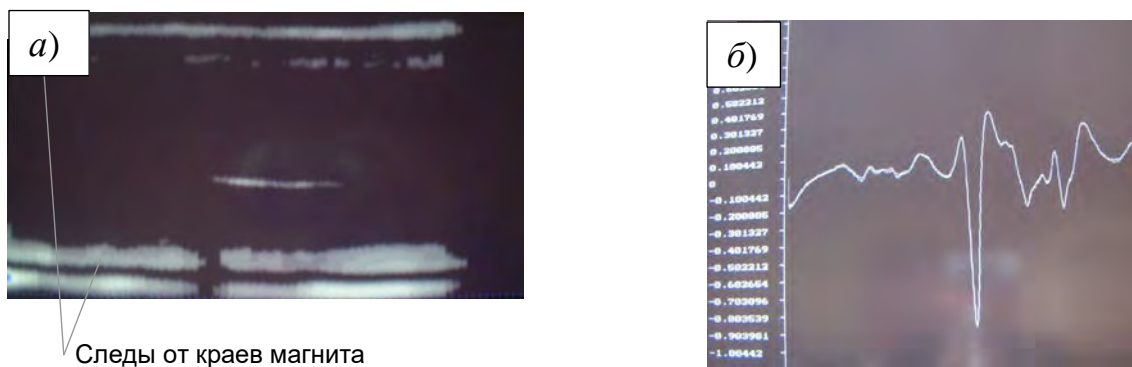


Рис. 5.30. Дефектограмма (а) и сигналограмма (б) образца с риской



Рис. 5.31. Дефектограмма (а) и сигналограмма (б) образца с трещиной

В чем заключается принцип раздельного контроля в магнитографической дефектоскопии?

Принцип раздельного контроля заключается в раздельном обнаружении дефектов различного вида. Он позволяет более полно учесть при контроле как специфические особенности дефектов сплошности (вид, форма, ориентация, место расположения и т. д.), так и конструктивно-технологические особенности сварных соединений.

Так, при обнаружении протяженных, ориентированных вдоль шва дефектов сварной шов следует намагничивать в поперечном направлении, используя при неблагоприятных размерах выпуклости шва (отношение ширины выпуклости к ее высоте меньше 7) концентраторы магнитной индукции. Для обнаружения компактных дефектов (пор, шлаковых включений) сварной шов целесообразно намагничивать в продольном направлении, а запись с магнитной ленты

считывать в направлении ее остаточной намагниченности. Более высокой чувствительности контроля швов на наличие разноориентированных трещин можно достичь, если поворачивать намагничивающее устройство в пределах $\pm 45^\circ$ к продольной оси шва в процессе его перемещения вдоль шва при намагничивании объекта.

Реализация принципа отдельного контроля позволяет повысить чувствительность магнитографического контроля сварных соединений на наличие протяженных (включая разноориентированные) и компактных дефектов в 4–5 раз, разрешающую способность метода – от 10 до 40 раз, уменьшить массу намагничивающих устройств в десятки раз. Чувствительность и разрешающая способность метода зависят от глубины расположения дефекта и размеров выпуклости шва. Например, удастся различить две поры наружной поверхности, находящиеся под слоем краски или заполненные шлаком, даже в том случае, когда они перекрываются [22, 23].

Если по статистическим данным известно, что в объекте могут находиться поверхностные и подповерхностные дефекты, то намагничивание объекта следует осуществлять перемещаемым постоянным магнитом через уложенную на его поверхность магнитную ленту.

Как намагнитить начальный и конечный участки сварного шва пластины в продольном направлении с помощью электромагнита с П-образным сердечником?

Чтобы намагнитить начальный и конечный участки сварного шва до требуемой индукции при продольном намагничивании, используют технологические пластины, выполненные из материала контролируемого изделия и пристыкованные к пластине у начала и конца шва. Это позволяет значительно уменьшить воздушный зазор и тем самым снизить магнитное сопротивление цепи «электромагнит – изделие».

Для намагничивания применяют намагничивающие устройства с электромагнитами, имеющими П-образные сердечники. Полюсы устройств содержат проемы, в которых проходит выпуклость сварного шва при перемещении намагничивающего устройства вдоль шва. Глубина проемов должна быть не менее 50 мм.

Можно ли произвести отстройку от помех, если воздействовать на магнитную ленту дополнительным магнитным полем известной напряженности?

В [24] с целью отстройки от помех предложено на ленту перед ее укладкой на изделие воздействовать полем заданной напряженности, направление которого совпадает с рабочим, а величина равна сумме внешнего поля и поля рассеяния от наибольшего допустимого дефекта. Проследим, как будет

изменяться намагниченность ленты в этом случае, если ее вначале поляризовали (намагнитили до насыщения). Итак, ленту вначале намагничивают противоположно направлению ее остаточной намагниченности полем заданной напряженности H_3 (при этом ее намагничивание происходит по кривой OCD (рис. 5.32), а затем совместно с изделием – полем рабочей напряженности H_p (намагничивание по кривой DA).

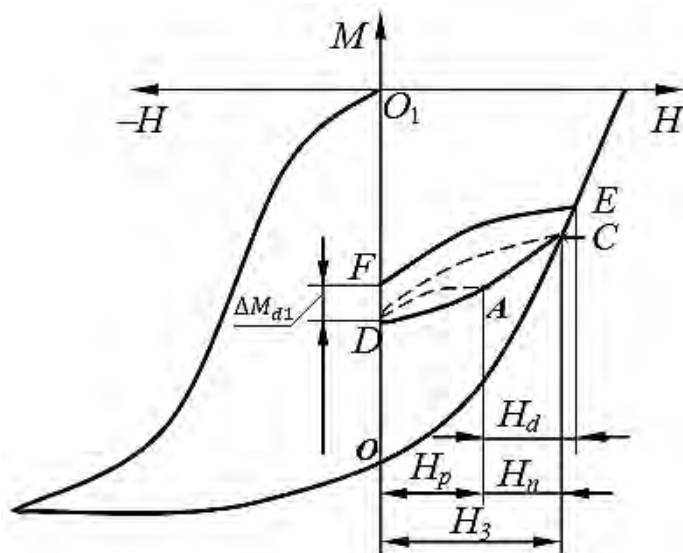


Рис. 5.32. Пояснение способа отстройки от помех с подмагничиванием ленты до записи полей дефектов

На ленту воздействуют также поля помех H_n , намагничивая отдельные ее участки до точки C , и поля недопустимых дефектов, намагничивая ее до точки E . После прекращения действия намагничивающего поля участки ленты, не подвергавшиеся действию полей помех и полей дефектов, приобретают остаточную намагниченность, соответствующую точке D (перемагничивание происходит по пунктирной линии AD).

Такую же намагниченность приобретают участки ленты в местах действия полей помех, меньших или равных полю H_n максимального допустимого дефекта. В последнем случае – под действием их поля (перемагничивание по верхней кривой CD). Контраст записи полей помех, меньших или равных H_n , будет равен нулю. Контраст записи на участках ленты, подвергшихся действию полей недопустимых дефектов H_d , равен $\Delta M_{d1} = FD$. Таким образом, отношение амплитуд «сигнал – шум» стремится к бесконечности (приборные шумы не учитываются).

Для повышения чувствительности контроля изделий, когда амплитуда полезного сигнала незначительно превышает амплитуду сигнала от наибольшего допустимого дефекта, а фон помех меньше сигналов от наибольшего

допустимого дефекта, в [25] предложен следующий способ магнитографического контроля. Перед оценкой качества изделия по записанной с контролируемого изделия магнитограмме ленту намагничивают *по участкам* с равными по амплитуде помехами дополнительным полем. Его направление совпадает с направлением поля рабочей напряженности, а величина меньше суммы поля рабочей напряженности и поля от наибольшего допустимого дефекта.

При осуществлении этого способа (рис. 5.33) поляризованная магнитная лента, прижатая к изделию, под действием поля рабочей напряженности H_p перемагничивается по сплошной кривой OCD . При этом участки ленты, на которые воздействуют также поля помех H_n , меньших поля наибольшего допустимого дефекта H_{nd} , перемагничиваются по сплошной кривой $OCEF$, а участки, на которые действуют поля недопустимых дефектов H_d , – по кривой $OCEJGH_1$. Затем на ленту, снятую с объекта контроля, воздействуют дополнительным полем напряженности H_3 , равным сумме поля рабочей напряженности и помех H_n , меньших поля наибольшего допустимого дефекта H_{nd} .

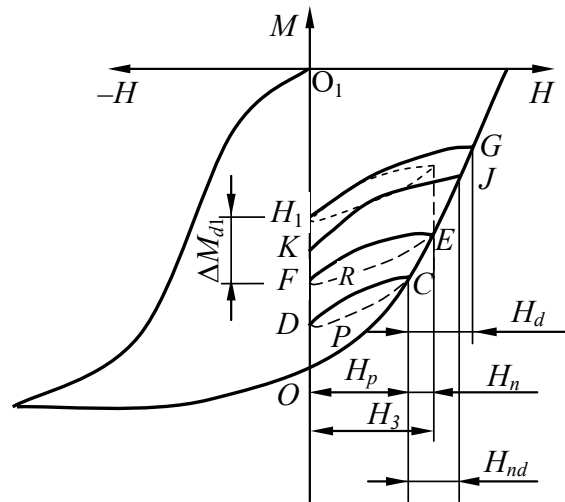


Рис. 5.33. К пояснению способа отстройки от помех с подмагничиванием ленты после записи полей рассеяния дефектов

При этом участки ленты, находившиеся только под действием поля рабочей напряженности, перемагничиваются по кривой $DPCEF$, а участки ленты, находившиеся под действием полей помех H_n , – по кривой $FREF$. Таким образом, контраст магнитной записи поля дефекта определяется отрезком $H_1F > H_1K$ (большим, чем в предыдущем случае).

При традиционном же способе магнитографического контроля с использованием поляризованной магнитной ленты объект контроля вместе с лентой намагничивают полем рабочей напряженности H_p (см. рис. 5.33). В этом

случае вся лента перемагничивается по кривой OCD , а ее участки, находившиеся под действием полей недопустимых дефектов H_d , – по кривой OGH_1 . Те участки, на которые воздействовало внешнее поле и поля-помехи, перемагничиваются по кривой OEF . Тогда контраст записи на ленте полей дефектов будет определяться отрезком DH_1 , а полей-помех – DF . Отношение амплитуд «сигнал – шум» будет равно $\frac{DH_1}{DF}$ [25].

При контроле сварных соединений, если намагничивание объекта контроля производят в поперечном направлении, описанные выше операции нужно выполнять, когда лента уложена на поверхность бездефектного контрольного образца с зачищенными неровностями валика шва [26].

Как должен поступить оператор-дефектоскопист, если при магнитографическом контроле стыкового сварного соединения произойдет смена полярности сигналов, соответствующих краям выпуклости шва?

При магнитографической дефектоскопии объектов с намагничиванием контролируемого сварного шва в поперечном направлении на сигналограмме может произойти смена полярности электрических сигналов, соответствующих краям выпуклости шва. Это может произойти, например, если величина протяженного дефекта в корне шва составляет свыше 50 % толщины контролируемого металла. При этом поле такого дефекта намагнитит сварной шов сильнее окружающего его металла. На рис. 5.34 показан характер изменения результирующего поля на поверхности бездефектного сварного шва (а) и соответствующий ему вид сигналограммы на экране дефектоскопа (б). На рис. 5.35 представлен характер изменения результирующего поля на поверхности сварного шва, содержащего крупный протяженный дефект ($h_d > 50$ % от толщины) (а), и соответствующий ему вид сигналограммы на экране дефектоскопа (б).

Чтобы получить в последнем случае достоверную информацию о дефекте на фоне помех, обусловленных выпуклостью шва, следует произвести повторный контроль шва с плотно прижатой к его поверхности размагниченной магнитной лентой слабым полем, при котором помехи, обусловленные выпуклостью шва, отсутствуют.

Напряженность поля выбирают из условия $0,2 H_c \leq H \leq 0,4 H_c$, где H_c – коэрцитивная сила ленты [45]. Поясним изложенное. На рис. 5.36 представлены графики зависимостей амплитуды сигнала, обусловленного дефектом величиной в 80 % от толщины металла (кривая 1), и амплитуды помех, обусловленных выпуклостью шва (кривая 2), у краев шва от режима намагничивания. Как видно из рисунка, если напряженность намагничивающего поля выбрана из указанного выше диапазона, то амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, достигает значительной величины. При этом дефект

отчетливо обнаруживается, в то время как помехи, обусловленные валиком шва, в слабых полях отсутствуют.

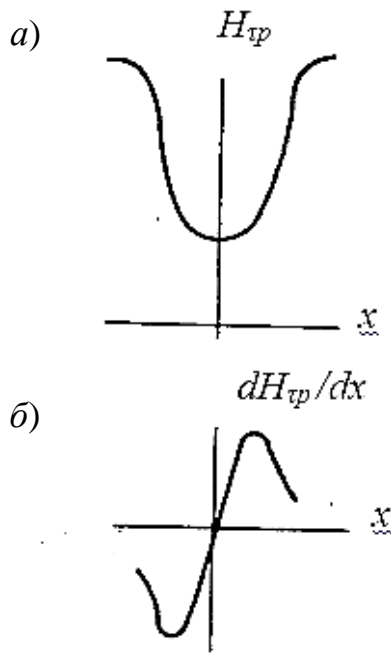


Рис. 5.34. Характер изменения результирующего поля на поверхности бездефектного сварного шва (а) и соответствующий ему вид сигналограммы на экране дефектоскопа (б)

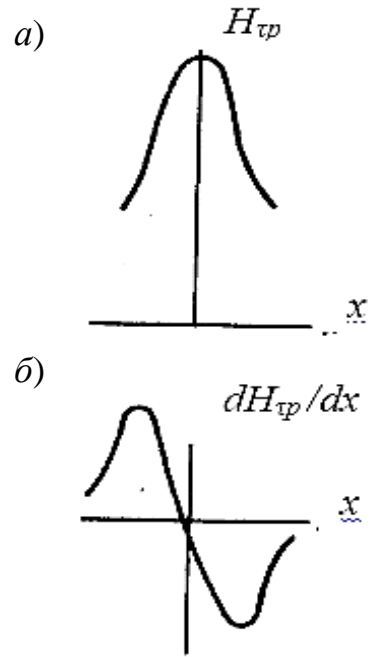


Рис. 5.35. Характер изменения результирующего поля на поверхности сварного шва, содержащего крупный протяженный дефект ($h_d > 50\%$ от толщины) (а), и соответствующий ему вид сигналограммы на экране дефектоскопа (б)

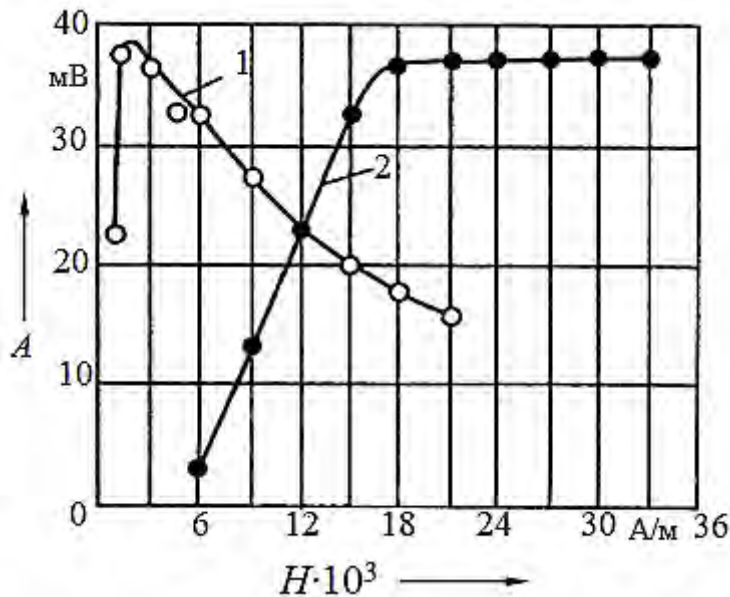


Рис. 5.36. Графики зависимостей амплитуды сигнала, обусловленного дефектом величиной в 80 % толщины (кривая 1), и амплитуды помех, обусловленных выпуклостью шва (кривая 2), от режима намагничивания

Можно ли достичь высокой чувствительности магнитографической дефектоскопии за счет применения различных способов намагничивания сначала объекта, а затем объекта вместе с уложенной на его поверхность магнитной лентой?

Этот способ целесообразно применять при дефектоскопии магнито жестких материалов. Чтобы достичь высокой чувствительности, объект сначала намагничивают последовательно не менее чем десятью импульсами поля напряженностью $4H_c \leq H \leq 4H_c + (40...50)$, А/см, где H_c – коэрцитивная сила материала контролируемого изделия, затем на контролируемую поверхность укладывают магнитную ленту и, увеличивая напряженность поля, доводят индукцию в контролируемом изделии до заданной. При этом магнитная лента не намагничивается до насыщения, что улучшает условия записи на ней магнитного поля рассеяния дефекта [46].

На рис. 5.37 представлены графики изменения намагниченности объекта при описываемом (сплошная линия) и традиционном (пунктирная линия) способах контроля. При намагничивании изделия серией последовательных импульсов поля напряженностью H_2 магнитная индукция в контролируемом сечении возрастает по несимметричным петлям магнитного гистерезиса, достигая установившегося цикла (заштрихованная область) (см. рис. 5.37).

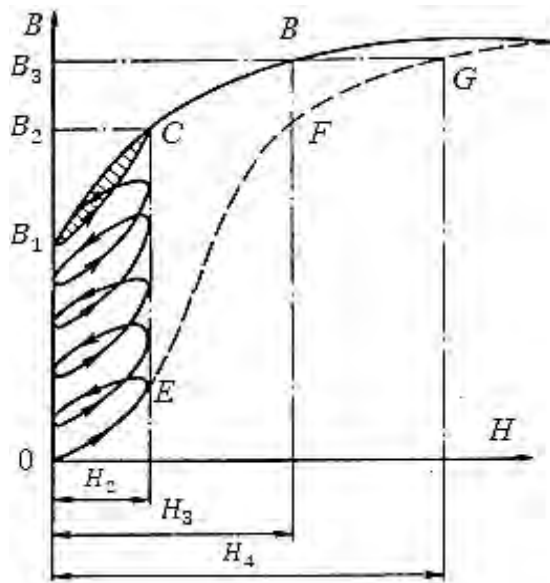


Рис. 5.37. Графики зависимостей магнитной индукции от напряженности поля при описанном и традиционном способах магнитографического контроля

После прекращения намагничивания объекта на его контролируемую поверхность укладывают магнитную ленту и увеличивают напряженность намагничивающего поля до заданной величины H_3 . Магнитная индукция в контролируемом сечении при этом изменяется по кривой B_1CD , достигая при

напряженности поля H_3 значения B_3 . Магнитная лента в этом случае намагничивается полем напряженностью H_3 по кривой первоначального намагничивания, не достигая намагниченности насыщения и сохраняя способность записи магнитных полей рассеяния, обусловленных дефектами. По результатам считывания записи с ленты на дефектоскопе определяют наличие дефектов сплошности в изделии.

Чтобы при традиционном способе контроля достичь такой же индукции в контролируемом сечении, нужно создать поле напряженностью H_4 , которое значительно больше H_3 и не всегда достижимо при контроле реальных объектов (см. рис. 5.37). В этом случае металл будет намагничиваться по пунктирной кривой $O E F G$.

Таким образом, описанный выше способ позволяет достичь заданной индукции в контролируемых сечениях при невысоких значениях напряженности намагничивающего поля без намагничивания магнитной ленты до насыщения и тем самым обеспечить высокую чувствительность контроля средне- и высоколегированных сталей.

Каковы причины снижения чувствительности магнитографической дефектоскопии объектов на остаточной намагниченности?

Одной из причин снижения чувствительности магнитографической дефектоскопии на остаточной намагниченности объекта является то, что поля рассеяния дефектов записываются на участке начального (обратимого) намагничивания ($H \leq H_{он}$) предварительно размагниченого магнитоносителя. На тех участках магнитоносителя, где $H_{\tau d} \leq H_{он}$, остаточная намагниченность магнитоносителя после его удаления от объекта контроля будет равна нулю, т. е. такие дефекты не будут обнаруживаться. Устранить этот недостаток можно, если применять поляризованный (предварительно намагниченный до насыщения) магнитоноситель и укладывать его на поверхность объекта так, чтобы направление его остаточной намагниченности было противоположно направлению остаточной намагниченности объекта.

Вторая причина заключается в том, что узкие поверхностные трещины создают на магнитоносителе узколокальные магнитные отпечатки. При считывании записи с магнитоносителя создаваемые ими магнитные потоки в основном замыкаются в рабочем зазоре индукционной магнитной головки магнитографического дефектоскопа и меньше – через ее сердечник. Кроме того, в этом случае возникают значительные частотные потери, связанные с ростом вихревых токов в сердечнике головки. Эту причину можно устранить, если магнитоноситель, помещенный на поверхность намагниченого объекта, переместить со скольжением на небольшое расстояние поперек трещины. На магнитоносителе при этом образуется широкий магнитный отпечаток, обуслов-

ленный дефектом. Последний при считывании записи с магнитоносителя создаст сильный магнитный поток, который замкнется через сердечник магнитной головки, и на экране дефектоскопа появится сигнал о наличии дефекта [7].

Третьей причиной снижения чувствительности является то, что амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, зависит от направления укладки магнитоносителя на объект контроля (поперек протяженного дефекта или вдоль него) [27].

Почему при МГК на остаточной намагниченности амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, зависит от направления укладки магнитоносителя на поверхность объекта?

Это объясняется следующим. Если магнитоноситель укладывают на поверхность предварительно намагниченного объекта поперек направления предполагаемой ориентации дефектов путем поворота его вокруг точки касания с объектом (рис. 5.38), то под действием поля рассеяния дефекта его участок, на котором будет происходить запись поля дефекта, приобретет более высокую намагниченность, чем другие его участки.

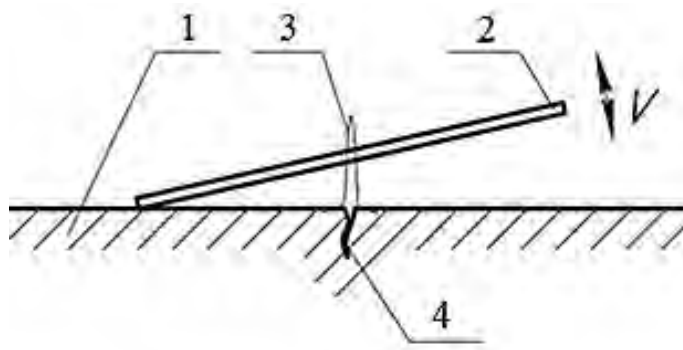


Рис. 5.38. Воздействие на магнитоноситель поля рассеяния дефекта, когда магнитоноситель укладывают на поверхность объекта или снимают с поверхности поперек направления предполагаемой ориентации дефектов: 1 – объект контроля; 2 – магнитоноситель; 3 – поле рассеяния дефекта; 4 – дефект сплошности

На рис. 5.38 показано, как в процессе укладки магнитоносителя на поверхность намагниченного объекта происходит воздействие на него поля рассеяния дефекта. На рис. 5.39 изображен магнитоноситель на поверхности объекта, находящийся под действием поля рассеяния дефекта.

Объясним процесс записи поля дефекта в этом случае.

Положение рабочей точки характеристики магнитоносителя в зоне дефекта будет определять суперпозиция внешнего поля, обусловленного полюсностью, возникшей на поверхности объекта при его намагничивании, и поля рассеяния дефекта при повороте магнитоносителя ($H_0 + H_{d1}$) (рис. 5.40). На магнитоноситель, находящийся на поверхности объекта, локально дополни-

тельно действует поле рассеяния дефекта H_{d2} (см. рис. 5.40). После снятия магнитоносителя с объекта снизу вверх контраст записи на участке магнитоносителя, находившегося над дефектом, будет определяться отрезком $\Delta M'_r = M_{r2} - M_{r1}$, где M_{r1} – остаточная намагниченность участка магнитоносителя, обусловленная суперпозицией полей $H_0 + H_{d1}$; M_{r2} – остаточная намагниченность магнитоносителя, находившегося под действием магнитных полей $H_0 + H_{d2}$ (см. рис. 5.40).

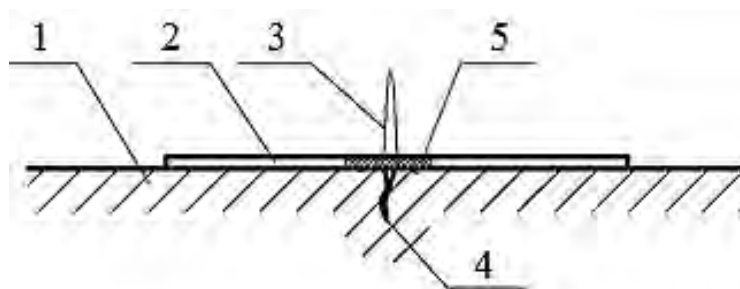


Рис. 5.39. Магнитоноситель на поверхности объекта, находящийся под действием поля рассеяния дефекта, после его укладки поперек направления предполагаемой ориентации дефектов: 1 – объект контроля; 2 – магнитоноситель; 3 – поле рассеяния дефекта; 4 – дефект сплошности; 5 – участок магнитоносителя с более высокой остаточной намагниченностью

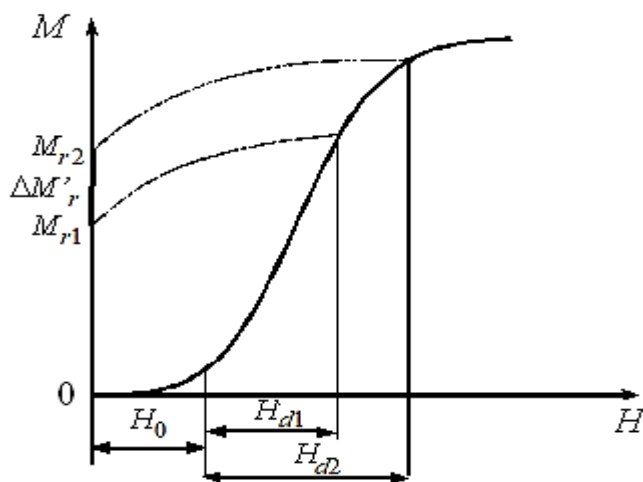


Рис. 5.40. Контраст записи поля дефекта на магнитоносителе, если его укладывали на контролируруемую поверхность намагниченного объекта поперек направления предполагаемой ориентации дефектов, после его снятия с объекта снизу вверх

Если магнитоноситель укладывают на поверхность контролируемого участка последовательно от его начала вдоль направления предполагаемой ориентации дефектов или сверху, снимая с поверхности вдоль того же направления, то амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, будет больше, т. к. рабочая точка будет находиться у начала крутого возрастающего участка

его характеристики. Рабочий диапазон характеристики магнитоносителя будет шире. При такой укладке на магнитоноситель будут действовать только внешнее поле H_0 , обусловленное полюсностью объекта, и поле рассеяния дефекта H_{d2} (рис. 5.41).

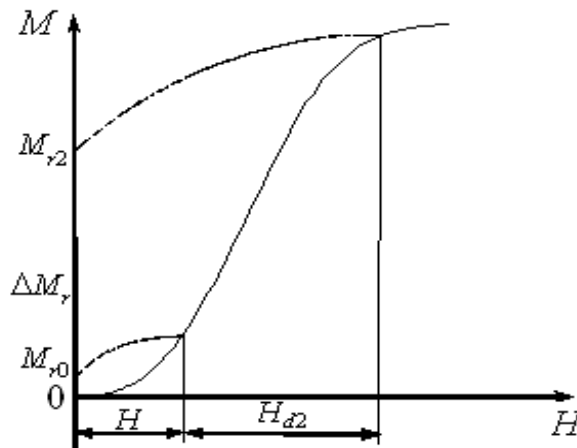


Рис. 5.41. Контраст записи на магнитоносителе при его укладке на контролируемую поверхность намагниченного объекта вдоль направления предполагаемой ориентации дефектов или сверху после снятия магнитоносителя вдоль того же направления

После снятия магнитоносителя его участок, находившийся под действием внешнего поля H_0 , приобретет остаточную намагниченность M_{r0} , а участок, находившийся под действием суперпозиции внешнего поля и поля рассеяния дефекта $H_0 + H_{d2}$, — остаточную намагниченность M_{r2} . Контраст магнитной записи на магнитоносителе будет $\Delta M_r = M_{r2} - M_{r0}$. Причем $\Delta M_r > \Delta M'_r$ (см. рис. 5.40 и 5.41).

Исследования показали, что амплитуда сигнала, обусловленного дефектом, когда магнитоноситель укладывают вдоль направления распространения дефекта, в несколько раз больше, чем когда его укладывают поперек дефекта с поворотом магнитоносителя [27].

Объект намагничивают перемещаемым постоянным магнитом. Какой минимальной величины обнаруживаются поверхностные трещины в объекте при магнитографическом контроле на остаточной намагниченности и в приложенном поле?

Намагничивание объекта производили перемещением постоянного магнита по поверхности объекта перед наложением магнитоносителя. В одном случае магнитоноситель укладывали на объект поперек протяженного дефекта путем поворота (см. рис. 5.38), а во втором — вдоль трещины или сверху, снимая с объекта вдоль того же направления. В процессе наложения не допускалось

проскальзывание магнитоносителя по поверхности объекта. В результате проведенных исследований установлено, что при контроле на остаточной намагниченности глубина обнаруживаемых дефектов не менее 1 мм и зависит от направления укладки магнитоносителя. Если магнитоноситель укладывают на объект вдоль трещины или сверху, снимая с объекта вдоль того же направления, то амплитуда сигнала от дефекта больше в несколько раз по сравнению со случаем, когда магнитоноситель укладывают поперек направления дефекта.

Если же контроль производят в приложенном поле, т. е. магнит перемещают по поверхности немагнитной основы магнитоносителя, находящегося на поверхности объекта, то обнаруживаются поверхностные дефекты глубиной 0,1 мм и больше при параметре шероховатости $Ra = 1,25$, а также 0,6 мм и больше при $Rz = 160$ [27, 28].

На какое расстояние нужно перемещать со скольжением магнитоноситель по поверхности намагниченного объекта, чтобы размах сигнала, обусловленного дефектом, был максимальным?

В [28] для повышения чувствительности магнитографической дефектоскопии ферромагнитных объектов на их остаточной намагниченности предложено укладывать магнитную ленту вдоль направления распространения дефекта. При реализации этого способа выяснилось, что размах сигнала от одного и того же дефекта при повторных испытаниях может отличаться в несколько раз. Было высказано предположение, что это обусловлено тем, что при укладке магнитной ленты на объект на ней может образоваться магнитный отпечаток разной ширины под действием поля рассеяния дефекта, т. к. величина перемещения ленты по поверхности объекта может быть неодинаковой.

Для подтверждения этого предположения исследовали влияние величины поперечного (относительно плоскости дефекта) перемещения магнитной ленты на размах сигнала, обусловленного дефектом, при контроле на остаточной намагниченности объекта. В качестве объекта контроля использовали щит электродвигателя, который содержал трещину раскрытием 34 мкм и глубиной 2,4 мм на торцевой поверхности. Ширину трещины измеряли с помощью микроскопа МЕТАМ РВ-21, допускающего погрешность измерения ± 1 мкм, а ее глубину – трещиномером 281М. Объект намагничивали перемещением по его поверхности постоянного магнита. Запись поля рассеяния дефекта производили на магнитную ленту типа И4701-35, считывание записи осуществляли индукционной магнитной головкой магнитографического дефектоскопа МДУ-2У.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено приспособление, основные элементы которого изображены на рис. 5.42. Оно

содержит жесткий корпус, в котором находятся плоские детали 1 и 2, выполненные лазерной резкой. Принцип работы приспособления состоит в следующем. Если переместить деталь 1 вдоль плоскости разреза с деталью 2, сдвинув ее на расстояние L вдоль стрелки A , то ее перемещение в направлении стрелки B будет в 10 раз меньше. Это позволяет с высокой точностью определить величину перемещения магнитной ленты, край которой прикреплен к детали 1, по поверхности объекта.

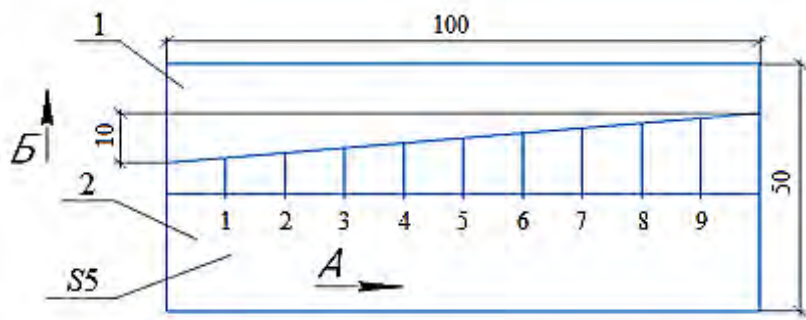


Рис. 5.42. Приспособление для измерения величины перемещения магнитной ленты по поверхности контролируемого объекта

В процессе выполнения экспериментальных исследований магнитную ленту сдвигали поперек дефекта на расстояние от 0 до 4 мм с шагом 0,2 мм, строили график зависимости размаха сигнала, обусловленного полем рассеяния поверхностной трещины, от величины перемещения ленты по поверхности изделия (рис. 5.43).

Из рис. 5.43 следует, что наибольший размах сигнала наблюдается при $\delta = 2,8$ мм.

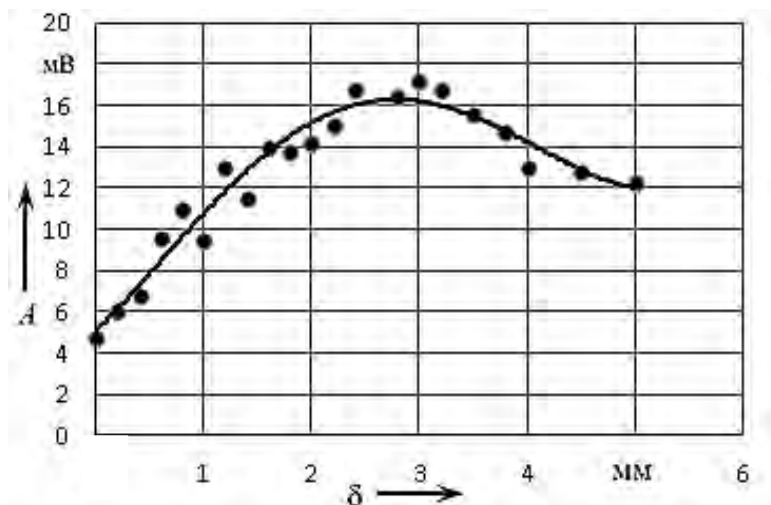


Рис. 5.43. Зависимость размаха сигнала, обусловленного полем рассеяния поверхностной трещины, от величины перемещения ленты по поверхности объекта

Таким образом, установлено, что для обеспечения наибольшей достоверности магнитографического метода контроля на остаточной намагниченности объекта нужно использовать устройство, которое смещает магнитную ленту со скольжением по поверхности объекта на расстояние $(2,8 \pm 0,2)$ мм. Условия определены применительно к считывающему устройству дефектоскопа МДУ-2У [28].

5.8. Дефектометрия

Зависит ли поле рассеяния дефекта от ширины несплошности?

На рис. 5.44 показан график зависимости тангенциальной составляющей поля дефекта от напряженности приложенного поля.

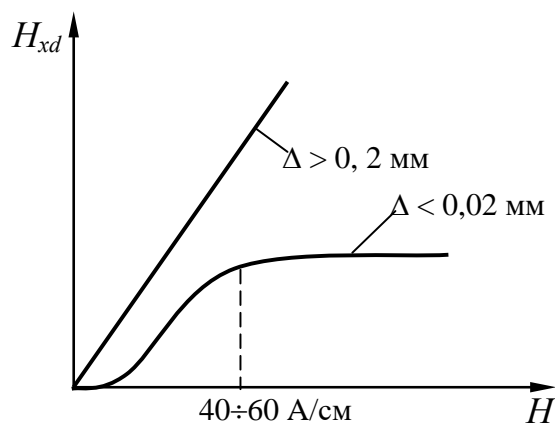


Рис. 5.44. Зависимость тангенциальной составляющей поля дефекта от его раскрытия Δ

Из рисунка видно, что если раскрытие Δ дефекта больше 0,2 мм, то $H_{xd} = f(H_0)$ — прямо пропорциональная зависимость, а при $\Delta < 0,02$ мм — кривая по виду напоминает основную кривую намагничивания. При $H > 40 \dots 60$ А/см H_{xd} не зависит от напряженности намагничивающего поля.

Таким образом, чтобы выяснить, какое раскрытие имеет дефект, достаточно объект проконтролировать дважды при различных значениях напряженности поля ($H > 60$ А/см) и сравнить результаты. Если результаты одинаковые, то дефект имеет раскрытие менее 0,02 мм. Если же результаты измерений отличаются, то раскрытие дефекта будет больше 0,2 мм [29].

Позволяет ли магнитографический метод контроля определить величину дефекта с учетом глубины его залегания?

Магнитографический метод контроля при одностороннем подходе к сварному шву позволяет определить величину выявляемого дефекта вне зависимости от глубины его залегания при применении дефектоскопов с частотным анализатором воспроизводимых сигналов, если толщина стенки

объекта не превышает 8 мм. При большей толщине задачу можно решить, используя для записи две магнитные ленты, находящиеся по разные стороны объекта или с одной, но на разном удалении от поверхности объекта [7].

Рассмотрим способ определения глубины расположения дефекта при наличии доступа к наружной и внутренней поверхностям пластины (рис. 5.45).

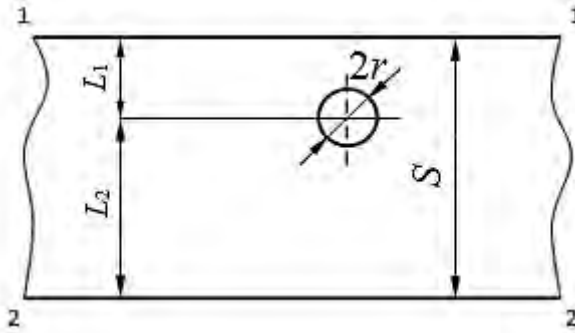


Рис. 5.45. К определению глубины залегания дефекта: S – толщина стенки объекта, $S = l_1 + l_2$

Тангенциальная составляющая поля дефекта у поверхности 1–1 определяется из выражения

$$H_{d1x} = CH_0 \frac{r^2}{l_1^2},$$

а у поверхности 2–2 – из

$$H_{d2x} = CH_0 \frac{r^2}{l_2^2},$$

где C – коэффициент, зависящий от выбора единиц измерения; H_0 – напряженность внешнего поля, действующего в зоне дефекта; r – радиус дефекта.

Решая систему уравнений, получим

$$l_1 = \frac{S}{\sqrt{\frac{H_{d1x}}{H_{d2x}} + 1}}.$$

Как видно из последнего выражения, для определения глубины залегания дефекта нужно измерить тангенциальные составляющие поля дефекта с обеих

сторон пластины, т. е. определить разность тангенциальных составляющих суперпозиции полей и внешнего поля в зоне дефекта [7].

Что собой представляет испытательный образец для магнитографического контроля сварных соединений?

Испытательный образец представляет собой часть контролируемого изделия, сварной шов которого выполнен по той же технологии, что и швы объекта, подлежащего контролю. Некоторые участки шва содержат внутренние дефекты (непровар или цепочку пор) преимущественно в корне шва протяженностью не менее 40 мм и величиной, соответствующей минимальному браковочному уровню. Допускаются искусственные дефекты в виде фрезерованных канавок, засверливаний и т. д. Если в объекте контроля имеется подварка корня шва, то обратная выпуклость в соединении при выполнении дефектов должна быть удалена [30].

Для чего применяют испытательные образцы при магнитографической дефектоскопии?

Испытательные образцы применяют для получения эталонных магнитных лент (контрольных магнитограмм), по которым осуществляют настройку дефектоскопа на требуемую чувствительность. Для получения контрольных магнитограмм используют рабочие намагничивающие устройства и рабочие режимы намагничивания. Следовательно, если объект контроля и испытательный образец будут содержать одинаковые дефекты, расположенные на одинаковой глубине от их поверхностей, то при одинаковых условиях контроля (одинаковые режимы намагничивания, типы магнитных лент, направления намагничивания и т. д.) сигналы, обусловленные дефектами, будут одинаковыми. Браковочный уровень на экране дефектоскопа должен соответствовать наименьшему недопустимому, согласно ТУ, дефекту. Если амплитуда сигнала от дефекта в контролируемом изделии превышает браковочный уровень, то дефект считают недопустимым [30].

Назовите основные недостатки испытательного образца для магнитографического контроля сварных соединений.

Существенным недостатком испытательного образца согласно ГОСТ 25225–82 является то, что он не учитывает сильное влияние на чувствительность метода контроля размеров выпуклости шва, т. к. стандарт на сварку допускает изменение ширины и высоты выпуклости шва в широких пределах. Например, согласно ГОСТ 8713–79, при толщине свариваемых деталей 5...6 мм (условное обозначение С4) высота выпуклости шва может изменяться от 0,5 до 2,5 мм, а ее ширина – от 8 до 16 мм. Таким изменениям размеров выпуклости шва соответствуют вариации радиуса ее кривизны R

в плоскости симметрии шва, который тесно коррелирует с чувствительностью магнитографического метода контроля, в пределах от 3,2 до 64 мм. По этой причине, чтобы учесть влияние размеров выпуклости на чувствительность метода контроля, почти на каждый шов нужно иметь свой испытательный образец и изготовить эталонную магнитную ленту, что снижает производительность и экономичность контроля.

Существует ли контрольный образец, который позволял бы учесть все многообразие размеров выпуклости сварного шва при магнитографическом контроле?

В [10] разработан контрольный образец, представляющий собой две пластины, выполненные из материала контролируемого изделия и соединенные швом с монотонно изменяющейся величиной радиуса кривизны выпуклости шва. Контрольный образец содержит планки 1 и 2, соединенные сварным швом 3, и дефект в корне шва, соответствующий минимальному браковочному уровню (рис. 5.46).

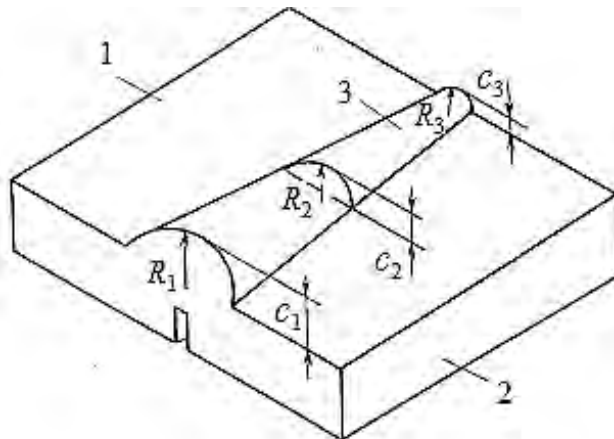


Рис. 5.46. Общий вид контрольного образца [10]

Радиус R кривизны выпуклости шва в плоскости симметрии изменяется монотонно ($R = \frac{b^2}{8c}$, где b – ширина шва, c – высота выпуклости).

Покажем, что для одинаковых дефектов, расположенных на одинаковой глубине в сварных соединениях контролируемого изделия и контрольного образца, можно создать условия, при которых топографии тангенциальных составляющих результирующих полей на поверхностях швов контрольного образца и контролируемого изделия будут тождественны.

Пусть в плоскостях симметрии швов объекта контроля и контрольного образца на глубине $\rho_y = h + c$ от поверхностей швов находятся одинаковые

дефекты в форме цилиндра радиусом r , ориентированные вдоль продольной оси шва (рис. 5.47).

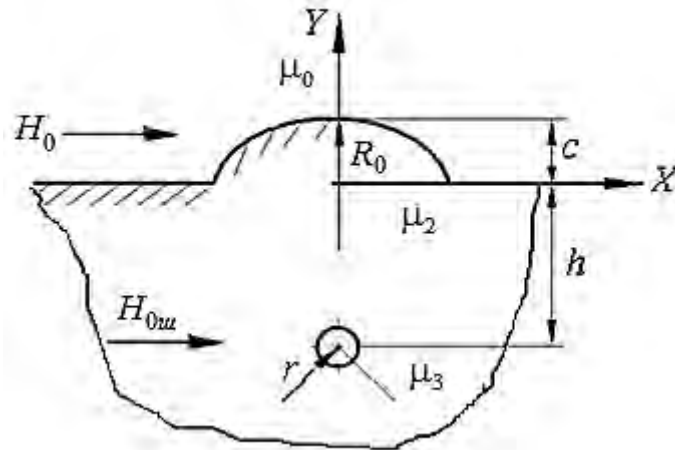


Рис. 5.47. Сварное соединение с цилиндрическим дефектом радиусом r

Рассмотрим слагаемые суперпозиции тангенциальных составляющих напряженностей магнитных полей $H_{\tau p}$, записываемых на магнитную ленту, находящуюся на поверхности шва, при поперечном намагничивании сварных швов.

$$H_{\tau p} = (H_{\tau 0} + H_{\tau \text{ш}}) + H_{\tau d}, \quad (5.1)$$

где $H_{\tau 0}$ – тангенциальная составляющая напряженности внешнего поля; $H_{\tau \text{ш}}$ – тангенциальная составляющая напряженности поля выпуклости шва; $H_{\tau d}$ – тангенциальная составляющая напряженности поля рассеяния дефекта на поверхности сварного соединения.

Запишем математическое выражение (5.2) для последнего слагаемого уравнения (5.1) [10].

$$H_{\tau d} = \pm \frac{2\mu_2(\mu_2 - \mu_3)r^2 H_{0ш}}{(\mu_2 + 1)(\mu_2 + \mu_3) - (\mu_2 - 1)(\mu_2 - \mu_3)(r / \rho_y)^2} \times$$

$$\times \frac{\left(-x^2 + \left(\rho_y - \frac{x^2}{2R_0} \right)^2 \right) R_0 + 2x^2 \left(\rho_y - \frac{x^2}{2R_0} \right)}{\left(x^2 + \left(\rho_y - \frac{x^2}{2R_0} \right)^2 \right)^2 \sqrt{R_0^2 + x^2}}, \quad (5.2)$$

где R_0 – радиус кривизны выпуклости шва в плоскости его симметрии.

Верхний знак берут при $0 \leq x \leq \frac{b}{2}$, нижний – при $\frac{b}{2} \leq x < 0$, где b – ширина, c – высота выпуклости шва.

Определим условия тождественности выражений (5.2) для дефектов сварных швов контрольного образца и контролируемого изделия. Они будут тождественны, если равны $H_{0ш}$, действующие в зоне дефектов (см. рис. 5.47), радиусы кривизны выпуклостей швов в плоскостях их симметрии $R_0 = \frac{b^2}{8c}$.

Остальные условия легко выполняются. Так, равенство магнитных проницаемостей материалов швов, дефектов и окружающих сред, глубин расположения дефектов ρ_y следует из принятого допущения. Известно также, что $H_{0ш}$ будут одинаковыми, если равны напряженности полей на поверхностях швов в плоскостях их симметрии (т. е. будут равны два первых слагаемых уравнения (5.1)).

$$[H_{\tau 0(0-0)} + H_{\tau \square(0-0)}]_{изд} = [H_{\tau 0(0-0)} + H_{\tau \square(0-0)}]_{обр}. \quad (5.3)$$

Последнее обеспечивается экспериментальным подбором напряженности внешнего поля. При этом должны быть одинаковыми тангенциальные составляющие напряженностей магнитных полей в плоскостях симметрии бездефектных швов контролируемого изделия и контрольного образца на поверхностях соединений в месте, где радиус выпуклости шва контрольного образца равен радиусу выпуклости шва контролируемого изделия ($R_{шва конт. обр} = R_{шва конт. изд}$).

Так как сварные швы, имеющие одинаковые радиусы кривизны выпуклостей швов в плоскостях их симметрии, могут иметь разную ширину, то тождественность топографий тангенциальных составляющих результирующих полей на поверхностях швов будет только в плоскостях их симметрии и в пределах их окрестностей $-2...3 \leq x \leq +2...3$ мм (рис. 5.48). Это достаточно хороший результат, т. к. около 90 % дефектов в стыковых сварных соединениях находятся в плоскостях симметрии швов.

Таким образом, для получения контрольной магнитограммы используют два образца с монотонно изменяющимися радиусами кривизны валиков швов: один без дефектов, второй с дефектом, соответствующим минимальному браковочному уровню, в корне шва. Сначала на бездефектном образце с помощью ленточного локального магнитоносителя подбирают режим намагничивания (в том месте, где радиус кривизны выпуклости шва контрольного образца равен радиусу кривизны выпуклости шва контролируемого изделия).

При этом режиме и с использованием рабочих намагничивающих устройств контролируют объект, а также контрольный образец, получая контрольную магнитограмму. Если амплитуда сигнала, обусловленного дефектом в объекте контроля, превышает браковочный уровень сигнала, полученного для сечения контрольного образца, где $R_{шва\ конт. обр} = R_{шва\ конт. изд}$, то дефект считают недопустимым [10].

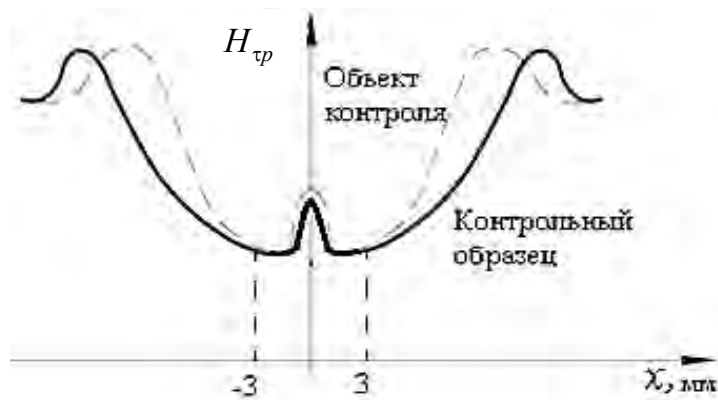


Рис. 5.48. Топография тангенциальной составляющей результирующего поля на поверхностях швов контролируемого объекта и контрольного образца, имеющих одинаковые радиусы кривизны, но различную ширину выпуклости шва

Каковы основные тенденции разработки контрольных образцов для магнитной дефектоскопии стыковых сварных соединений?

Основные тенденции разработки контрольных образцов для дефектоскопии сварных соединений заключаются в учете влияния на чувствительность контроля параметров наружной и обратной выпуклостей швов, расстояния от плоскости симметрии шва до дефекта, параметров дефектов – ширины и глубины.

Поясним изложенное. При намагничивании объекта поперек шва в процессе магнитографического контроля сварной шов в поперечном направлении намагничен неравномерно, сильнее – по мере удаления от плоскости симметрии шва. Это приводит к смещению рабочей точки характеристики магнитной ленты и может привести к изменению амплитуды сигнала, обусловленного протяженным дефектом одинаковой глубины. Для имитации непроваров, расположенных на различном расстоянии от плоскости симметрии шва, сварной шов выполняют таким образом, что с одной стороны контрольного образца стык пластин совпадает с плоскостью симметрии шва, а с противоположной – расположен у края шва (рис. 5.49) [43]. Таким образом, контрольный образец состоит из двух пластин 1, 2, соединенных швом 3, плоскость симметрии которого смещена относительно стыка пластин 4 (см. рис. 5.49). Сварной шов выполнен таким образом, что с одной стороны стык пластин совпадает с плоскостью симметрии шва, а с другой расположен у края сварного шва на

расстоянии $\frac{b}{2}$ от плоскости симметрии, где b – ширина сварного шва.

Протяженный дефект, соответствующий минимальному браковочному уровню, расположен с обратной стороны шва в месте стыка пластин 4.

Если проплавления кромок свариваемых деталей не произошло, то в стыковом сварном соединении отсутствует обратный валик шва. Это учитывается в изображении [44], в котором обратные валики шва выполнены прерывисто, а канавка, имитирующая дефект, профрезерована между ними.

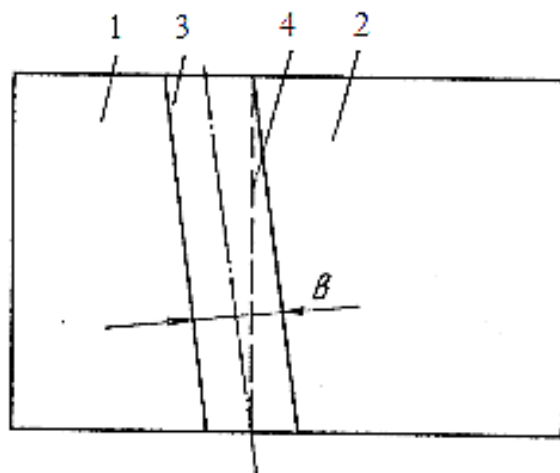


Рис. 5.49. Схематическое изображение контрольного образца [43]: 1, 2 – свариваемые пластины; 3 – сварной шов; 4 – стык пластин; b – ширина шва

Таким образом, контрольный образец представляет собой две пластины 1, соединенные сварным швом 2, имеющим ширину наружного b_1 и обратного b_2 валиков (рис. 5.50). Обратный валик шва 3 выполнен прерывистым, с закругленными концевыми участками, между которыми имеется прорезь 4, имитирующая непровар, соответствующий минимальному браковочному уровню (рис. 5.51).

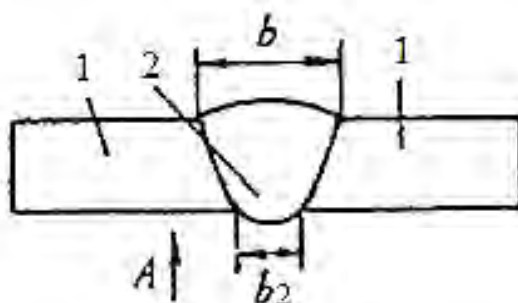


Рис. 5.50. Вид спереди контрольного образца [44]: 1 – свариваемые пластины; 2 – сварной шов

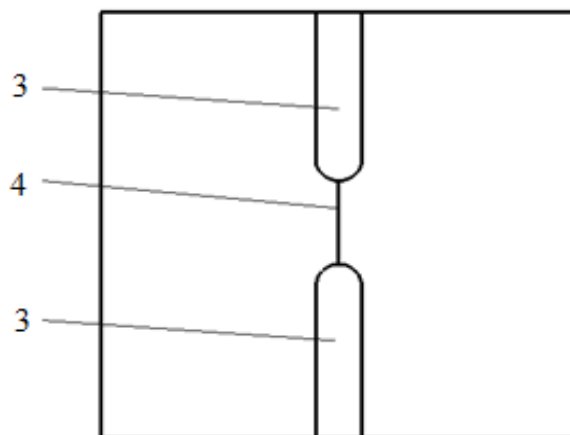


Рис. 5.51. Вид А контрольного образца [44]: 3 – обратный валик шва; 4 – канавка, имитирующая дефект

5.9. Условные обозначения дефектов

Какие условные обозначения дефектов используют при магнитографической дефектоскопии?

При оформлении результатов контроля в лабораторном журнале и на бланке заключения следует использовать следующие *условные обозначения дефектов, применяемые в радиографической дефектоскопии*:

- трещина вдоль шва – T_v ;
- трещина поперек шва – T_n ;
- трещина разветвленная – T_p ;
- непровар в корне – H_k ;
- непровар между валиками – H_v ;
- непровар по разделке – H_p ;
- отдельная пора – $П$;
- цепочка пор – $ЦП$;
- скопление пор – $СП$;
- отдельное шлаковое включение – $Ш$;
- цепочка шлаковых включений – $ЦВ$;
- скопление шлаковых включений – $СШ$.

Как составляют заключение о выявленных дефектах при магнитографической дефектоскопии ферромагнитных объектов?

- Дефектоскопист должен руководствоваться требованиями ГОСТ 25225–82:
- при обнаружении в шве трещин фиксируется только их длина;

– при обнаружении непроваров, шлаковых включений и пор фиксируется их относительная величина, например, «больше 10 %» или «меньше 10 %», кроме того:

а) для непроваров фиксируется их суммарная протяженность с указанием протяженности отдельных непроваров;

б) для одиночных пор и шлаковых включений фиксируется их количество на определенной длине шва (длина шва указывается в нормативной документации на контроль);

в) для цепочек пор и шлаковых включений фиксируется их общая протяженность.

Примеры.

1. Если при магнитографическом контроле обнаружены трещины суммарной длиной 40 мм (на участке протяженностью $L = 500$ мм, установленной технической документацией на контроль), то в заключении должна быть сделана запись: $\sum T 40$.

2. На участке сварного шва длиной $L = 500$ мм обнаружено пять пор, из которых три величиной более 10 % и две менее 10 % от толщины.

Запись в заключении: $5П (3П > 10 \%, 2П < 10 \%)$.

3. Обнаружено две цепочки пор: одна – длиной $l = 15$ мм, величиной более 10 %; вторая длиной $l = 20$ мм, величиной менее 10 % (протяженность шва $L = 500$ мм).

Запись в заключении: $ЦП15 > 10 \%, ЦП20 < 10 \%$.

4. Обнаружено три непровара. Два из них имеют величину более 10 % и длину $l_1 = 40$ мм и $l_2 = 80$ мм, а один – величину менее 10 % и длину $l_3 = 50$ мм ($L = 500$ мм).

Запись в заключении: $\sum H 170 (H 40 > 10 \%, H 80 > 10 \%, H 50 < 10 \%)$.

5. На участке сварного шва протяженностью 500 мм обнаружено пять одиночных пор, из которых три величиной более 10 % и две менее 10 %. Выявлено также две цепочки пор: одна – длиной $l = 15$ мм, величиной более 10 %, вторая – длиной $l = 20$ мм, величиной менее 10 %. На указанном участке еще обнаружено три непровара (два из них имеют величину более 10 % и длину $l_1 = 40$ мм и $l_2 = 80$ мм, а один – величину менее 10 % и длину $l_3 = 50$ мм).

Запись в заключении: $5П (3П > 10 \%, 2П < 10 \%); ЦП 15 > 10 \%, ЦП 20 < 10 \%; \sum H 170 (H 40 > 10 \%, H 80 > 10 \%, H 50 < 10 \%)$ [6].

5.10. Достоинства и недостатки метода

Назовите преимущества и недостатки магнитографической дефектоскопии.

К достоинствам магнитографического метода контроля следует отнести:

- высокую чувствительность к наиболее опасным дефектам – трещинам и стянутым непроварам (особенно поверхностным и подповерхностным);
- высокую производительность, экономичность;
- малую подверженность влиянию мешающих факторов (локальных напряжений, структурной неоднородности металла и т. д.);
- возможность контроля изделий сложной формы;
- возможность отличить по виду сигнала опасный поверхностный дефект (трещину, несплавление) от неопасного (риски, углубления от поверхностных неровностей), если намагничивание объекта производят перемещаемым постоянным магнитом через ленту;
- безопасность для обслуживающего персонала;
- достаточную простоту для настройки и обслуживания приборов, а также для освоения операторами-дефектоскопистами.

Недостатками магнитографического метода контроля являются:

- ограниченность применения (как по материалам, так и по диапазону контролируемых толщин);
- меньшая чувствительность к компактным дефектам (одиночным порам, шлаковым включениям);
- необходимость изготовления оборудования для намагничивания объектов, т. к. приборы не комплектуются намагничивающими устройствами;
- массивность намагничивающих устройств, кроме устройств на основе постоянных магнитов, которые применяют для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов;
- сильная зависимость чувствительности метода от параметров выпуклости шва;
- чувствительность к грубым поверхностным неровностям.

5.11. Расчет оптимального режима намагничивания при магнитографическом контроле ферромагнитных изделий

Произведите расчет оптимального режима намагничивания при магнитографическом контроле ферромагнитных изделий.

Расчет выполним по методике, изложенной в [7]. По данным табл. Б.1 строим кривую намагничивания материала контролируемого изделия $B = f(H)$ (рис. 5.52). Используя данные этой кривой, строим график зависимос-

ти $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = f(B)$ (рис. 5.53). Расчет оптимального режима сводится к отысканию максимального приращения производной на падающей (правой) ветви данной кривой. Максимальное приращение производной $\frac{d\mu_r}{dB}$ находится в месте перегиба кривой функции $\mu_r(B)$ на ее ниспадающей ветви (в этой точке $\frac{d^2\mu_r}{dB^2} = 0$).

Простейший способ найти $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$ – заменить табличные значения функции $\mu_r = f(B)$ соответствующим интерполяционным многочленом:

$$\mu_r = aB^3 + bB^2 + cB + d,$$

где a, b, c, d – неизвестные коэффициенты.

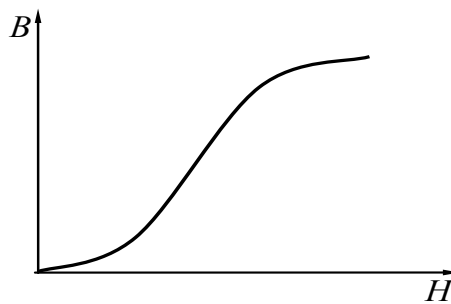


Рис. 5.52. Кривая намагничивания материала изделия

$$\frac{d\mu_r}{dB} = 3aB^2 + 2bB + c;$$

$$\frac{d^2\mu_r}{dB^2} = 6aB + 2b = 0; \quad (5.4)$$

$$B_{opt} = -\frac{b_{cp}}{3a_{cp}}.$$

Чтобы определить значения a_{cp} и b_{cp} , можно воспользоваться методом наименьших квадратов или решить ряд систем уравнений, подставляя значения B и μ_r ниспадающей ветви кривой $\mu_r = f(B)$ (см. рис. 5.53):

$$\begin{cases} \mu_{r1} = aB_1^3 + bB_1^2 + cB_1 + d; \\ \mu_{r2} = aB_2^3 + bB_2^2 + cB_2 + d; \\ \mu_{r3} = aB_3^3 + bB_3^2 + cB_3 + d; \\ \mu_{r4} = aB_4^3 + bB_4^2 + cB_4 + d. \end{cases} \quad (5.5)$$

Вычислив a_{cp} и b_{cp} и подставив их в выражение (5.4), получим значение B_{opt} .

На рис. 5.53 изображены графики зависимостей μ_r , $\frac{d\mu_r}{dB}$, $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$ от индукции в контролируемом сечении.

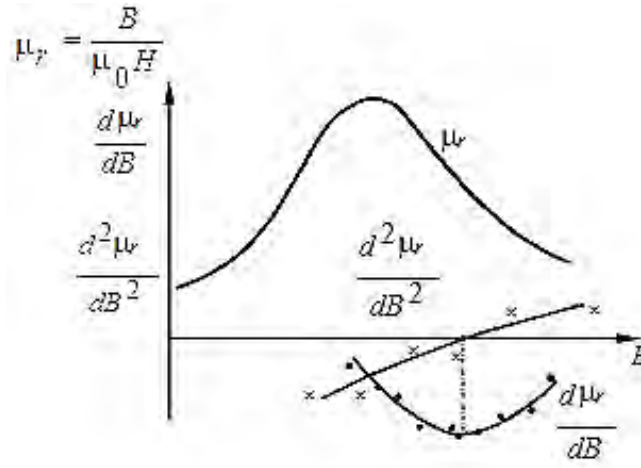


Рис. 5.53. Графики зависимостей μ_r , $\frac{d\mu_r}{dB}$, $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$ от индукции в контролируемом сечении

Возможен и графический путь определения B_{opt} , который состоит в следующем.

По приближенным формулам определяют $\frac{d\mu_r}{dB}$ и $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$, используя значение μ_r нисходящей ветви кривой $\mu_r(B)$ для точек $B_i \pm h/2$ и $B_i \pm h$, где h — шаг изменения магнитной индукции.

$$\frac{d\mu_r}{dB} \approx \frac{\mu_r\left(B_i + \frac{h}{2}\right) - \mu_r\left(B_i - \frac{h}{2}\right)}{h}; \quad (5.6)$$

$$\frac{d^2\mu_r}{dB^2} \approx \frac{\mu_r(B_i + h) - 2\mu_r(B_i) + \mu_r(B_i - h)}{h}. \quad (5.7)$$

Оптимальному режиму намагничивания соответствует точка пересечения графика функции $\frac{d^2\mu_r}{dB^2}$ с осью абсцисс и минимум функции $\frac{d\mu_r}{dB}$ (см. рис. 5.53).

Совпадают ли результаты расчета оптимальной индукции в контролируемых сечениях изделия с результатами, получаемыми экспериментально?

Следует отметить, что расчетное значение B_{opt} ниже значения, полученного экспериментально, на 10...20 %. Это нужно учитывать в окончательном результате.

5.12. Расчет намагничивающих устройств

Что такое магнитное напряжение и как его определяют?

Аналогично электрическому напряжению для электрических полей при расчете магнитного поля используют понятие магнитного напряжения (обозначается U_m). Если напряженность магнитного поля одинакова во всех точках данной силовой линии, то магнитное напряжение между двумя точками этой магнитной линии равно произведению напряженности магнитного поля на отрезок длины магнитной линии: $U_m = Hl$. Это может быть, например, протяженность участка между двумя точками одной из кольцевых магнитных силовых линий прямолинейного проводника с током или силовой линии однородного магнитного поля.

При определении магнитного напряжения между двумя точками однородного поля, находящимися на расстоянии l друг от друга, но расположенными на разных магнитных линиях, $U_m = Hl$, где Hl – проекция вектора напряженности магнитного поля на отрезок l .

В общем случае, когда в различных точках пути l напряженность магнитного поля неодинаковая, $U_m = \oint H_1 dl$.

В отличие от электростатического поля величина U_m зависит от выбранного пути между начальной и конечной точками.

Как определить магнитное напряжение на участке магнитной цепи длиной l и сечением S ?

Магнитное напряжение на любом участке магнитной цепи

$$U_m = Hl = \frac{B}{\mu_0\mu_r} l = \frac{\Phi}{S} \frac{l}{\mu_r\mu_0} = \Phi R_m,$$

где R_m – магнитное сопротивление участка магнитной цепи, $R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}$.

Эта зависимость для расчета магнитной цепи может применяться только при условии, что магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля.

Что такое магнитодвижущая сила?

Иногда в расчетах приходится определять магнитное напряжение по произвольно проведенному в магнитном поле замкнутому контуру. Магнитное напряжение, вычисленное по замкнутому контуру, называется намагничивающей, или магнитодвижущей, силой F . То есть $F = \oint H_1 dl$.

Магнитодвижущая сила характеризует намагничивающее действие электрического тока и измеряется в ампер-витках. Например, для случая намагничивания образца в виде тороида (или кольцеобразного образца) с равномерно нанесенной на его поверхность намагничивающей обмоткой имеем

$$F = Iw = \Phi \frac{l_{cp}}{\mu_0 \mu_r S} = \Phi R_m,$$

где R_m – магнитное сопротивление среды, $R_m = \frac{l_{cp}}{\mu_r \mu_0 S}$.

Эта формула является математическим выражением основного закона магнитной цепи.

Какие основные законы используют при расчете магнитных цепей?

При расчетах магнитных цепей обычно используют первый закон Кирхгофа для магнитной цепи, который вытекает из свойств непрерывности магнитного потока и магнитных силовых линий: алгебраическая сумма магнитных потоков в точке разветвления равна нулю, т. е. $\sum \Phi_i = 0$.

Из закона полного тока можно сформулировать второй закон Кирхгофа для магнитной цепи: алгебраическая сумма магнитных напряжений на отдельных участках цепи равна алгебраической сумме намагничивающих сил: $\sum U_m = \sum F_i = \sum (Iw)_i$.

Приведите методику расчета электромагнита устройства для намагничивания постоянным полем изделий в процессе магнитного контроля.

Расчет выполнен по методике, изложенной в [7]. Схема намагничивающего устройства изображена на рис. 5.54, а эквивалентная расчетная – на рис. 5.55.

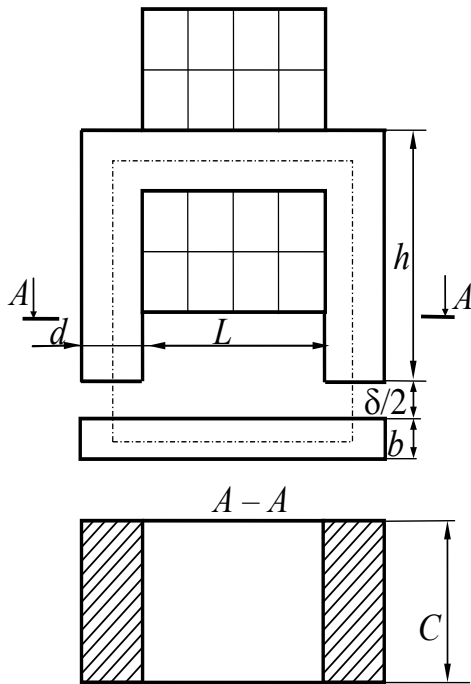


Рис. 5.54. Расчетная схема электромагнита намагничивающего устройства

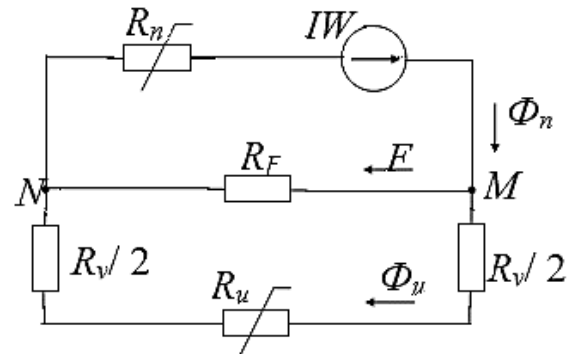


Рис. 5.55. Эквивалентная электрическая схема электромагнита намагничивающего устройства

Цель расчета – определить величину намагничивающей силы IW устройства для создания в изделии необходимой индукции. С учетом технических, технологических и экономических требований для магнитных приспособлений могут быть рекомендованы стали Ст 3, 10, 20 и сталь Армко. Толщина полюсов намагничивающего устройства должна быть в 2–3 раза больше толщины стенки намагничиваемого изделия [6, 7]. Если же толщина стенки изделия 1...2 мм, то толщина полюсов – 10...20 мм.

Остальные размеры намагничивающего устройства выбирают конструктивно, исходя из существующих разработок. Например, расстояние L между полюсами электромагнита – не менее 70 мм, высота h – не менее 100 мм. Расчет выполняют, принимая допущение, что растекание магнитного потока в изделии отсутствует, т. е. размеры проекции устройства на изделие и изделия равны.

Из закона Кирхгофа следует, что

$$IW = \sum H_i l_i,$$

где $H_i l_i$ – падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи l_i .

Рассматриваем сумму падений магнитных напряжений в изделии U_u , в зазорах U_y , в магнитопроводе U_n :

$$\begin{cases} U_u = H_u l_u = H_u (L + b + d); \\ \Phi_u = B_u S_u; \\ S_u = bc. \end{cases} \quad (5.8)$$

Строим кривую намагничивания материала изделия (см. рис. 5.52). Используя выражения (5.8), по шести-восьми значениям H_u и B_u , взятым с кривой намагничивания, строим график зависимости $U_u = f(\Phi_u)$, а затем график зависимости $U_y = f(\Phi_u)$ в той же системе координат (рис. 5.56).

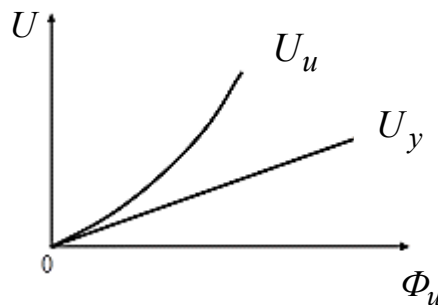


Рис. 5.56. Графики зависимостей магнитных напряжений в зазоре U_y и в изделии U_u от магнитного потока в изделии Φ_u

$$U_y = H_0 \delta = \frac{\Phi_u}{\mu_0 S_n} \delta, \quad (5.9)$$

где H_0 — напряженность поля в зазоре; δ — толщина суммарного зазора.

Таким образом, для построения прямой достаточно рассмотреть одно значение Φ_u .

Затем строится график зависимости магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в нем $U_n = f(\Phi_u)$ (рис. 5.57).

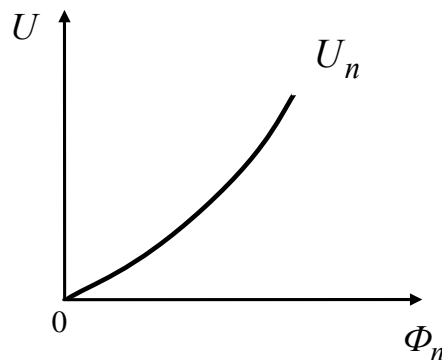


Рис. 5.57. Зависимость магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в нем

$$\begin{cases} U_n = H_n l_n = H_n (2h + L); \\ \Phi_n = B_n S_n = B_n cd. \end{cases} \quad (5.10)$$

Значения B и H определяют по кривой намагничивания материала магнитопровода.

Чтобы пересчитать U_n в зависимости от Φ_u , запишем уравнение Кирхгофа для точки M эквивалентной электрической схемы (см. рис. 5.55).

$$\Phi_n - \Phi_u - F = 0, \quad (5.11)$$

где F – магнитный поток рассеяния, шунтирующий изделие и переходный участок.

Так как отношение потоков Φ_u и F обратно пропорционально магнитным сопротивлениям $R_u + R_y$ и R_F , то

$$\frac{F}{\Phi_u} = \frac{R_u + R_y}{R_F}; \quad F = \Phi_u \frac{R_u + R_y}{R_F}, \quad (5.12)$$

где R_F – магнитное сопротивление потока рассеяния между полюсами электромагнита, Гн^{-1} .

$$R_F = \frac{1}{G_F}, \quad (5.13)$$

где G_F – проводимость участка между параллельными призмами (полюсами намагничивающего устройства).

$$G_F = R_F^{-1} = \mu_0 (h_F x_F + y_F), \quad (5.14)$$

где $h_F = h - d$;

$$x_F = \frac{C}{L} + 0,52 + \frac{2}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2d}{L} \right);$$

$$y_F = 0,26C + \frac{C}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2d}{L} \right) + 0,15L + 0,5d.$$

Из формул (5.11) и (5.12)

$$\Phi_u = \frac{\Phi_n}{1 + \frac{R_u + R_y}{R_F}}, \quad (5.15)$$

где R_F получаем из выражений (5.13) и (5.14) – оно постоянно; R_y также постоянно.

$$R_y = \frac{\delta}{\mu_0 S_{II}};$$

$$R_u = \frac{l_u}{\mu_0 \mu_u S_u} = \frac{H_u l_u}{B_u S_u},$$

где l_u – длина средней линии в изделии.

Значения B_u и H_u соответствуют оптимальному режиму намагничивания.

Путем пересчета с использованием формулы (5.15) значений Φ_n получают график зависимости $U_n = f(\Phi_u)$ (рис. 5.58). Затем, суммируя U_u , U_y и U_n , получают график зависимости $U_\Sigma = f(\Phi_u)$ (рис. 5.59). Зная сечение изделия, строят вторую ось H_u , т. е. аналогичный график зависимости $U_\Sigma = f(B_u)$, где $B_u = \frac{\Phi_u}{S_u}$.

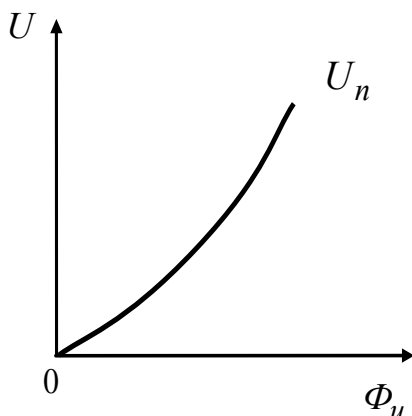


Рис. 5.58. График зависимости магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока в изделии

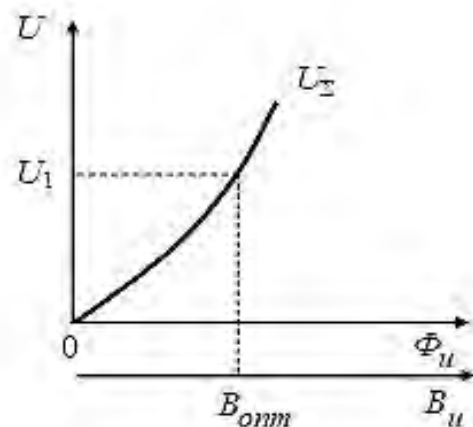


Рис. 5.59. График зависимости суммарного магнитного напряжения в магнитопроводе от магнитного потока и индукции в изделии

По известному значению оптимальной индукции B_{opt} в контролируемом сечении объекта определяют $U_1 = IW$ (см. рис. 5.59). Затем с учетом коэффициента заполнения $K_3 = 0,4$ и площади S окна, занимаемого всеми витками катушки, в сечении, перпендикулярном осям витков (S составляет приблизительно 80 % площади окна, образованного П-образным сердечником и намагничиваемым изделием), определяют число витков обмоточного провода, задаваясь различными его диаметрами d_1 (от 0,5 до 3,5 мм):

$$W = \frac{SK_3}{\pi d_1^2 / 4}.$$

Определяют величину тока в катушке по известным значениям намагничивающей силы и числу витков: $I = \frac{U_1}{W}$. При этом следует помнить, что расчет выполнен для случая контроля плоских изделий и не учитывает растекание магнитного потока в изделия. Для намагничивания сварных соединений с выпуклостью шва ток нужно увеличить в 6–8 раз. Должно также выполняться ограничение по плотности тока $j \leq 12 \text{ А/мм}^2$. Определяют электрическое сопротивление обмотки

$$R = \frac{\rho l_{cp} W}{\pi d_1^2 / 4},$$

и потребляемую мощность $P = I_1^2 R$ в каждом случае (здесь l_{cp} – средняя длина витка провода в катушке; ρ – удельное электрическое сопротивление).

$$l_{cp} \approx 2c + 2d + 2\pi r,$$

где $r = 0,4(h - d)$.

Если потребляемые мощности одинаковы, т. е. обмотки нагреваются независимо от того, провод какого диаметра использован для намотки катушки, то диаметр провода выбирают, исходя из приемлемого числа витков катушки. Обычно $400 \leq W \leq 1600$.

6. ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Сущность, область применения и особенности метода. Требования к первичным преобразователям. Повышение селективности метода. Типы приборов.

6.1. Сущность, область применения и особенности метода. Требования к первичным преобразователям

Какой метод контроля называют индукционным?

Индукционный метод – это метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей объекта контроля индукционными преобразователями. При его реализации используют дефектоскопы, снабженные преобразователями-полемерами или градиентометрами. Иногда для этих целей применяют многоэлементные преобразователи, содержащие несколько электрических катушек с сердечниками или без них.

Для контроля каких объектов применяют индукционные дефектоскопы?

Индукционные дефектоскопы применяют в основном для контроля протяженных изделий в виде труб, прутков, осей, валов. Эти объекты должны обеспечивать возможность относительного перемещения преобразователя, ориентированного перпендикулярно его продольной оси и находящегося на минимальном расстоянии от контролируемой поверхности, с высокой скоростью. Во избежание пропуска дефектов должна обеспечиваться также возможность сканирования всей поверхности объекта одноэлементным или многоэлементным преобразователем.

Какие виды намагничивания изделий применяют при индукционной дефектоскопии?

При индукционной дефектоскопии нашли применение полюсное и циркулярное намагничивание. Вид, способ и схема намагничивания зависят от магнитных характеристик материала объекта контроля, формы и конструктивных особенностей изделия, статистических данных относительно вида, типа, мест расположения и ориентации несплошностей, подлежащих обнаружению, а также от поставленных задач.

Контролируют ли изделия индукционным методом на остаточной намагниченности объекта?

На остаточной намагниченности контролируют только изделия из магнито жестких материалов (имеющих большие значения остаточной индукции

и коэрцитивной силы, т. е. широкую петлю гистерезиса). В этом случае поля рассеяния дефектов имеют достаточно большую величину. Контроль на остаточной намагниченности объекта более удобен в осуществлении, т. к. позволяет разделить контрольные операции и использовать средства малой механизации. При этом наблюдается меньше помех от неоднородности структуры металла, повышенной шероховатости поверхности, рисок и т. д., хотя при этом помехи, вызванные наклепом, могут оказаться соизмеримыми с сигналами, обусловленными дефектами сплошности.

За счет чего снижают мощность намагничивающих устройств в индукционной дефектоскопии?

Снижение мощности намагничивающих устройств достигается применением для намагничивания переменного тока. При этом вследствие поверхностного эффекта ток протекает только в поверхностном слое объекта, т. е. происходит увеличение плотности тока в той части объекта контроля, в которой необходимо обнаруживать дефекты.

Почему ось индукционного преобразователя обычно ориентируют перпендикулярно поверхности контролируемого изделия?

При циркулярном намагничивании цилиндрических изделий нормальная составляющая поля дефекта появляется у поверхности объекта только над несплошностью. Если ось преобразователя ориентирована перпендикулярно поверхности изделия, то индукционный преобразователь будет реагировать только на нормальную составляющую поля.

Какие требования предъявляют к конструкциям индукционных преобразователей и к их расположению относительно объекта контроля?

При удалении от дефекта намагниченного объекта его поле рассеяния убывает очень быстро. Поэтому преобразователь должен иметь малые размеры и располагаться, по возможности, ближе к изделию. Однако с уменьшением размеров преобразователя возникают трудности его изготовления, а также уменьшается ЭДС. Для увеличения чувствительности преобразователей применяют ферромагнитные сердечники, помещаемые в катушку. Однако в этом случае его амплитудная характеристика в области высоких напряженностей магнитных полей становится нелинейной.

Какой должен быть шаг сканирования для качественного контроля цилиндрических изделий индукционным методом?

При дефектоскопии цилиндрических изделий индукционный преобразователь совершает одновременно поступательное и вращательное движение относительно объекта контроля. Сканирование поверхности осуществляется по

винтовой линии. Для исключения пропуска дефектов необходимо, чтобы шаг сканирования не превышал диаметра катушки одноэлементного преобразователя. Это снижает производительность контроля. Для увеличения производительности применяют преобразователи, содержащие несколько катушек (многоэлементные преобразователи), расположенных на прямой вдоль оси изделия или равномерно по периметру изделия.

Какую информацию содержит сигнал, снимаемый с индукционного преобразователя?

Сигнал, снимаемый с индукционного преобразователя, содержит информацию о дефекте, об изменении зазора, о наличии неоднородностей магнитных свойств объекта контроля и об индустриальных помехах. Для выделения полезной информации в индукционных преобразователях используют такие характеристики, как форма импульсов, частотный спектр сигнала, периодическая повторяемость импульсов.

6.2. Повышение селективности метода. Типы приборов

Приведите примеры отстройки от мешающих факторов при индукционном контроле.

Пример 1. Так как спектр сигналов от неоднородностей магнитных свойств поверхностного слоя изделия на выходе индукционного преобразователя малых размеров ниже спектра полезного сигнала, то устранять такие помехи можно путем выбора нижней границы полосы пропускания частотного фильтра. Аналогично можно ослабить помехи, обусловленные изменением зазора между преобразователем и объектом контроля.

Пример 2. Если ось контролируемого цилиндрического изделия не совпадает с осью вращения электромагнита и преобразователя, то в обмотке преобразователя будет наводиться переменная ЭДС с периодом, равным периоду вращения. Частотный спектр этого сигнала также значительно ниже спектра сигнала, обусловленного дефектом. Поэтому от таких помех можно отстроиться, как и в предыдущем случае, путем выбора нижней границы полосы пропускания частотного фильтра.

Пример 3. При дефектоскопии ферромагнитных объектов на выходе индукционного преобразователя под действием поля рассеяния дефекта возникает сигнал S-образной формы. Для повышения отношения амплитуд «сигнал – шум» применяют две встречно включенные катушки преобразователя, смещенные относительно друг друга в направлении сканирования на такое расстояние, чтобы, например, отрицательные полуволны импульсов совпадали. В результате на выходе такого двухкатушечного преобразователя появляется сигнал более сложной формы, отрицательная часть которого в 2 раза больше положительного.

Это приводит к увеличению отношения амплитуд «сигнал – шум» приблизительно в два раза (рис. 6.1).

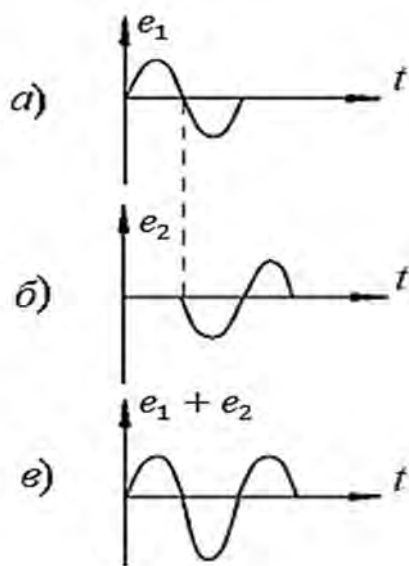


Рис. 6.1. Изменение ЭДС на выходе индукционного преобразователя с двумя встречно включенными катушками: *a* – изменение ЭДС на выходе первой катушки; *б* – изменение ЭДС на выходе второй катушки, включенной встречно и смещенной в направлении сканирования; *в* – ЭДС на выходе индукционного преобразователя с двумя встречно включенными катушками

Приведите пример схемной отстройки от помех при индукционном контроле.

На рис. 6.2 представлена схема дефектоскопа с двухэлементным индукционным преобразователем. Прибор позволяет отстроиться от помех, обусловленных радиальными биениями цилиндрического изделия и промышленными помехами. Измерительные катушки ИП1 и ИП2 индукционного преобразователя располагаются диаметрально противоположно относительно цилиндрического объекта контроля. Сигнал, обусловленный дефектом, вначале генерируется в катушке ИП1, а затем в катушке ИП2 через половину периода вращения цилиндрического объекта контроля.

Сигнал с ИП1 поступает через линию задержки ЛЗ на один вход схемы совпадения сигналов СС, на второй ее вход поступает сигнал с катушки ИП2. Сигнал на выходе схемы совпадения появится только в том случае, если на оба входа СС сигналы с ИП1 и ИП2 поступят одновременно. Это будет иметь место тогда, когда линия задержки ЛЗ обеспечит задержку сигнала на время, равное повороту объекта на половину оборота, т. е. пока дефект не окажется над второй катушкой преобразователя. В этом случае сигнал с выхода схемы совпадения сигналов СС поступит на исполнительное устройство, которое отметит дефектное место в изделии. Промышленные помехи и помехи, вызванные

биениями, поступят на входы индукционных катушек одновременно, а на входы схемы совпадения – в разное время, а потому не пройдут на выход СС и не вызовут срабатывания краскоотметчика.

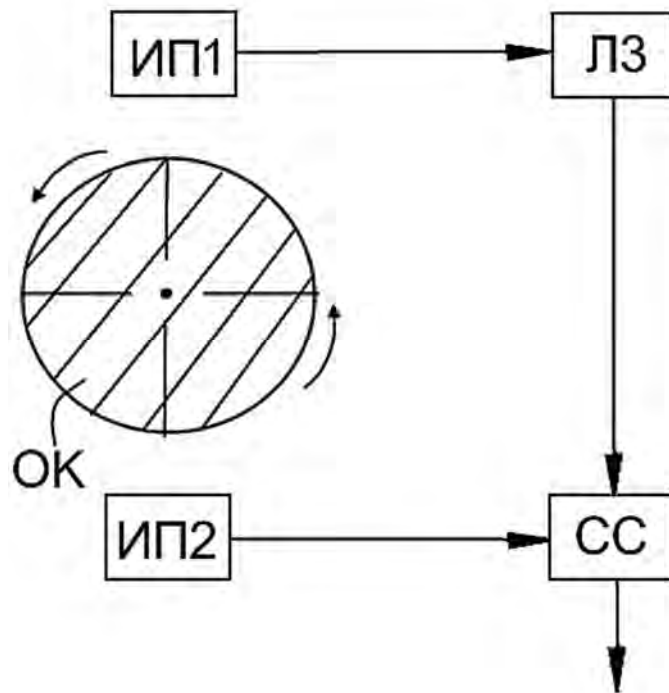


Рис. 6.2. Дефектоскоп с двухэлементным индукционным преобразователем

Изобразите структурную схему индукционного дефектоскопа и опишите ее.

Обобщенная структурная схема индукционного дефектоскопа представлена на рис. 6.3. Она включает намагничивающее устройство НУ, объект контроля ОК, индукционный преобразователь ИП, схему преобразования сигнала СПС, блок автоматики БА, отметчик дефектов ОД и имитатор дефектов ИД.

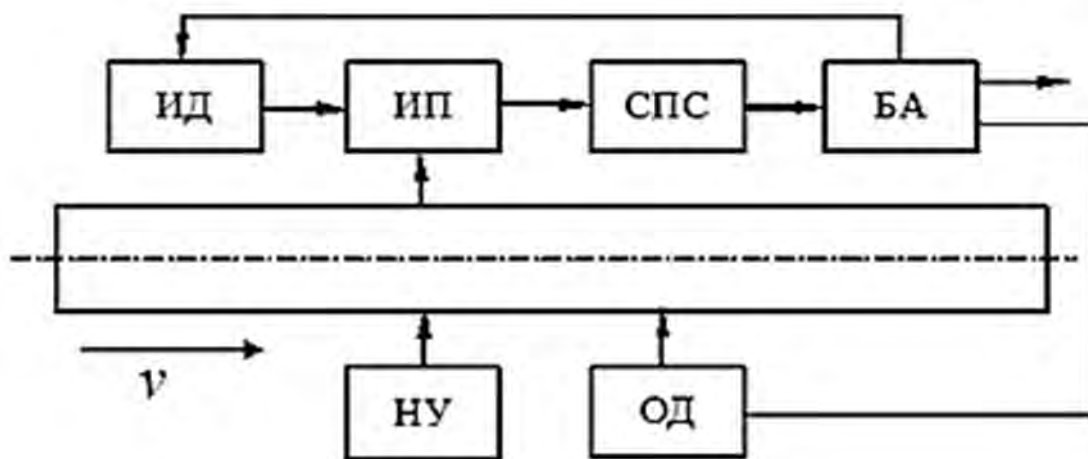


Рис. 6.3. Структурная схема индукционного дефектоскопа

При движении объекта контроля вправо под действием магнитного поля рассеяния дефекта намагниченного НУ объекта в обмотке индукционного преобразователя ИП возникает электрический сигнал, который подается в схему преобразования сигнала СПС, где он усиливается, очищается от помех, нормализуется и поступает в блок автоматики БА. Последний подает сигнал на отметчик дефектов ОД и исполнительное устройство. Отметчик дефектов краской помечает место расположения недопустимых несплошностей, а исполнительное устройство направляет качественные и бракованные изделия по разным путям технологического потока.

В межконтрольные паузы, когда в зоне контроля нет объекта, сигнал, аналогичный сигналу, обусловленному дефектом, с имитатора дефектов ИД поступает на второй вход измерительного преобразователя. В дальнейшем этот сигнал, преобразованный в схеме преобразования сигнала СПС, поступает на вход блока автоматики и в случае отличия этого сигнала от заданного вырабатывается другой сигнал, указывающий на неисправность дефектоскопа.

Приведите технические характеристики индукционных дефектоскопов.

1. Индукционный дефектоскоп предназначен для контроля труб диаметром 30...102 мм с максимальной толщиной стенки 8 мм при скорости контроля 1,5 м/с. Максимальный намагничивающий ток – 1500 А.

2. Дефектоскоп предназначен для контроля цилиндрических объектов (прутков, труб) диаметром от 20 до 450 мм. Максимальная толщина стенки трубы – 8 мм. Дефектоскоп позволяет обнаруживать наружные несплошности глубиной 0,1...0,15 мм и более, а также расположенные на внутренней поверхности – глубиной 10 % от толщины и более.

7. ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Сущность и особенности метода. Требования к первичным преобразователям. Основные мешающие факторы и отстройка от них. Типы приборов.

7.1. Сущность и особенности метода. Требования к первичным преобразователям

Какой метод контроля называют феррозондовым?

Феррозондовым называют метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей объекта феррозондовыми преобразователями. Применяют преобразователи с продольным и поперечным возбуждением (полемеры и градиентометры), с параллельными пермаллоевыми сердечниками и с кольцевым магнитопроводом. Использование феррозондов-градиентометров обусловлено тем, что градиенты полей дефектов сплошности во много раз превышают градиенты полей-помех.

Какие требования предъявляют к габаритным размерам преобразователей феррозондовых дефектоскопов?

Магнитные поля рассеяния дефектов быстро убывают при удалении от дефекта. Поэтому феррозондовый преобразователь должен иметь возможно меньшие размеры и располагаться как можно ближе от поверхности изделия, однако с уменьшением размеров преобразователя возникают трудности с его изготовлением, кроме того, уменьшается ЭДС на выходе такого преобразователя.

7.2. Основные мешающие факторы и отстройка от них. Типы приборов

Назовите основные мешающие факторы при контроле объектов феррозондовыми дефектоскопами.

Наиболее существенными мешающими факторами при контроле феррозондовым методом являются пространственные неоднородности магнитных свойств изделия, изменение взаимного расположения преобразователя и изделия, промышленные помехи, нестабильность элементов схемы. В некоторых случаях помехи могут быть вызваны внешним полем при намагничивании объекта контроля, например, при циркулярном намагничивании цилиндрического объекта составляющая внешнего магнитного поля, направленная вдоль сердечника феррозонда, может на порядок превосходить

амплитудное значение нормальной составляющей напряженности поля дефекта, которую регистрируют дефектоскопом.

Назовите основные пути отстройки от помех, реализуемые в феррозондовых дефектоскопах.

Основные пути отстройки от помех: конструктивные (основаны на модернизации конструкции преобразователя и намагничивающего устройства), схемные (реализуются в схеме обработки сигнала), логические (осуществляются вычислительной техникой или оператором). Для снижения помех, вызванных намагничивающим полем, в феррозондовых дефектоскопах применяют различные системы ориентации и стабилизации положения феррозонда относительно изделия. Это износостойкие прокладки и ролики, помещаемые между преобразователем и объектом контроля; ориентация сердечников феррозонда – с помощью специальных устройств перпендикулярно полю. Снижению помех, обусловленных внешним полем, способствует расположение феррозонда на максимальном расстоянии от полюсов намагничивающего устройства.

Как уменьшить помехи, создаваемые наклепом?

Чтобы ослабить помехи от наклепа, контроль следует проводить в сильном приложенном поле. Наибольший фон помех, создаваемых наклепанными участками, имеет место в средних полях (рис. 7.1). В слабых полях магнитные поля рассеяния, обусловленные дефектами, невелики. Поэтому контроль нужно проводить при высоких напряженностях намагничивающего поля (см. рис. 7.1). В этом случае отношение амплитуд «сигнал – шум» будет наибольшим. При контроле на остаточной намагниченности поля рассеяния наклепанных участков соизмеримы с полями рассеяния от недопустимых дефектов.

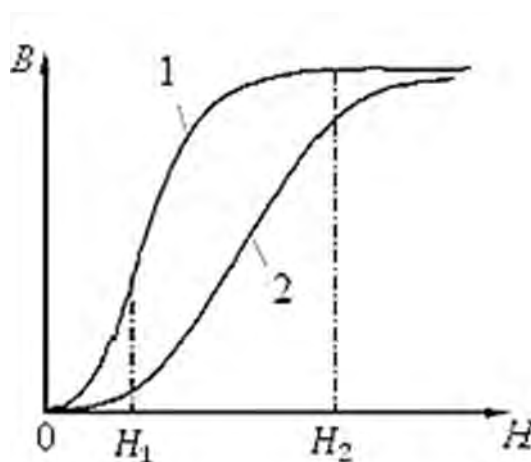


Рис. 7.1. Кривая намагничивания ненаклепанного 1 и наклепанного 2 участков: $H < H_1$ – слабое поле; $H_1 < H < H_2$ – среднее поле; $H > H_2$ – сильное поле

При каких условиях феррозондовые дефектоскопы обеспечивают наибольшую чувствительность контроля изделий?

Высокая чувствительность феррозондовых дефектоскопов реализуется только при контроле объектов, создающих слабый фон помех, имеющих низкую шероховатость поверхности, при хорошей стабилизации положения преобразователя относительно изделия.

Назовите технические характеристики феррозондовых дефектоскопов.

1. Феррозондовый дефектоскоп предназначен для контроля труб диаметром от 30 до 102 мм с толщиной стенки до 8 мм. Скорость поступательного движения трубы – от 0,5 до 3 м/с. Минимальная глубина выявляемых дефектов на наружной поверхности трубы составляет не менее 0,2 мм, на внутренней – 10 % от толщины стенки трубы.

2. Дефектоскоп предназначен для контроля рельсов. Прибор устанавливается на тележке и перемещается вдоль рельса со скоростью 4 км/ч.

3. Дефектоскоп предназначен для контроля труб диаметром от 60 до 1000 мм в заводских условиях. Намагничивание изделия осуществляется пропусканием тока через стержень, установленный по оси трубы. Преобразователь дефектоскопа остается неподвижным, а контролируемая труба совершает поступательное и одновременно вращательное движение.

4. Дефектоскоп предназначен для контроля труб диаметром более 1000 мм с толщиной стенки до 8 мм. Намагничивание объекта контроля осуществляется приставным электромагнитом, с которым жестко связан феррозондовый преобразователь. Труба одновременно совершает поступательное и вращательное движение. Линейная скорость вращения контролируемой поверхности трубы составляет 1,5 м/с [4, 5].

Для чего, кроме дефектоскопии, применяют приборы с феррозондовыми преобразователями?

Приборы с феррозондовыми преобразователями нашли применение для импульсного локального контроля механических свойств и структуры сталей. Принцип их действия заключается в локальном намагничивании объекта с помощью соленоида серией импульсов намагничивающего тока и последующем считывании градиента нормальной составляющей остаточного поля объекта с помощью феррозонда-градиентометра, расположенного на оси соленоида.

8. МЕТОД ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКИ

Как устроена визуализирующая магнитные поля пленка?

Визуализирующая магнитные поля пленка состоит из немагнитной пленочной основы, на которую нанесены миниатюрные капсулы, заполненные гелем. В нем во взвешенном состоянии находятся продолговатые частицы слабомагнитного металла никеля. Длина частиц составляет 50...60 мкм, ширина – на порядок меньше. Эти частицы, в зависимости от своего расположения, по-разному отражают падающий свет. Пленка окрашивается в светлые тона, когда частицы ориентированы параллельно ее поверхности, и темнеет, когда частицы направлены перпендикулярно ей. Если пленку поместить в магнитное поле, то частицы никеля будут ориентироваться по касательным к силовым линиям поля, т. е. пленка чувствительна как к тангенциальной, так и к нормальной составляющей магнитного поля.

Для чего применяют визуализирующую магнитные поля пленку?

Визуализирующая магнитные поля пленка может быть использована как индикатор магнитных полей, для контроля качества постоянных магнитов, дефектоскопии ферромагнитных объектов, обнаружения фальсификаций VIN-кодов автомобилей, изготовления антимагнитных пломб счетчиков и расходомеров и т. д. [31–34].

Например, при контроле постоянных магнитов магнит устанавливают на поверхность пленки, наблюдают на ней индикаторный рисунок, обусловленный полем магнита. Если магнит симметричный, а индикаторный рисунок нет, то магнит направляют в переплавку.

При дефектоскопии ферромагнитный объект намагничивают вместе с уложенной на его поверхность визуализирующей пленкой. О наличии несплошностей в нем судят по появлению на пленке индикаторных рисунков дефектов.

Разработан способ магнитного контроля, основанный на регистрации индикаторных рисунков дефектов визуализирующей магнитные поля пленкой, помещенной на поверхность намагниченного объекта, фотографировании их цифровой камерой, обработке полученной информации компьютерными методами, позволяющий обнаружить дефекты в изделии и идентифицировать их, а по распределению коэффициента диффузного отражения света от пленки установить глубину их залегания и размеры [31, 35].

Какова причина появления помех на пленке, когда электромагнит с П-образным сердечником и пленка находятся с одной стороны контролируемого объекта?

При дефектоскопии визуализирующая магнитные поля пленка находится на поверхности контролируемого ферромагнитного объекта в межполюсном пространстве П-образного электромагнита, полюсы которого имеют форму параллелепипеда. Симметрично относительно полюсов на пленке наблюдается узкая светлая полоса. Причина появления такой помехи объясняется тем, что на пленку в этой зоне действует только тангенциальная составляющая внешнего поля и ферромагнитные частицы в ней ориентированы параллельно поверхности. По мере приближения к полюсам электромагнита увеличивается нормальная составляющая внешнего поля и пленка темнеет. При увеличении расстояния между полюсами электромагнита эта помеха «размывается», а затем исчезает.

Таким образом, причиной помехи является неоднородность внешнего поля в межполюсном пространстве, которая уменьшается при увеличении расстояния между полюсами, что позволяет отстроиться от помехи и объясняет ее отсутствие, когда электромагнит и пленка находятся с разных сторон стенки объекта [31, 36].

Почему при магнитной дефектоскопии методом визуализирующей магнитные поля пленки в качестве основного информационного параметра принят коэффициент диффузного отражения света от пленки, а не яркость?

Яркость светового излучения прямо пропорциональна силе света, коэффициенту его отражения от поверхности и обратно пропорциональна площади источника света. При анализе индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке весьма сложно определить их площадь. Поэтому этот параметр сложно применять при дефектоскопии ферромагнитных объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки.

Коэффициент диффузного отражения света от пленки равен отношению отраженного светового потока к падающему. Его проще анализировать как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях. Поэтому при магнитной дефектоскопии с использованием визуализирующей магнитные поля пленки в качестве основного информационного параметра принят коэффициент диффузного отражения света от пленки [31, 37].

Как производить дефектоскопию ферромагнитных объектов методом визуализирующей магнитные поля пленки, чтобы обеспечить высокую достоверность контроля?

Для отстройки от помех на пленке, обусловленных внешним полем, обеспечения высокой достоверности контроля при дефектоскопии стальных литых объектов толщиной до 30 мм необходимо использовать электромагнит, имеющий толщину полюсов не менее 60 мм, расстояние между полюсами не менее 200 мм, создающий напряженность поля в отсутствие объекта контроля от 500 до 650 А/см, осуществлять фотографирование в приложенном поле при постоянной чувствительности матрицы цифровой камеры и угле наблюдения не больше 40° [31, 38].

Какой вид имеет распределение отраженного светового потока от пленки в области индикаторных рисунков дефектов?

Распределение отраженного светового излучения от пленки в области индикаторных рисунков дефектов при намагничивании объектов контроля параллельно поверхности зависит от угла наблюдения. Оно имеет вид светлых полос, по обе стороны которых наблюдаются темные полосы, или прилегающих друг к другу темных и светлых полос. Индикаторные рисунки дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке позволяют идентифицировать вид дефектов, определять их расположение и отличать компактные дефекты от протяженных [31, 35, 38].

Почему распределение коэффициента диффузного отражения света от пленки $r(x)$ можно использовать для количественной оценки дефектов в ферромагнитных объектах?

На рис. 8.1 приведено сравнение полученного расчетным и экспериментальным путями [31, 37] распределения коэффициента диффузного отражения света $r(x)$ от пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности (б), а также экспериментально измеренной в [40] тангенциальной составляющей поля (в) в зоне этого дефекта (в обоих случаях внешнего поля $H_0 = 300$ А/см, напряженность поля в металле в зоне дефекта 90 А/см, толщина пластины $s = 8$ мм, ширина дефекта $2b = 1,6$ мм, глубина $h = 3,6$ мм).

Как видно из рисунка, распределение коэффициента диффузного отражения света от пленки $r(x)$ вдоль направления магнитного поля при намагничивании параллельно контролируемой поверхности объекта изменяется аналогично распределению тангенциальной составляющей напряженности суперпозиции полей вдоль этого же направления. Это позволяет использовать $r(x)$ для количественной оценки дефектов в ферромагнитных объектах (см. рис. 8.1). Как

показали исследования, основные закономерности, полученные для тангенциальной составляющей магнитного поля дефекта справедливы и для коэффициента диффузного отражения света от визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта.

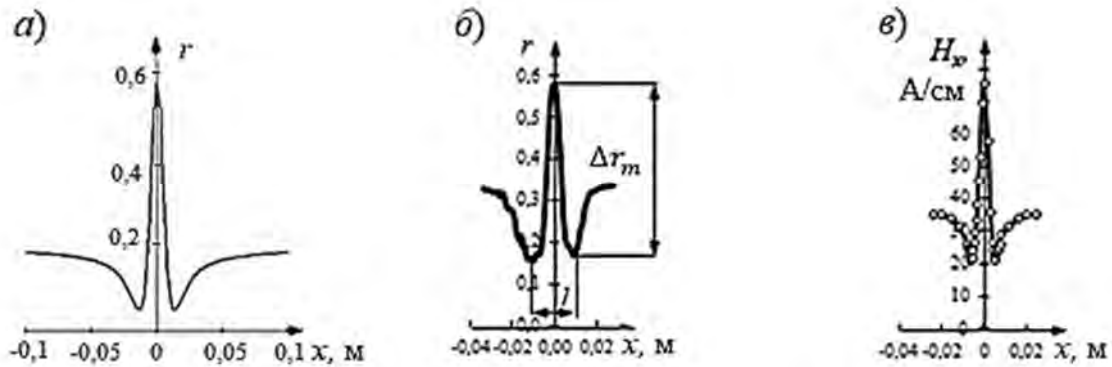


Рис. 8.1. Сравнение распределений расчетного (а) и экспериментального коэффициента диффузного отражения света $r(x)$ от пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности (б) [31, 37], а также экспериментально измеренной в [40] тангенциальной составляющей поля (в) в зоне этого дефекта (режим намагничивания: $H_0 = 300$ А/см; напряженность поля в металле в зоне дефекта 90 А/см; толщина пластины $s = 8$ мм; ширина протяженного дефекта $2b = 1,6$ мм; глубина $h = 3,6$ мм)

Что выбрано в качестве информационных параметров глубины залегания дефекта и его величины при магнитной дефектоскопии ферромагнитных объектов с использованием визуализирующей магнитные поля пленки?

Характер изменения коэффициента диффузного отражения света от пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта имеет вид остrokонечного импульса с двумя минимумами. Максимальное значение приращения коэффициента диффузного отражения света при дефектоскопии ферромагнитных объектов коррелирует с глубиной дефекта наружной и внутренней поверхности стенки объекта и диаметром внутреннего дефекта, а расстояние между его минимумами – с глубиной залегания внутреннего дефекта. Это позволяет по предварительно построенным экспериментальным зависимостям определить глубину плоских дефектов наружной и внутренней поверхности, а также диаметр и глубину залегания внутреннего дефекта.

Таким образом, определены информационные параметры распределения коэффициента диффузного отражения света от пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов – расстояние l между минимумами $r(x)$ и его максимальное приращение Δr_m , позволяющие установить глубину залегания дефектов и их величину соответственно [31, 37, 39].

Какие условия нужно создать для достижения высокой достоверности дефектоскопии ферромагнитных объектов методом визуализирующей магнитные поля пленки?

Для достижения высокой достоверности магнитного контроля при использовании в качестве носителя информации визуализирующей магнитные поля пленки необходимо *обеспечить*: режим намагничивания, не допускающий намагничивания пленки в зоне дефекта выше ее магнитного насыщения; освещение пленки пучком параллельных лучей зеленого цвета; угол наблюдения, не превышающий $\pm 40^\circ$ к нормали к поверхности пленки; фотографирование в приложенном поле изображений индикаторных рисунков дефектов при постоянной чувствительности матрицы цифровой камеры не ранее 2 с после включения намагничивающего тока в катушке электромагнита с исключением посторонних источников прямого и отраженного светового излучения; получение изображений индикаторных рисунков дефектов при разной глубине их залегания; построение графиков зависимостей расстояния между минимумами коэффициента диффузного отражения света от пленки $r(x)$ в зоне индикаторного рисунка дефекта и его приращения Δr соответственно от глубины залегания дефекта и его величины.

Следует помнить, что границы области удовлетворительной выявляемости дефектов в изделии зависят от режима намагничивания, величины дефекта, расстояния между полюсами электромагнита, а также от того, находятся электромагнит и пленка с одной или с разных сторон стенки объекта.

Каковы достоинства визуализирующей магнитные поля пленки при дефектоскопии ферромагнитных объектов?

Визуализирующая магнитные поля пленка позволяет осуществлять дефектоскопию ферромагнитных объектов с грубой поверхностью, например стального литья без предварительной механической подготовки поверхности, определять глубину залегания и величину дефекта в объектах с толщиной стенки до 30 мм. Это объясняется тем, что пленка чувствительна как к тангенциальной, так и к нормальной составляющей магнитного поля.

Достоинством является наглядность, возможность наблюдения индикаторных рисунков дефектов одновременно на больших площадях и их количественной оценки.

Что собой представляют индикаторные рисунки дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке?

На рис. 8.2 изображены индикаторные рисунки на пленке разноориентированных трещин в объекте при контроле способом остаточной намагниченности (а) и способом приложенного поля (б). Намагничивание диска из стали 65Г в первом случае осуществляли перемещаемым постоянным

магнитом до укладки пленки на его поверхность, во втором – через уложенную на образец пленку.

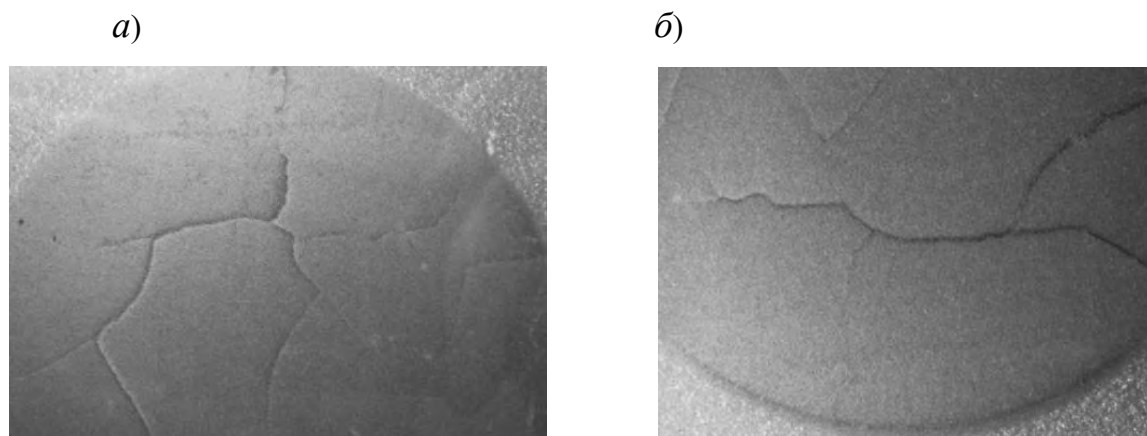


Рис. 8.2. Индикаторный рисунок поверхностных трещин на диске: *а* – при контроле на остаточной намагниченности; *б* – в приложенном поле перемещаемого над пленкой постоянного магнита

На рис. 8.3 приведены индикаторные рисунки шлаковых включений размером 3,2; 4 и 4,8 мм, находящихся в образце толщиной 12 мм на глубине 6 мм от поверхности [31, 38].



Рис. 8.3. Индикаторные рисунки шлаковых включений размером 3,2; 4 и 4,8 мм, находящихся в образце толщиной 12 мм на глубине 6 мм от поверхности

Какое устройство используют для определения глубины залегания и величины дефекта в объекте?

Для определения глубины залегания и величины дефекта используют устройство, изображенное на рис. 8.4. Устройство содержит постоянный магнит или запитанный от источника постоянного тока электромагнит 1 с П-образным сердечником, на котором располагается контролируемый образец 2 с уложенной на его поверхность магнитной пленкой 3, визуализирующей магнитные поля, оптическую систему, выполненную с возможностью

формирования и направления на пленку параллельных пучков светового излучения заданного цвета (светодиод 4, его источник питания 5, светофильтр 6 и конденсор 7, помещенные в корпус 8).

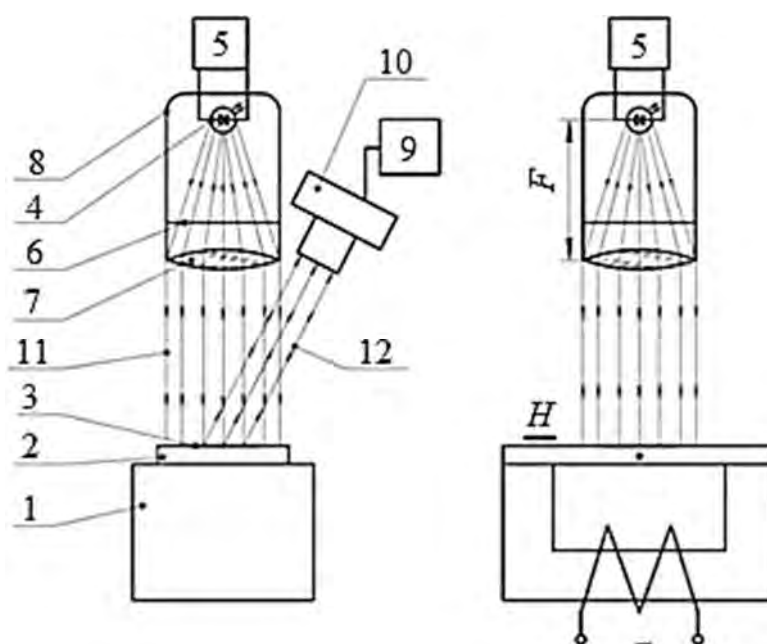


Рис. 8.4. Устройство для определения величины и глубины залегания дефекта в объекте

Кроме того, оно содержит устройство обработки изображений 9, созданных цифровой камерой 10, выполненное с возможностью вычисления коэффициента отражения пленки, соответствующего каждому пикселю каждого изображения, и определения глубины залегания и величины дефектов в объекте с учетом результатов указанного вычисления [31, 35]. На рис. 8.4 показано падающее 11 и отраженное от пленки 12 световое излучение.

Опишите способ измерения величины и глубины залегания дефекта в ферромагнитном объекте с помощью визуализирующей магнитные поля пленки.

Чтобы определить глубину залегания дефекта и его величину в объекте, на контролируемый объект укладывают визуализирующую магнитные поля пленку, намагничивают ее вместе с объектом постоянным магнитным полем, освещают магнитную пленку параллельным пучком светового излучения заданного цвета, фиксируют с помощью цифровой камеры сформировавшиеся на пленке индикаторные рисунки дефектов в объекте, копируют полученные цифровые изображения на носитель информации, далее попиксельно определяют на каждом из них значения интенсивности указанного цвета, пропорциональные по величине отраженному от магнитной пленки световому излучению, затем определяют для каждого изображения значения интен-

сивности падающего на пленку светового излучения, вычисляют соответствующий каждому указанному пикселю коэффициент отражения магнитной пленки r , строят для каждого изображения график зависимости $r(x)$ указанного коэффициента отражения от расстояния x , отсчитываемого от плоскости симметрии индикаторного рисунка дефекта в поперечном направлении, выводят его на монитор в виде характеризующего дефект остроконечного импульса, измеряют расстояние l между минимумами этого импульса и находят глубину h_{30} залегания дефекта в объекте по заранее построенному графику зависимости указанной глубины залегания от l , а затем измеряют максимальное приращение Δr_m указанного коэффициента отражения в пределах указанного импульса и находят величину d дефекта по графику зависимости $d(\Delta r_m)$, соответствующему найденной величине h_{30} и выбранному из семейства заранее построенных аналогичных графиков, каждый из которых соответствует своей глубине залегания дефекта в объекте [31, 35].

Какова разрешающая способность магнитной дефектоскопии с использованием визуализирующей магнитные поля пленки?

Установлено, что дефекты наружной поверхности по отношению к визуализирующей пленке можно различить, когда они находятся на минимальном расстоянии друг от друга.

С увеличением глубины залегания дефекта разрешающая способность метода контроля падает. Разрешающая способность метода при обнаружении дефектов внутренней поверхности по отношению к уложенной на поверхность образца визуализирующей пленке уменьшается при увеличении толщины стенки образца. Так, минимальное расстояние между двумя уверенно различаемыми протяженными дефектами внутренней поверхности составляет от 1,5 до 2 мм в образцах толщиной 6, 8 и 10 мм соответственно [31, 37].

Для исследований использовали образцы с протяженными искусственными дефектами шириной 0,2 мм, выполненными электроэрозионным методом. Прорези пересекали друг друга под углом 5° . Определяли, при каком минимальном расстоянии между канавками они различались отдельно.

Изобразите индикаторный рисунок дефекта на визуализирующей магнитные поля пленке и соответствующий график зависимости коэффициента диффузного отражения света от пленки поперек дефекта.

На рис. 8.5 изображен индикаторный рисунок дефекта (а) и соответствующая ему экспериментально полученная зависимость распределения коэффициента диффузного отражения света пленки (б) от расстояния поперек плоского дефекта внутренней поверхности пластины толщиной 6 мм. Ширина протяженного дефекта – 1,5 мм, глубина – 3 мм [31, 37, 39].

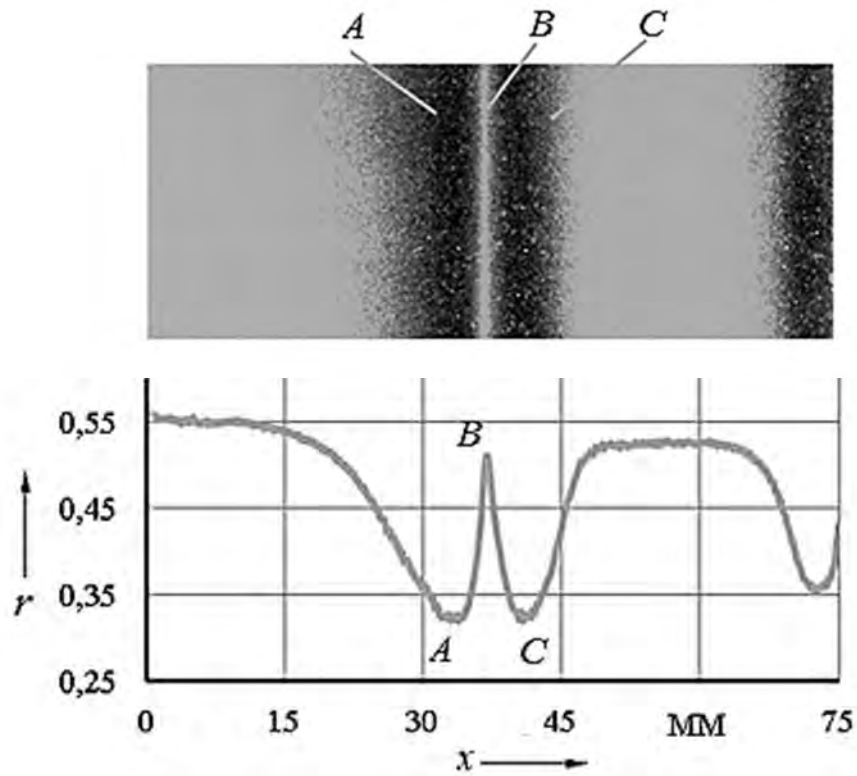


Рис. 8.5. Изображение индикаторного рисунка дефекта (а) и соответствующей ему зависимости распределения коэффициента диффузного отражения света пленки (б) от расстояния поперек плоского дефекта внутренней поверхности пластины толщиной 6 мм: ширина дефекта – 1,5 мм, глубина – 3 мм

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

9.1. Лабораторная работа № 1. Построение основной кривой намагничивания материала

Цель работы: приобрести практические навыки измерений и усвоить методику определения основной кривой намагничивания вещества.

9.1.1. Основные теоретические положения

Основная кривая намагничивания (индукции) – кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля. Каждая точка основной кривой намагничивания фиксируется после многократного коммутирования намагничивающего тока для получения установившегося цикла. Коммутационная (основная) кривая намагничивания является исходной для получения таких характеристик ферромагнитных материалов, как начальная, дифференциальная, максимальная магнитная проницаемость и др.

Методика выполнения измерений при определении основной кривой намагничивания материалов с коэрцитивной силой до 4 кА/м регламентируется ГОСТ 8.377–80. Измерения выполняют на образцах кольцеобразной формы с отношением наружного диаметра к его внутреннему диаметру не более 1,3. На кольцевые образцы должны быть нанесены изолированным медным проводом две обмотки: измерительная и намагничивающая. Обмотки друг от друга и образец от обмоток изолируют лентой из изоляционного материала (лакоткань и т. д.). Число витков измерительной обмотки выбирают в соответствии с чувствительностью баллистического гальванометра или веберметра таким, чтобы при измерении минимальной магнитной индукции на основной кривой намагничивания относительная погрешность отсчета на баллистическом гальванометре была не более 0,5 % (отклонение указателя аналогового веберметра находилось бы во второй половине шкалы). Отводимые от обмотки провода должны быть перевиты.

Намагничивающая обмотка должна быть расположена равномерно по длине окружности образца поверх измерительной обмотки. Число витков W_1 намагничивающей обмотки вычисляют по формуле

$$W_1 \geq \frac{\pi H(D_H + D_B)}{2I}, \quad (9.1)$$

где H – максимальное значение напряженности поля, которое требуется создать в образце, А/м; I – максимальный ток, не вызывающий нагревания обмотки и, как следствие, нагревания образца.

Кольцевые образцы размагничивают перед экспериментами посредством перемагничивания их в переменном поле с амплитудой, равномерно убывающей от определенного максимального значения. Максимальная амплитуда размагничивающего поля должна превышать коэрцитивную силу материала образца не менее чем в 50 раз для сплавов по ГОСТ 10160–75 и не менее чем в 10 раз для остальных материалов. Конечная амплитуда, при которой разрывается цепь размагничивающего тока, должна быть не более 0,1 А/м для сплавов по ГОСТ 10160–75 и не более 0,005 H_c для остальных материалов.

Основную кривую намагничивания определяют начиная с наименьшего требуемого значения напряженности поля, постепенно переходя к большим значениям. Не допускается возврат от больших значений к меньшим.

Приборы и оборудование

1. Микровольтампервеберметр с дополнительным пультом управления.
2. Кольцевой образец из стали.
3. Обмоточный медный провод диаметром 0,5 мм длиной 7 м и диаметром 0,2 мм длиной 1,5 м.
4. Изоляционная лента или лакоткань.
5. Штангенциркуль.
6. Кусачки.
7. Шкурка для зачистки проводов.
8. Челнок.

Порядок выполнения работы

1. Подготовка образцов.

Подготовку образцов произвести следующим образом:

- измерить параметры исследуемого размагниченного кольцевого образца: h – толщину образца; D_n – наружный диаметр; D_g – внутренний диаметр;
- нанести на поверхность кольцевого образца слой изоляции. Повторить замеры параметров согласно предыдущему пункту;
- нанести на изолированный образец два витка ($W_2 = 2$) изолированного медного провода диаметром $d = 0,2$ мм. Отводимые от образца провода свить, концы проводов зачистить;
- определить требуемое число витков намагничивающей обмотки W_2 по формуле (9.1) для случая $H = 50$ А/см, $I = 6$ А;

– витки измерительной обмотки, нанесенные на образец, покрыть изоляцией. Нанести равномерно по всей поверхности кольцевого образца намагничивающую обмотку. Отводимые от образца провода свить, концы проводов очистить от лака.

2. Выполнение измерений.

Измерения провести в следующем порядке:

– собрать установку для измерения статических магнитных характеристик материалов (см. принципиальную электрическую схему на пульте управления);

– подключить измерительную обмотку к соответствующим клеммам микровольтампервеберметра типа Ф18. Перевести переключатель прибора на предел измерения магнитного потока. Проверить установку нуля прибора, для этого перевести соответствующий тумблер в положение «нуль». В случае, если стрелка прибора начнет «сползать», включить тумблер «сухой элемент» и с помощью реостатов «грубо» и «точно» остановить стрелку.

Замечание. Если контактные концы измерительной катушки плохо зачищены или имеется обрыв провода, то стрелка прибора будет занимать крайнее положение;

– при включенном тумблере S_2 произвести 10...12 коммутационных переключений тока, включить тумблер S_3 , тумблер на панели прибора перевести в положение «измерение». Переключателем S_2 изменить направление протекания тока и произвести отсчет по шкале прибора (стрелка прибора должна отклоняться вправо);

– увеличить ток в намагничивающей катушке на 0,5 А, повторить измерения.

Замечание. Для расчетов необходимо использовать величину намагничивающего тока по показаниям амперметра в момент измерения магнитного потока;

– определить напряженность поля, создаваемого намагничивающей катушкой, по формуле

$$H_1 = \frac{W_1 I}{2\pi R_{cp}}, \quad (9.2)$$

где W_1 – число витков первичной (намагничивающей) катушки; I – ток в намагничивающей катушке, А; R_{cp} – средний радиус кольцевого образца,

$$R_{cp} = \frac{D_n + D_e}{4};$$

– определить величину индукции в образце при соответствующих значениях тока по формуле

$$B = \frac{\Psi}{2W_2S}, \quad (9.3)$$

где Ψ – показания прибора; W_2 – число витков измерительной катушки;
 S – сечение, охватываемое витком измерительной катушки;
 – построить основную кривую намагничивания вещества.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Эскиз образца.
3. Основные расчетные формулы и результаты.
4. График зависимости $B = f(H)$.
5. Выводы.

9.2. Лабораторная работа № 2. Размагничивание деталей и оценка качества размагничивания

Цель работы: приобрести навыки оценки качества размагничивания ферромагнитных объектов.

9.2.1. Основные теоретические положения

Детали, прошедшие магнитный контроль и признанные годными по результатам этого контроля, должны быть подвергнуты размагничиванию. Специальное размагничивание не требуется, если после магнитного контроля деталь подвергается термообработке с нагревом не менее чем до точки Кюри.

В настоящее время применяют в основном два способа размагничивания:

- 1) нагревание объекта выше точки Кюри;
- 2) воздействие на объект переменным магнитным полем с убывающей до нуля амплитудой.

Первый способ применяется достаточно редко, т. к. приводит к снижению механических свойств объекта. При размагничивании детали в переменных магнитных полях максимальная амплитуда размагничивающего поля устанавливается не ниже напряженности поля, в котором объект был намагничен. Частота размагничивающего поля обычно составляет от 1 до 50 Гц. Лучшие результаты размагничивания получаются в случаях, когда направление размагничивающего поля совпадает с направлением поля, которым детали были намагничены.

В зависимости от формы и размеров деталей размагничивание может осуществляться следующими способами:

- путем перемещения детали через соленоид, питаемый переменным током и удаления ее на расстояние, на котором поле соленоида ничтожно мало, обычно на расстояние, равное 3...5 диаметрам (или диагоналям) соленоида;
- уменьшая до нуля переменный ток в катушке соленоида с помещенной в него деталью (длина соленоида должна быть при этом больше длины детали);
- удаляя детали из электромагнита, питаемого переменным током;
- уменьшая до нуля переменный ток в электромагните, в межполюсном пространстве которого находится размагничиваемая деталь или ее участок;
- пропуская по детали либо по стержню, вставленному в полость детали, переменный ток, амплитуда которого изменяется от максимального значения до нуля;
- путем продольного намагничивания детали постоянным магнитным полем соленоида или электромагнита до насыщения и перемагничивания ее постоянным полем противоположного направления, величина которого подобрана соответствующим образом.

Качественное размагничивание обеспечивается в том случае, если начальная напряженность размагничивающего поля во всех точках объема детали, подлежащей размагничиванию, будет более пяти значений коэрцитивной силы материала. Процесс размагничивания должен включать не менее 40 периодов размагничивающего поля, равномерно убывающих по амплитуде.

При размагничивании детали путем ее перемещения через соленоид, питаемый переменным током, максимально допустимая скорость продвижения детали через соленоид определяется следующей формулой:

$$V_{\max} = \frac{H_{\max}(1-c)f}{\left(\frac{dH}{dx}\right)_{\max}}, \quad (9.4)$$

где H_{\max} – максимальная напряженность магнитного поля соленоида в зоне прохождения размагничиваемых деталей; f – частота размагничивающего тока; c – коэффициент, определяющий максимальное допустимое уменьшение амплитуды напряженности магнитного поля между последующим H_2 и предыдущим H_1 периодами; $c = \frac{H_2}{H_1}$; обычно достаточно, если $c = 0,95$;

$\left(\frac{dH}{dx}\right)_{\max}$ – максимальное значение градиента магнитного поля в направлении, параллельном оси соленоида в зоне прохождения размагничивающихся деталей.

Оценку качества размагничивания объекта производят путем определения показателя размагниченности K , выполняя измерения при вертикальном или горизонтальном расположении объекта:

$$K = C_6 \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}, \quad (9.5)$$

где C_6 – поправочный коэффициент, если деталь в процессе измерений располагалась вертикально; α_1 – отклонение стрелки измерителя напряженности поля при первом измерении, когда преобразователь располагается у конца детали; α_2 – то же после поворота детали вместе с преобразователем на 180° вокруг малой оси детали.

В большинстве случаев деталь считают размагниченной, если $K \leq 3$.

Приборы и оборудование

1. Измеритель напряженности магнитного поля ФП-1.
2. Ферромагнитная штанга.
3. Соленоид.
4. Источник питания В-24М.
5. Немагнитная прокладка.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить задание (по указанию преподавателя). Измерить напряженность поля на расстоянии Δ от одного конца детали при ее вертикальном расположении. Произвести повторное измерение, повернув деталь вместе с преобразователем на 180° .
2. Определить показатель размагниченности ферромагнитной штанги.
3. Если $K > 3$, то произвести размагничивание штанги, предварительно определив максимально допустимую скорость перемещения детали в соленоиде.
4. Повторить исследования согласно п. 1 и 2.

Содержание отчета

1. Цель работы
2. Описание основных способов размагничивания.
3. Выполнение расчетного задания.
4. Описание методики исследований.
5. Оценка качества размагничивания объекта.

6. Расчет максимально допустимой скорости перемещения детали в соленоиде при ее размагничивании.

7. Выводы.

9.3. Лабораторная работа № 3. Исследование выявляемости дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов магнитопорошковым методом

Цель работы: усвоить методику контроля ферромагнитных изделий магнитопорошковым методом; приобрести навыки контроля ферромагнитных изделий магнитопорошковым методом.

9.3.1. Основные теоретические положения

Магнитопорошковый метод основан на обнаружении магнитных полей рассеяния, обусловленных дефектами в намагниченном ферромагнитном объекте, с помощью ферромагнитных частиц. Магнитопорошковой дефектоскопии подвергаются исключительно ферромагнитные материалы: некоторые стали, никель, кобальт, гадолиний и ряд сплавов. Контроль методом магнитного порошка можно производить способом приложенного поля и способом остаточной намагниченности. Для обнаружения дефектов применяют сухой порошок, магнитную суспензию или быстро высыхающую магнитогумированную пасту.

В качестве порошка могут быть использованы чистая, без примесей, окалина, обожженный крокус, магнетит, полученный химическим путем. Суспензия обычно готовится из перечисленных порошков и трансформаторного масла. Для снижения вязкости в масло добавляют керосин. Применяют также водные суспензии.

Пример состава водной магнитной суспензии.

Черный магнитный порошок ТУ 6-14–100974 – 20...25 г.

Эмульгатор ОП-7 – 30...40 г.

Натрий азотнокислый (ГОСТ 4168–79) – 10...20 г.

Вода водопроводная – 1 л.

При контроле частицы порошка перемещаются по поверхности детали и скапливаются в виде валиков над дефектами. Форма скопления порошка соответствует очертаниям выявляемых дефектов.

Чувствительность магнитопорошкового метода контроля зависит от размера частиц порошка, его магнитных свойств, напряженности приложенного

намагничивающего поля, формы и ориентации дефектов, состояния и формы поверхности контролируемого изделия.

Магнитопорошковым методом могут быть выявлены дефекты раскрытием 0,001 мм и больше. Хорошо выявляются поверхностные дефекты, имеющие резкие очертания. Могут также выявляться сравнительно крупные дефекты на глубине до 6 мм. Наиболее четко выявляются дефекты, ориентированные перпендикулярно намагничивающему полю.

В практике магнитопорошкового контроля хорошо зарекомендовали себя дефектоскопы МД-50П, МД-М, 77 ПМД-3М, ДПМ-2 и др.

Приборы и оборудование

1. Дефектоскоп магнитопорошковый МД-М, МД-50П.
2. Источник питания В-24.
3. Намагничивающее устройство.
4. Порошок магнитный черный ТУ 6-14-1009–74, порошок буровато-красный, магнитно-люминесцентный порошок, концентрат магнитного порошка.
5. Набор образцов: образцы со сварными швами, проходные резцы для деревообработки, диски, щит электродвигателя, Т-образные образцы, пружины растяжения.

Порядок выполнения работы

1. Изучить ГОСТ 21105–87; ознакомиться с заданием.
2. Определить $\mu_{r \max}$ материала контролируемого изделия. Сделать вывод относительно возможности разработки методики контроля согласно ГОСТ 21105–87.
3. Выяснить условный уровень чувствительности.
4. Выбрать способ магнитопорошкового контроля.
5. Выбрать вид, способ и схему намагничивания.
6. Определить род тока.
7. Определить режим намагничивания.
8. Выбрать тип дефектоскопа.
9. Указать требуемую шероховатость поверхности объекта контроля.
10. Выбрать цвет магнитного порошка.
11. Выбрать дисперсионную среду.
12. Выбрать способ нанесения магнитного порошка, суспензии или магнитогумированной пасты.
13. Выбрать оборудование для осмотра деталей при контроле.

14. Указать типичные признаки дефектов по картине осаждения порошка.
15. Выбрать способ размагничивания объекта контроля.
16. Выбрать способ удаления порошка или суспензии.
17. Оценить качество размагничивания объекта контроля.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные положения технологической инструкции по магнитопорошковому контролю конкретного объекта.
3. Результаты контроля конкретных объектов, фотографии индикаторных рисунков дефектов.
4. Выводы.

9.4. Лабораторная работа № 4. Магнитографический контроль объектов с плоской поверхностью

Цель работы: приобрести навыки контроля ферромагнитных изделий магнитографическим методом.

9.4.1. Основные теоретические положения

Метод магнитографического контроля заключается в намагничивании контролируемого участка ферромагнитного изделия вместе с прижатым к его поверхности магнитоносителем (магнитной лентой), фиксации на нем возникающих в местах дефектов полей рассеяния и последующем воспроизведении полученной записи. Магнитные поля рассеяния в местах дефектов возникают вследствие различной магнитной проницаемости металла изделия и дефекта. Таким образом, магнитографический метод контроля состоит из двух операций: намагничивания контролируемого объекта с записью полей дефектов на магнитную ленту и считывания записи с индикацией полученных сигналов на специальных дефектоскопах. Для намагничивания объектов контроля чаще всего применяют электромагниты с П-образным сечением, а контроль производят в приложенном магнитном поле. О наличии дефекта в изделии судят по характерному дипольному сигналу на экране осциллографа дефектоскопа.

Чтобы определить, является ли дефект недопустимым, применяют эталонные магнитные ленты. Эталонные ленты получают при контроле испытательных образцов. Испытательные образцы представляют собой часть контролируемого изделия, сварной шов которого выполнен по той же технологии, что и шов проверяемого изделия. В отдельных местах в корне шва испытательный образец

содержит естественные или искусственные дефекты, соответствующие минимальному браковочному уровню. Эталонную ленту получают с использованием рабочих намагничивающих устройств. Контроль осуществляют при рабочих режимах намагничивания. При контроле сравнивают амплитуду сигнала, обусловленного дефектом в контролируемом изделии, с амплитудой сигнала от наименьшего недопустимого дефекта в испытательном образце. Если амплитуда сигнала от дефекта в изделии превышает браковочный уровень, то дефект считают недопустимым.

Приборы и оборудование

1. Дефектоскоп магнитографический МДУ-2У.
2. Источник питания постоянного тока ВСА-5К.
3. Намагничивающее устройство.
4. Электрическая катушка для размагничивания магнитной ленты.
5. Набор образцов.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания к лабораторной работе и литературу по изучаемой теме.

2. Настроить дефектоскоп по эталонной магнитной ленте.

3. Проконтролировать плоский образец, имеющий дефект в виде углубления, для случая дефекта наружной и внутренней поверхности ($I = 3 \text{ А}$). Сфотографировать сигналограмму для дефектного и качественного участков образца.

4. Проконтролировать образец, содержащий шесть сквозных отверстий. Сделать выводы.

5. Проконтролировать образец с компактным дефектом при токах $I = 1, 2, \dots, 8 \text{ А}$. Сделать выводы. Аналогичные исследования выполнить, используя поляризованную магнитную ленту.

6. Проконтролировать образец, содержащий цепочку пор, дважды: намагничивая поперек цепочки (традиционный способ); намагничивая вдоль цепочки. В обоих случаях считывание записи с ленты следует производить вдоль линии намагничивания. Сфотографировать сигналограммы.

7. Проконтролировать образец из немагнитного материала, содержащий углубление. Сделать выводы.

8. Проконтролировать образцы, имеющие одинаковую толщину и разную глубину дефекта, для случая дефекта внутренней поверхности по отношению к магнитоносителю. Построить график зависимости $A = f(h_{\text{деф}})$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Результаты экспериментальных исследований.
3. Выводы.

9.5. Лабораторная работа № 5. Магнитографический контроль сварных соединений

Цель работы: приобрести навыки контроля сварных соединений магнитографическим методом контроля.

9.5.1. Основные теоретические положения

При магнитографическом контроле сварных соединений целесообразно производить отдельный контроль швов на наличие протяженных (ориентированных вдоль шва), компактных и разноориентированных дефектов. Это позволяет более полно учесть при контроле как специфические особенности дефектов сплошности (форма, ориентация, место расположения и т. д.), так и конструктивно-технологические особенности сварных соединений. Так, при обнаружении протяженных дефектов сварных швов намагничивают в поперечном направлении, используя при неблагоприятных размерах выпуклости шва концентраторы магнитной индукции. Для уверенного обнаружения пор и шлаковых включений сварных швов с прижатой к нему магнитной лентой следует намагнитить в продольном направлении, а запись с ленты нужно считать вдоль направления остаточной намагниченности. Более высокой чувствительности контроля разноориентированных трещин можно достичь, если при намагничивании поворачивать намагничивающее устройство в процессе его перемещения вдоль шва в пределах $\pm 45^\circ$ к продольной оси шва.

Приборы и оборудование

1. Дефектоскоп магнитографический МДУ-2У.
2. Источник питания ВСА-5.
3. Намагничивающее устройство.
4. Катушка для размагничивания магнитной ленты.
5. Набор образцов.

Порядок выполнения работы

1. Настроить дефектоскоп по магнитной эталонной ленте.

2. Подготовить магнитную ленту к контролю.

3. Намагнитить сварное соединение вместе с прижатой к нему магнитной лентой в поперечном направлении при токе в катушке намагничивающего устройства 16 А. Зарисовать сигналограммы, соответствующие бездефектному и дефектному участкам шва. Сделать выводы относительно выявляемости локальных и протяженных дефектов, ориентированных вдоль шва.

4. Повторить эксперимент, описанный в п. 3, и построить график зависимости $A = f(I)$, где I – ток в катушке электромагнита, $I = 4, 8, 12, 16, 20$ А; A – амплитуда сигнала, обусловленного дефектом.

5. У начала и конца сварного шва образца уложить технологические пластины, выполненные из материала контролируемого изделия и имеющие ту же толщину, что и образец. Намагнитить сварной шов вместе с прижатой к его поверхности магнитной лентой вдоль шва ($I = 4$ А). Считать запись с магнитной ленты вдоль направления ее остаточной намагниченности. Сделать выводы относительно выявляемости компактных дефектов.

6. Проконтролировать образец толщиной 6 мм, имеющий выпуклость шва высотой 2,25 мм и шириной 12,5 мм, содержащий канавку в корне шва, имитирующую непровар. Ток в катушке электромагнита – 16 А. Тот же образец проконтролировать, используя подмагничивающую систему в виде прямоугольной пластины толщиной 4 мм и двух пластин со скосом кромки, укладываемую с обратной стороны шва, в месте канавки и при ее отсутствии. Произвести также контроль бездефектного участка шва с использованием подмагничивающей системы в виде двух пластин со скосом кромки.

7. Сделать выводы.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Результаты экспериментальных исследований.

3. Выводы.

10. ТЕСТЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНАМ ПО МАГНИТНОМУ КОНТРОЛЮ

10.1. Общий экзамен

1. Детали из каких материалов контролируют магнитными методами:

- а) из пластмасс;
- б) из цветных металлов;
- в) из дерева;
- г) из ферромагнитных материалов.

2. Ферромагнитная частица находится в однородном магнитном поле.

В каком направлении она перемещается:

- а) перемещается в сторону южного магнитного полюса;
- б) перемещается в сторону северного магнитного полюса;
- в) перемещается перпендикулярно вектору напряженности магнитного поля;
- г) частица покоится.

3. Магнитная деталь помещена в неоднородное магнитное поле.

В каком направлении она перемещается:

- а) в сторону убывания поля;
- б) в сторону возрастания поля;
- в) деталь неподвижна;
- г) направление перемещения детали не зависит от направления напряженности поля.

4. Почему при магнитном контроле детали толщиной более 20 мм не рекомендуют намагничивать постоянным полем:

- а) не достигается требуемый уровень чувствительности;
- б) их трудно впоследствии размагнитить;
- в) трудно создать поле требуемой напряженности;
- г) чтобы сэкономить электроэнергию.

5. Какая энергия затрачивается на полный цикл перемагничивания ферромагнетика от $-H$ до $+H$:

- а) BH (B – значение индукции);
- б) $0,5BH$;
- в) $2BH$;
- г) определяется площадью петли гистерезиса.

6. При магнитном контроле выбирают такой способ намагничивания, чтобы угол α был близок к 90° . Каков угол α :

- а) угол между \vec{H} и нормалью к направлению распространения дефекта;
- б) угол между вектором напряженности поля и направлением распространения дефекта;
- в) угол между \vec{H} и плоскостью контролируемой поверхности;
- г) угол сдвига фаз тока и напряжения.

7. Какими свойствами обладают ферромагнитные материалы:

- а) большими положительными значениями магнитной проницаемости, ее нелинейной зависимостью от напряженности магнитного поля и температуры;
- б) способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах в слабых полях;
- в) гистерезисом и точкой Кюри;
- г) все утверждения правильные.

8. Как влияет глубина залегания внутреннего дефекта на напряженность его поля:

- а) не влияет;
- б) существует линейная зависимость между глубиной залегания и напряженностью поля внутреннего дефекта;
- в) напряженность поля внутреннего дефекта изменяется обратно пропорционально квадрату глубины залегания в слабых полях и обратно пропорционально глубине залегания в сильных полях;
- г) изменяется обратно пропорционально кубу глубины залегания.

9. Органы управления магнитных дефектоскопов должны быть вынесены за пределы действия полей напряженностью более:

- а) 5 А/см;
- б) 8000 А/м;
- в) 1000 А/см;
- г) 30 А/см.

10. Каковы свойства силовых линий магнитного поля:

- а) силовые линии не пересекают друг друга;
- б) если магнитное поле однородно, то магнитные силовые линии имеют вид параллельных прямых;
- в) плотность силовых линий равна индукции магнитного поля;
- г) все утверждения правильные.

11. С какими утверждениями Вы согласны:

- а) силовые линии магнитного поля, создаваемого проводником с током, имеют вид концентрических окружностей;
- б) силовые линии магнитного поля снаружи соленоида направлены от северного полюса к южному, а внутри – от южного к северному;
- в) касательные к силовым линиям в каждой точке указывают направление силы, действующей в этой точке на северный полюс магнитной стрелки;
- г) все утверждения правильные.

12. Как определяют размагничивающий фактор объектов, не имеющих форму эллипсоида:

- а) используя усредненные значения, полученные по приближенным формулам или справочникам;
- б) для них размагничивающий фактор равен нулю;
- в) для них размагничивающий фактор равен $1/3$;
- г) $N_p = l/d$, где l – длина, d – поперечный размер объекта.

13. По какой формуле определяют амплитудное значение намагничивающего тока I при циркулярном намагничивании цилиндрического объекта контроля диаметром d :

- а) $I = Hd$;
- б) $I = 3Hd$;
- в) $I = 2Hd$;
- г) $I = 1/3Hd$.

14. По какой формуле определяют амплитудное значение намагничивающего тока I при циркулярном намагничивании пластин ($a/b \geq 10$):

- а) $I = 2Ha$;
- б) $I = 3Ha$;
- в) $I = 2H(a + b)$;
- г) $I = Ha$.

15. Как образуется магнитное поле рассеивания над дефектом:

- а) при намагничивании детали часть магнитного потока (вследствие сильного локального уменьшения магнитной проницаемости) выходит на поверхность, огибая дефект и образуя магнитное поле рассеивания над ним;
- б) в месте дефекта происходит разрыв силовых линий магнитного поля;
- в) часть магнитного потока (вследствие сильного локального уменьшения магнитной проницаемости) выходит на поверхность, огибая дефект;
- г) все ответы правильные.

16. Какими свойствами обладают магнито жесткие материалы:

- а) имеют широкую петлю гистерезиса;
- б) большое значение коэрцитивной силы;
- в) большое значение остаточной намагниченности;
- г) все утверждения правильные.

17. Какими свойствами обладают магнитомягкие материалы:

- а) намагничиваются до насыщения в слабых полях;
- б) имеют высокую магнитную проницаемость;
- в) имеют узкую петлю гистерезиса и малые потери на перемагничивание;
- г) все утверждения правильные.

18. Одинаковы ли значения коэрцитивной силы по индукции и намагниченности:

- а) всегда одинаковы;
- б) их значения близки для магнито жестких материалов;
- в) их значения близки для магнитомягких материалов;
- г) они равны по модулю.

19. Какие утверждения правильны:

- а) магнитные силовые линии проходят по пути наименьшего магнитного сопротивления;
- б) вдоль силовых линий магнитного поля располагаются оси магнитных стрелок;
- в) цепочки, которые образуют в магнитном поле железные опилки, показывают форму силовых линий;
- г) все утверждения правильные.

20. Что понимают под напряженностью поля дефекта:

- а) это сумма полного и приложенного магнитного поля;
- б) это разность полного и приложенного магнитного поля;
- в) это значение напряженности поля в зоне дефекта;
- г) все ответы правильные.

21. Как зависит глубина размагниченного слоя металла от магнитной проницаемости материала:

- а) не зависит;
- б) слабо зависит;
- в) увеличивается с увеличением μ ;
- г) уменьшается с увеличением μ .

22. Как зависит глубина размагниченного слоя металла при размагничивании объекта контроля (ОК) от удельной электрической проводимости σ :

- а) не зависит;
- б) слабо зависит;
- в) увеличивается с ростом σ ;
- г) уменьшается с ростом σ .

23. Как зависит глубина размагниченного слоя металла при размагничивании объекта контроля от частоты поля:

- а) не зависит;
- б) уменьшается с ростом ω ;
- в) увеличивается с ростом ω ;
- г) слабо зависит.

24. От чего зависит величина измеренного поля дефекта:

- а) от напряженности намагничивающего поля;
- б) от размеров, формы, ориентации и глубины залегания дефекта;
- в) от удаленности магнитного преобразователя от поверхности, магнитных свойств контролируемого объекта;
- г) все ответы правильные.

25. Объект размагничивают переменным полем с убывающей до нуля амплитудой. Какое минимальное число циклов рекомендуют для качественного размагничивания объекта:

- а) десять;
- б) двадцать;
- в) тридцать;
- г) сорок.

26. Можно ли размагнитить деталь за один цикл:

- а) нет;
- б) можно, если подобрать соответствующим образом напряженность размагничивающего поля;
- в) можно, если изменить полярность тока в катушке;
- г) можно, но только массивные детали.

27. Почему чаще всего детали не размагничивают путем нагрева до точки Кюри:

- а) из-за больших затрат энергии;
- б) из-за некачественного размагничивания;

- в) из-за потери механических свойств;
- г) из-за технических трудностей.

28. Деталь в большинстве случаев считают размагниченной, если показатель размагниченности K :

- а) не более 3;
- б) не менее 3;
- в) равен 5;
- г) равен 2.

29. Для качественного размагничивания детали максимально допустимая скорость продвижения детали через соленоид переменного тока должна быть такой, чтобы отношение амплитуд напряженности магнитного поля между последующим H_2 и предыдущим H_1 периодами C было:

- а) 0,5;
- б) 2,0;
- в) не более 0,9;
- г) не менее 0,95.

30. Намагничены ли домены размагниченного ферромагнетика при комнатной температуре:

- а) нет;
- б) намагничены слабо;
- в) намагничены до насыщения;
- г) в ферромагнетике нет доменов.

31. Почему кольцеобразные образцы, применяемые для построения кривой намагничивания, должны иметь отношение $\frac{R_n}{R_g} \leq 1,3$, где R_n –

наружный радиус образцов, R_g – внутренний радиус:

- а) для удобства намотки намагничивающей обмотки;
- б) для удобства намотки измерительной обмотки;
- в) в этом случае средний радиус образца можно считать равным полусумме внутреннего и наружного радиусов;
- г) для удобства изготовления образца.

32. Какова формула для расчета напряженности поля, создаваемого намагничивающей обмоткой в кольцеобразном образце:

а) $H = \frac{IW_n}{\pi(R_n + R_g)}$ (где I – ток в обмотке, W_n и W_u – число витков

намагничивающей и измерительной обмотки соответственно, R_n и R_g – наружный и внутренний радиусы кольцеобразного образца);

б) $H = \frac{IW_u}{\pi(R_n + R_g)}$;

в) $H = \frac{IW_n}{\pi(R_n - R_g)}$;

г) $H = \frac{I(W_n - W_u)}{\pi(R_n + R_g)}$.

33. Какова формула для расчета напряженности поля, создаваемого бесконечно длинным соленоидом:

а) $\frac{IW}{\infty}$;

б) $\frac{I}{Wl}$;

в) $\frac{IW}{l}$;

г) $\frac{W}{Il}$.

34. Что означает коэффициент 2 в формуле для определения индукции при построении кривой намагничивания вещества $B = \frac{\Psi}{2W_2S}$ (Ψ – магнитный поток, W_2 – число витков измерительной обмотки, S – площадь сечения кольцеобразного образца):

а) число витков измерительной обмотки;

б) число витков измерительной обмотки;

в) число обмоток на образце;

г) напряженность поля при измерении меняется от $-H$ до $+H$.

35. Каковы единицы измерения магнитной индукции:

а) Тл;

б) А/м;

- в) Вб/м²;
- г) $\frac{Н}{А \cdot м}$.

36. Каковы единицы измерения магнитного потока:

- а) Ом·с;
- б) В·с;
- в) Вб;
- г) В·А·с.

37. В каких единицах измеряется намагниченность вещества:

- а) Гн;
- б) Ом·с;
- в) А/м;
- г) Вб.

38. Какие из представленных элементов являются ферромагнетиками:

- а) никель;
- б) кадмий;
- в) кобальт;
- г) гадолиний.

39. В формировании индикаторных рисунков дефектов участвуют:

- а) длинные цепочки ферромагнитных частиц;
- б) конгломераты ферромагнитных частиц;
- в) отдельные ферромагнитные частицы и короткие цепочки частиц;
- г) средние цепочки ферромагнитных частиц.

40. Как удаляют из магнитной суспензии длинные цепочки ферромагнитных частиц и конгломераты:

- а) добавляют в суспензию эмульгатор, размагничивают магнитный порошок в суспензии, пропускают суспензию через сито;
- б) размешивают суспензию в течение 3 мин;
- в) добавляют в суспензию хромпик калиевый;
- г) добавляют в суспензию Na₂CO₃.

41. Какая составляющая магнитного поля записывается на магнитную ленту:

- а) нормальная;
- б) тангенциальная;

- в) максимальное значение напряженности поля $\left(\sqrt{H_t^2 + H_n^2}\right)$;
- г) среднее значение напряженности поля.

42. Магнитографическим методом контролируют деталь с толщиной стенки 6 мм. Какую толщину должны иметь полюсы намагничивающего устройства:

- а) 6 мм;
- б) 5...10 мм;
- в) 20...40 мм;
- г) 12...18 мм.

43. Какой среди представленных дефектоскопов является магнитографическим:

- а) МД-50П;
- б) МДУ-2У;
- в) ВД-10П;
- г) ВД-40Н.

44. Почему для обнаружения протяженных дефектов в сварных швах изделий из низкоуглеродистых сталей рекомендуют сварной шов намагничивать в поперечном направлении:

- а) для повышения разрешающей способности метода;
- б) для повышения чувствительности метода контроля швов на наличие протяженных дефектов;
- в) для уменьшения помех, обусловленных валиком поля;
- г) для более равномерного намагничивания шва по сечению.

45. Почему при намагничивании сварных швов под углом к продольной оси чувствительность магнитографического метода на наличие компактных дефектов выше, чем при намагничивании шва в поперечном направлении:

- а) меньше растекание магнитного потока в шве;
- б) вследствие снижения помех от краев шва;
- в) вследствие более равномерного намагничивания шва;
- г) выше индукция в шве (вследствие уменьшения размагничивающего фактора валика шва).

46. В каком случае выше чувствительность магнитного контроля пластины на наличие цепочки пор:

- а) при намагничивании поперек цепочки;
- б) при намагничивании вдоль цепочки;

в) при намагничивании под углом 45° к направлению распространения дефекта;

г) не зависит от направления намагничивания.

47. Почему разрешающая способность магнитного контроля выше при намагничивании вдоль цепочки локальных дефектов:

а) поля дефектов ориентированы вдоль цепочки;

б) поля дефектов ориентированы поперек цепочки;

в) поля дефектов ориентированы под углом 45° к направлению распространения дефекта;

г) вследствие снижения чувствительности метода.

48. Из каких материалов изготавливают сердечники электромагнита:

а) из низкоуглеродистых сталей;

б) из среднеуглеродистых сталей;

в) из высоколегированных сталей;

г) из чугуна.

49. В каких единицах определяется величина дефекта при магнитографической дефектоскопии:

а) в миллиметрах (размер дефекта);

б) в процентах (размер дефекта в процентах по отношению к глубине залегания);

в) в процентах (размер дефекта в процентах по отношению к толщине стенки изделия);

г) в микрометрах (раскрытие дефекта).

50. Что такое глубина залегания дефекта в магнитографической дефектоскопии:

а) расстояние от ближайшей точки дефекта до контролируемой поверхности;

б) расстояние до центра дефекта;

в) глубина дефекта;

г) условный размер, определяемый по таблицам.

51. Как определить положение рабочей точки характеристики магнитной ленты при магнитографическом контроле:

а) $(4...5) H_c$ ленты;

б) совпадает с H , при котором $B_r = B_{r \max}$;

- в) (1,2...1,4) H_c ленты;
- г) совпадает H_c ленты.

52. Почему амплитудная характеристика магнитной ленты имеет максимум:

- а) так как поле дефекта зависит от режима намагничивания;
- б) вследствие влияния частотной характеристики индукционной магнитной головки;
- в) из-за нелинейности характеристики ленты;
- г) из-за линейности характеристики ленты.

53. На каком участке кривой $\mu = f(H)$ создаются наилучшие условия для обнаружения дефектов (μ – магнитная проницаемость материала изделия):

- а) $H_{mp} < H(\mu_{max})$;
- б) $H_{mp} = H(\mu_{max})$;
- в) $H_{mp} > H(\mu_{max})$;
- г) H_{mp} не зависит от μ_{max} .

54. Если объект намагничивают электромагнитом, то магнитопорошковый контроль производят:

- а) СОН;
- б) СПП;
- в) СОН, а затем СПП;
- г) сначала СПП, а затем СОН.

55. Как отличить по виду сигналаграммы дефект наружной и внутренней поверхности:

- а) дефект наружной поверхности обуславливает большую длительность импульса;
- б) дефект наружной поверхности обуславливает большую амплитуду;
- в) отличить невозможно;
- г) дефект внутренней поверхности обуславливает большую длительность импульса.

56. Что такое предельная чувствительность метода контроля:

- а) минимальная величина реального дефекта, обнаруживаемого при контроле;
- б) минимальная величина модели дефекта, уверенно обнаруживаемого при нормальной настройке дефектоскопа;

- в) дефект величиной 10 %;
- г) дефект, обнаруживаемый при отношении амплитуд «сигнал – шум» более 2.

57. Будут ли наблюдаться на сигналограмме помехи от краев валика шва, если намагничивание шва осуществлять вдоль продольной оси шва:

- а) да;
- б) нет;
- в) помехи уменьшатся;
- г) помехи увеличатся.

58. Будут ли наблюдаться на сигналограмме помехи от краев шва, если сварной шов вместе с прижатой к нему магнитной лентой намагнитить под углом к продольной оси, а считывание записи производить вдоль ленты:

- а) да;
- б) нет;
- в) помехи уменьшатся;
- г) помехи увеличатся.

59. При намагничивании перпендикулярно направлению распространения дефекта на магнитной ленте образуется магнитный отпечаток, протяженность которого:

- а) больше длины дефекта;
- б) меньше длины дефекта;
- в) равна длине дефекта;
- г) не зависит от длины дефекта.

60. Какие дефекты лучше обнаруживаются при импульсном намагничивании объекта контроля:

- а) внутренние дефекты;
- б) наружные дефекты;
- в) дефекты внутренней поверхности;
- г) дефекты обнаруживаются одинаково, независимо от глубины залегания.

61. При каком значении напряженности поля, действующего на ферромагнетик, магнитная проницаемость μ достигает наибольшего значения:

- а) $H = H_c$;
- б) $H = 2H_c$;

- в) $H = (4...5) H_c$;
- г) $H = (1,2...1,4) H_c$.

62. Что означает число 35 в обозначении типа магнитной ленты И4701-35:

- а) коэрцитивная сила;
- б) индукция насыщения;
- в) ширина ленты (приблизительная);
- г) толщина слоя магнитной ленты.

63. Какой тип ленты предназначен для использования в магнитографической дефектоскопии:

- а) В3806-35;
- б) А2106-6Б;
- в) Т2401-8П;
- г) И4701-35.

64. Как влияет увеличение зазора между полюсами намагничивающего устройства и объектом контроля на значение индукции в контролируемых сечениях:

- а) индукция не зависит от величины зазора;
- б) индукция возрастает с увеличением зазора;
- в) индукция убывает с увеличением зазора;
- г) индукция возрастает, а затем убывает.

65. Что такое магнитный гистерезис:

- а) свойство ферромагнетика намагничиваться;
- б) зависимость магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния;
- в) свойство ферромагнетика намагничиваться до насыщения;
- г) свойство намагниченного ферромагнетика размагничиваться.

66. Что происходит в ферромагнетике при его намагничивании в области начального (обратимого) намагничивания:

- а) ничего не происходит;
- б) изменяется направление вектора намагниченности M ;
- в) ступенчатое изменение намагниченности;
- г) упругое смещение границ доменов.

67. Как изменится намагниченность M ферромагнетика в области начального (обратимого) намагничивания:

- а) $M = \chi_a H$;
- б) $M = \chi_a H^2$;
- в) $M = \frac{1}{2} \chi_a H^2$;
- г) $M = 2\chi_a H^2$.

68. Что происходит в домене при абсолютном нуле:

- а) число параллельно и антипараллельно ориентированных спинов становится одинаковым;
- б) спиновые моменты станут равными нулю;
- в) все спины будут ориентированы вдоль направления легкого намагничивания;
- г) домен будет размагничен.

69. По какой формуле определяется истинная напряженность магнитного поля в образце конечных размеров при полюсном намагничивании:

- а) $H_i = H_0 N_p M$;
- б) $H_i = H_0 + N_p M$;
- в) $H_i = H_0 - N_p M$;
- г) $H_i = H_0$.

70. Каковы виды намагничивания при МПД:

- а) постоянным, переменным и импульсным полем;
- б) в приложенном поле, в остаточном поле;
- в) путем пропускания тока по изделию, по части изделия;
- г) циркулярное, полюсное, комбинированное, во вращающемся магнитном поле.

71. На каком законе основаны индукционные преобразователи:

- а) на законе Гаусса;
- б) на эффекте Холла;
- в) на законе Кулона;
- г) на законе электромагнитной индукции.

72. Как называются неподвижные индукционные преобразователи:

- а) неподвижные;
- б) индифферентные;

- в) спокойные;
- г) пассивные.

73. Для чего в индукционных преобразователях применяют ферромагнитные сердечники:

- а) для повышения чувствительности;
- б) для удобства нанесения обмотки;
- в) для унификации преобразователей;
- г) для получения нелинейной характеристики.

74. Какой недостаток имеют индукционные преобразователи с сердечником:

- а) сужается область применения;
- б) неудобны в применении;
- в) их характеристика в области больших напряженностей полей становится нелинейной;
- г) снижается чувствительность.

75. Когда применяют комбинированный вид намагничивания:

- а) при контроле способом приложенного поля и остаточной намагниченности;
- б) при контроле способом остаточной намагниченности;
- в) при контроле способом приложенного поля;
- г) применять не рекомендуется.

76. Как называют подвижные индукционные преобразователи:

- а) активные;
- б) подвижные;
- в) пассивные;
- г) перемещающиеся.

77. Назовите несколько активных индукционных преобразователей:

- а) преобразователь Холла;
- б) магнитная лента;
- в) магниторезистивный преобразователь;
- г) вибрирующий, сканирующий, вращающийся преобразователь.

78. Зависит ли ЭДС индукционного преобразователя от напряженности поля контролируемого параметра:

- а) да;
- б) нет;

- в) зависит только от градиента напряженности поля;
- г) зависит от квадрата градиента напряженности поля.

79. Какие сердечники содержат феррозонд:

- а) диэлектрические;
- б) ферритовые;
- в) пермаллоевые;
- г) полупроводниковые.

80. Подповерхностные дефекты можно обнаружить с помощью переменного поля, если амплитуду увеличить в n раз по сравнению с амплитудой поля, определенной для обнаружения подповерхностных дефектов, где:

- а) $n = 1,5 \dots 2,5$;
- б) $n = 2 \dots 3$;
- в) $n = 1,5 \dots 2$;
- г) $n = 1,41$.

81. Чем отличается феррозонд-градиентометр от полемера:

- а) первичная обмотка полемера сделана вторичной;
- б) отличается только первичная обмотка;
- в) отличается только вторичная обмотка;
- г) сходства с феррозондом-полемером нет.

82. Какому условному уровню чувствительности МПД соответствуют дефекты сплошности с минимальным раскрытием 10 мкм при минимальной их протяженности 0,5 мм и глубине 100 мкм:

- а) А;
- б) Б;
- в) В;
- г) Г.

83. Как направлены переменные магнитные поля, создаваемые первичной обмоткой феррозонда-градиентометра:

- а) встречно;
- б) согласно;
- в) перпендикулярно;
- г) под углом друг к другу.

84. Поле какого дефекта убывает быстрее по мере удаления от поверхности объекта контроля:

- а) наружного;
- б) внутреннего;
- в) одинаково наружного и внутреннего;
- г) вначале наружного, а затем внутреннего.

85. Под действием каких сил уединенные частички магнитного порошка скапливаются над дефектом при магнитопорошковом контроле:

- а) пондеромоторной силы;
- б) силы тяжести;
- в) коэрцитивной силы;
- г) равнодействующей пондеромоторной силы, сил трения и вязкости, тяжести и архимедовой силы.

86. За счет чего в сердечниках феррозонда снижают потери от гистерезиса:

- а) за счет увеличения числа витков первичной обмотки;
- б) за счет уменьшения размагничивающего фактора сердечников и увеличения магнитной проницаемости материала;
- в) за счет специальной навивки обмотки;
- г) за счет оптимизации режимов работы.

87. Зависит ли ЭДС индукционного преобразователя от скорости v изменения напряженности поля контролируемого параметра:

- а) нет;
- б) зависит;
- в) зависит не всегда;
- г) зависит от v^3 .

88. Из какого выражения определяется чувствительность индукционного преобразователя-полемера:

- а) $\mu_r \omega H_x$;
- б) $\mu_0 \omega W S H_x$;
- в) $\mu_r \omega W S$;
- г) $\mu_0 \omega W S$.

89. Какую суспензию не допускается применять при контроле способом приложенного поля с циркулярным намагничиванием:

- а) масляную;
- б) водную и на основе масла РМ;

- в) водную;
- г) керосиновую и керосино-масляную.

90. Каким током питается первичная обмотка феррозонда:

- а) переменным;
- б) постоянным;
- в) импульсным;
- г) первичная обмотка является индикаторной.

91. Дефектоскопы, в которых намагничивание изделий осуществляется переменным, выпрямленным или импульсным токами, при контроле способом остаточной намагниченности должны обеспечивать выключение тока в момент времени, при котором значение остаточной индукции составляет не менее:

- а) $0,5 B_{r \max}$;
- б) $0,6 B_{r \max}$;
- в) $0,9 B_{r \max}$;
- г) $B_{r \max}$.

92. Для чего применяют магнитные пасты:

- а) для контроля вертикальных поверхностей объектов;
- б) для контроля объектов сложной формы;
- в) для контроля объектов в труднодоступных местах;
- г) для приготовления магнитной суспензии.

93. Что является выходной величиной индукционного преобразователя:

- а) абсолютная величина контролируемого параметра;
- б) относительная величина контролируемого параметра;
- в) напряженность поля, обусловленная контролируемым параметром;
- г) ЭДС измерительной обмотки.

94. Магнитогумированную пасту применяют для контроля:

- а) объектов в любом пространственном положении;
- б) вертикальных стенок;
- в) наклонных стенок;
- г) внутренних стенок полостей диаметром менее 20 мм при отношении глубины к диаметру 1/10.

95. От чего зависит ЭДС измерительной обмотки феррозонда-полемера:

- а) от градиента напряженности измеряемого поля;

- б) от скорости изменения градиента напряженности измеряемого поля;
- в) от скорости изменения напряженности поля;
- г) от напряженности измеряемого поля.

96. Как направлены силовые линии магнитного поля внутри соленоида, запитанного постоянным током:

- а) от северного полюса к южному;
- б) от южного полюса к северному;
- в) поперек продольной оси;
- г) поле отсутствует.

97. Когда уменьшается размагничивающий фактор сердечника феррозонда:

- а) с увеличением длины и уменьшением диаметра сердечника;
- б) с увеличением длины и увеличением диаметра сердечника;
- в) с уменьшением длины и увеличением диаметра сердечника;
- г) с уменьшением длины и уменьшением диаметра сердечника.

98. Каково математическое выражение для ЭДС индукционного преобразователя-полемера при воздействии гармонического поля $H_x = H_{mx} \sin \omega t$:

- а) $\mu_0 \omega W S H_{mx} \cos \omega t$;
- б) $\mu_r \omega W S H_{mx} \cos \omega t$;
- в) $\mu_r \omega W S H_{mx} \sin \omega t$;
- г) $\mu_r \omega H_{mx} \sin \omega t$.

99. Как направлены силовые линии магнитного поля внутри постоянного магнита:

- а) от N к S ;
- б) от S к N ;
- в) вдоль нейтральной плоскости;
- г) поле отсутствует.

100. Как направлены переменные магнитные поля, создаваемые первичной обмоткой феррозонда-полемера:

- а) встречно;
- б) согласно;
- в) перпендикулярно;
- г) под углом друг к другу.

10.2. Специальный экзамен (магнитопорошковый метод)

1. Какому условному уровню чувствительности МПД соответствуют дефекты сплошности с минимальным раскрытием 2,0 мкм:

- а) г;
- б) в;
- в) б;
- г) а.

2. Каково назначение магнитных паст при МПД:

- а) для контроля объектов в труднодоступных местах;
- б) для контроля вертикальных поверхностей объектов;
- в) для контроля объектов сложной формы;
- г) для приготовления магнитных суспензий.

3. Как влияет магнитная проницаемость объекта, намагничиваемого переменным полем, на глубину намагничиваемого слоя:

- а) не влияет;
- б) уменьшается с увеличением μ ;
- в) слабо влияет;
- г) увеличивается с увеличением μ .

4. С какой целью в магнитную суспензию добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ):

- а) чтобы магнитные частицы не образовывали конгломераты и длинные цепочки;
- б) чтобы улучшить смачиваемость суспензии;
- в) чтобы увеличить электропроводность суспензии;
- г) чтобы уменьшить электропроводность суспензии.

5. Как влияет длина цепочек магнитных частиц на выявляемость дефектов:

- а) над трещинами накапливаются короткие цепочки;
- б) над трещинами накапливаются длинные цепочки;
- в) над трещинами накапливаются цепочки средней длины;
- г) степень накопления порошка над трещинами не зависит от длины цепочки.

6. Контролю подлежит деталь с $\mu_{r \max} > 40$. Можно ли при МПД применять методику согласно ГОСТ 21105–87:

- а) нет;
- б) да;
- в) можно, но только если $H_c > 1000$ А/м;
- г) можно, но только если $H_c < 1000$ А/м.

7. Толщина немагнитного покрытия на поверхности объекта контроля 15 мкм. Можно ли при МПД его не учитывать:

- а) нет;
- б) нет, если $H_c > 1000$ А/м;
- в) да;
- г) да, если $H_c < 1000$ А/м.

8. Для чего применяют магнитогумированную пасту:

- а) для приготовления магнитных суспензий;
- б) для контроля вертикальных стенок объектов;
- в) для контроля объектов в любом пространственном положении;
- г) для контроля внутренних стенок полостей диаметром менее 20 мм при отношении глубины к диаметру 1/10.

9. Для комбинированного намагничивания объекта контроля при МПД применяют переменные токи. Каково требуемое соотношение между напряженностями полей, создаваемых ими:

- а) $H_1 = 1,4 H_2$;
- б) $H_1 = H_2$;
- в) $H_1 = (2...3) H_2$;
- г) $H_1 = 0,5 H_2$.

10. Каково требуемое значение намагничивающего тока при циркулярном намагничивании цилиндра диаметром 20 мм, если $H_{mp} = 50$ А/см:

- а) 100 А;
- б) 200 А;
- в) 300 А;
- г) 400 А.

11. Каково требуемое значение намагничивающего тока при циркулярном намагничивании пластины сечением $20 \times 1,5$ мм, если $H_{mp} = 50$ А/см:

- а) 400 А;
- б) 300 А;
- в) 200 А;
- г) 100 А.

12. При каком угле между вектором напряженности магнитного поля и направлением распространения дефектов дефекты обнаруживаются лучше всего:

- а) 0° ;
- б) 45° ;
- в) 90° ;
- г) $20...30^\circ$.

13. Можно ли применять комбинированный вид намагничивания при контроле способом остаточной намагниченности:

- а) можно;
- б) нет;
- в) можно, если применяют токи одного рода;
- г) можно, если применяют токи разного рода.

14. Можно ли при контроле способом приложенного поля с циркулярным намагничиванием применять керосиновую и керосино-масляную суспензии:

- а) нет;
- б) можно;
- в) можно, если $H_c > 1000$ А/м;
- г) можно, если ток переменный.

15. Предельно допустимым для человека является постоянное магнитное поле напряженностью:

- а) 1000 А/м;
- б) 1400 А/м;
- в) 8000 А/м;
- г) 2000 А/м.

16. Намагничивание объекта осуществляют пропусканием тока по проводнику, помещенному в сквозное отверстие в объекте. Как называется вид намагничивания:

- а) полюсное;
- б) циркулярное;
- в) комбинированное;
- г) во вращающемся магнитном поле.

17. Можно ли, согласно ГОСТ 21105–87, деталь контролировать способом остаточной намагниченности, если $B_r < 0,5$ Тл:

- а) да;
- б) нет;
- в) да, если $H_c > 1000$ А/м;
- г) да, если $H_c < 1000$ А/м.

18. Почему при МПД детали с толщиной стенки более 20 мм не рекомендуют намагничивать постоянным полем:

- а) не достигается требуемый уровень чувствительности;
- б) что сэкономить электроэнергию;
- в) их трудно впоследствии размагнитить;
- г) трудно создать поле требуемой напряженности.

19. Каковы основные виды намагничивания при МПД согласно ГОСТ 21105–87:

- а) в приложенном поле, в остаточном поле;
- б) циркулярное, полюсное, комбинированное, во вращающемся магнитном поле;
- в) постоянным, переменным и импульсным полем;
- г) путем пропускания тока по изделию, по части изделия.

20. Можно ли, согласно ГОСТ 21105–87, деталь контролировать способом остаточной намагниченности, если $H_c = 500$ А/м:

- а) да;
- б) да, если $B_r > 0,5$ Тл;
- в) да, если $B_r < 0,5$ Тл;
- г) нет.

21. Как зависит глубина размагниченого слоя металла от магнитной проницаемости материала:

- а) не зависит;
- б) слабо зависит;

- в) увеличивается с увеличением μ ;
- г) уменьшается с увеличением μ .

22. Сколько условных уровней чувствительности принято при МПД:

- а) 1;
- б) 2;
- в) 3;
- г) 4.

23. Какой максимальный промежуток времени между намагничиванием объекта контроля и нанесением дефектоскопического материала при контроле СОН:

- а) не более суток;
- б) не более часа;
- в) не более 10 мин;
- г) не более 1 мин.

24. Можно ли обнаружить дефект сплошности МПД, если угол между вектором напряженности поля и направлением распространения дефекта равен 0° :

- а) нет;
- б) можно;
- в) можно, если применить переменное намагничивающее поле;
- г) можно, если применить постоянное намагничивающее поле.

25. Если намагничивание при МПД производят в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то при одном из них увеличивают требуемое значение напряженности поля в n раз, где:

- а) $n = 2$;
- б) $n = 1,5$;
- в) $n = 1,41$;
- г) $n = 1,25$.

26. При намагничивании объекта в двух взаимно перпендикулярных направлениях полем напряженности H хуже всего обнаруживаются дефекты, ориентированные под каким углом α к направлению намагничивания:

- а) $\alpha = 0^\circ$;
- б) $\alpha = 45^\circ$;

- в) $\alpha = 30^\circ$;
- г) $\alpha = 10^\circ$.

27. Какие размеры чаще всего имеют частицы магнитного порошка при МПД объектов с нормальной шероховатостью поверхности:

- а) 1...60 мкм;
- б) 0,1...0,5 мкм;
- в) 0,25...0,5 мкм;
- г) 60...80 мкм.

28. Какой вид намагничивания применяют, если разноориентированные дефекты обнаруживают при одной операции намагничивания:

- а) циркулярный;
- б) полюсный;
- в) комбинированный;
- г) комбинированный или во вращающемся магнитном поле.

29. Какова основная причина, по которой применяют импульсный ток при намагничивании изделий путем пропускания тока:

- а) чтобы повысить чувствительность метода;
- б) чтобы повысить производительность контроля;
- в) чтобы исключить прижоги на изделия;
- г) чтобы снизить затраты электроэнергии.

30. Почему при импульсном намагничивании используют 3–5 импульсов, а не один:

- а) чтобы магнитный порошок успел осесть;
- б) чтобы достичь стабильного значения дифференциальной магнитной проницаемости;
- в) чтобы легче было затем размагнитить объект контроля;
- г) чтобы повысить подвижность ферромагнитных частиц.

31. При какой шероховатости поверхности достигается условный уровень чувствительности B :

- а) $Ra \leq 10$ мкм;
- б) $Ra \leq 25$ мкм;
- в) $Ra \leq 40$ мкм;
- г) $Ra \leq 20$ мкм.

32. При какой шероховатости поверхности объекта контроля достигается условный уровень чувствительности А:

- а) $Ra \leq 5$ мкм;
- б) $Ra \geq 10$ мкм;
- в) $Ra \geq 2,5$ мкм;
- г) $Ra \leq 2,5$ мкм.

33. По какой формуле определяют намагничивающий ток при циркулярном намагничивании объектов прямоугольного сечения при $\frac{a}{b} < 10$:

- а) $3dH$;
- б) $2dH$;
- в) $2H(a + b)$;
- г) $1,5H \sqrt{a^2 + b^2}$.

34. При какой шероховатости поверхности объекта контроля достигается условный уровень чувствительности В:

- а) $Ra \leq 10$ мкм;
- б) $Ra \geq 10$ мкм;
- в) $Ra \leq 5$ мкм;
- г) $Ra \leq 20$ мкм.

35. Что применяют для более равномерного намагничивания полых деталей (намагничивание осуществляется пропусканием тока через стержень, проходящий внутри изделия):

- а) импульсный намагничивающий ток;
- б) переменный намагничивающий ток;
- в) диэлектрические втулки, центрирующие стержень, по которому пропускают намагничивающий ток;
- г) постоянный намагничивающий ток.

36. Какова основная причина, по которой иногда при полюсном намагничивании детали выстраивают в цепочку, применяют удлинительные наконечники, используют переменный намагничивающий ток:

- а) для удобства контроля;
- б) чтобы сравнить результаты контроля;
- в) чтобы повысить производительность контроля;
- г) чтобы уменьшить размагничивающий фактор объекта.

37. Каких максимальных размеров могут достигать частички порошка при контроле объектов с грубой поверхностью:

- а) 5 мм;
- б) 2 мм;
- в) 0,3 мм;
- г) 100 мкм.

38. Как намагничивают мелкие детали сложной формы:

- а) используют постоянный намагничивающий ток;
- б) применяют комбинированное намагничивание;
- в) применяют импульсный намагничивающий ток;
- г) при помощи соленоида вращающегося поля.

39. По какой формуле определяют намагничивающий ток при циркулярном намагничивании крупногабаритных изделий (l – расстояние между электродами или длина контролируемого участка, c – ширина контролируемого участка, H – требуемая напряженность поля):

- а) $I = 1,5H\sqrt{l^2 + c^2}$;
- б) $I = 3Hcl$;
- в) $I = 2H(l + c)$;
- г) $I = H(l + c)$.

40. Как намагничивают при МПД крупные детали сложной формы:

- а) перемещением постоянного магнита по объекту контроля;
- б) применяют многократное намагничивание в дефектоскопах большой мощности или намагничивают по частям с помощью выносных электромагнитов;
- в) при помощи соленоида вращающегося магнитного поля;
- г) применяют комбинированное намагничивание.

41. Чем обусловлены трудности контроля мелких деталей сложной формы:

- а) появлением на выступах и в местах резких изменений сечений полюсов, оказывающих размагничивающее действие в контролируемых зонах;
- б) сложностью размагничивания объекта контроля;
- в) трудностью нанесения суспензии;
- г) трудностью удаления остатков порошка после контроля.

42. В чем сложность МПД деталей с резьбовой поверхностью:

- а) опасность повреждения резьбы при контроле;
- б) трудность удаления остатков порошка;

- в) трудность нанесения суспензии;
- г) образование полюсности при продольном намагничивании.

43. Как контролируют детали с резьбовой поверхностью:

- а) используют керосиновую суспензию с пониженной концентрацией магнитного порошка и добавлением антикоагулянта;
- б) применяют масляную суспензию;
- в) применяют водную суспензию;
- г) применяют суспензию с повышенным содержанием порошка.

44. Как намагничивают пружины при МПД:

- а) при помощи соленоида вращающегося поля;
- б) применяют циркулярное намагничивание, пропуская ток через стержень, проходящий внутри пружины, а затем по проволоке, из которой изготовлена пружина;
- в) применяют комбинированный вид намагничивания;
- г) используют полюсное намагничивание.

45. Как контролируют детали вида шайб, если внутренний и наружный диаметры близки:

- а) ток при циркулярном намагничивании определяют из расчета среднего диаметра;
- б) ток при циркулярном намагничивании берут из расчета максимального диаметра;
- в) ток при циркулярном намагничивании определяют для минимального диаметра;
- г) ток определяют для эквивалентного диаметра.

46. Как контролируют детали вида шайб, если внутренний и наружный диаметры сильно отличаются:

- а) контроль следует вести по кольцевым зонам, рассчитывая ток при циркулярном намагничивании для каждой зоны отдельно;
- б) контроль производят один раз, а ток при циркулярном намагничивании определяют, ориентируясь на наибольший диаметр;
- в) контроль производят один раз, а ток при циркулярном намагничивании определяют, ориентируясь на наименьший диаметр;
- г) контроль производят один раз, а ток при циркулярном намагничивании определяют, ориентируясь на средний диаметр.

47. Как намагничивают полые детали при их МПД на наличие продольных дефектов наружной и внутренней поверхности:

- а) ток пропускают через стержень, проходящей внутри детали;
- б) ток пропускают через сечение трубки;
- в) применяют полюсное намагничивание электромагнитом;
- г) перемещением постоянного магнита по объекту контроля.

48. Чем обусловлены трудности обнаружения дефектов МПД в соединениях, выполненных ручной дуговой сваркой:

- а) необходимостью учета применяемых сварочных материалов;
- б) трудностью применения намагничивающих устройств;
- в) трудностью создания требуемого режима намагничивания;
- г) большой шероховатостью поверхности, оседанием порошка по чешуйкам шва, на границе «металл – шов», зоне термического влияния.

49. Как следует контролировать сварные соединения:

- а) шов необходимо зачистить; если наблюдается плотное оседание порошка и в зоне термического влияния, то и это место необходимо зачистить, проверить вторично, а в случае сомнения применить капиллярный контроль;
- б) сварные соединения не подлежат контролю МПД;
- в) для контроля необходимо применить суспензию с повышенным содержанием магнитного порошка;
- г) следует применять порошок различной дисперсности.

50. Чем обусловлены трудности контроля литья:

- а) неудобством выполнения контрольных операций;
- б) большой шероховатостью поверхности, сложной формой детали, наличием неслитин, расположенных под углом менее 20° к поверхности, наличием аустенита в некоторых сплавах;
- в) трудностью размагничивания таких объектов;
- г) характерным цветом поверхности объекта контроля.

51. Как уменьшить фон на поверхности при контроле литых деталей:

- а) используют суспензию с пониженным содержанием порошка;
- б) используют суспензию с повышенным содержанием порошка;
- в) увеличивают режим намагничивания;
- г) применяют разномодульный порошок.

52. Как выявить плены и включения в литых деталях:

- а) для этого нужно предварительно произвести механическую обработку;

- б) следует применить переменный намагничивающий ток;
- в) следует применить постоянный намагничивающий ток;
- г) следует применить импульсное намагничивание.

53. Какой должна быть концентрация магнитного порошка в суспензии (не люминесцентного) при контроле резьб:

- а) 25 г/л;
- б) 20 г/л;
- в) 15,5 г/л;
- г) 5 г/л.

54. Где наиболее интенсивно накапливаются длинные цепочки магнитных частиц:

- а) над трещинами;
- б) над рисками, наклепом, подрезами;
- в) длинные цепочки всегда находятся в суспензии во взвешенном состоянии;
- г) равномерно распределяются по поверхности объекта контроля.

55. Что влияет на интенсивность магнитной коагуляции:

- а) автокоагуляция;
- б) вязкость дисперсной среды, концентрация и дисперсность магнитного порошка, его магнитные характеристики;
- в) напряженность и градиент поля, продолжительность его действия;
- г) все ответы правильные.

56. Под действием каких сил уединенные частицы магнитного порошка скапливаются над дефектами:

- а) сил диффузии;
- б) капиллярных сил;
- в) пондеромоторной силы;
- г) равнодействующей пондеромоторной силы, сил трения и вязкости, тяжести и архимедовой силы.

57. Подповерхностные дефекты можно обнаружить с помощью переменного поля, если амплитуду увеличить в n раз по сравнению с амплитудой поля, определенной для обнаружения поверхностных дефектов, где:

- а) $n = 2...3$;
- б) $n = 1,4$;
- в) $n = 1,5...2,5$;
- г) $n = 3,14$.

58. С какой чувствительностью могут контролироваться сварные соединения с выпуклостями шва, выполненные автоматической дуговой сваркой:

- а) уровень чувствительности не зависит от наличия шва;
- б) с чувствительностью, не превышающей уровень В;
- в) с чувствительностью, не превышающей уровень Б;
- г) с уровнем чувствительности А.

59. С какой чувствительностью могут контролироваться сварные соединения с выпуклостями шва, выполненные ручной дуговой сваркой:

- а) уровень чувствительности не зависит от наличия шва;
- б) с уровнем чувствительности А;
- в) с чувствительностью, не превышающей уровень Б;
- г) с чувствительностью, не превышающей уровень В.

60. Какие особенности контроля сварных соединений со снятой выпуклостью шва:

- а) контролируют с чувствительностью, не превышающей уровень В;
- б) контролируют с чувствительностью, не превышающей уровень Б;
- в) контролируют, как и несварные объекты;
- г) контролируют с уровнем чувствительности А.

10.3. Специальный экзамен (феррозондовый метод)

1. Каким способом проводят феррозондовый контроль деталей вагонов:

- а) приложенного поля и способом остаточной намагниченности;
- б) приложенного поля;
- в) остаточной намагниченности;
- г) для проведения феррозондового контроля объект намагничивать не нужно.

2. Вследствие чего обнаруживаются дефекты сплошности при феррозондовом контроле:

- а) вследствие притяжения феррозонда полем дефекта;
- б) вследствие выявления пространственных искажений магнитного поля над дефектом;
- в) вследствие действия на феррозонд силы Лоренца;
- г) все ответы правильные.

3. Дефекты какого типа позволяет обнаруживать феррозондовый метод контроля:

- а) только поверхностные;
- б) только подповерхностные;
- в) только поверхностные и подповерхностные;
- г) наружные и внутренние.

4. Дефекты какого вида позволяет обнаруживать феррозондовый метод контроля:

- а) волосовины, трещины, раковины, закаты и т. д.;
- б) только трещины;
- в) только поры;
- г) только трещины раскрытием более 0,3 мм.

5. Применяют ли феррозондовый метод контроля для обнаружения дефектов сварки:

- а) нет;
- б) только швов со снятой выпуклостью шва;
- в) да;
- г) только сварки трением.

6. Сколько уровней условной чувствительности феррозондового метода устанавливает стандарт:

- а) три;
- б) один;
- в) одиннадцать;
- г) при контроле условные уровни чувствительности не устанавливаются.

7. Как подразделяют феррозонды, применяемые для контроля деталей вагонов:

- а) феррозонды-полемеры и феррозонды-градиентометры;
- б) феррозонды с одной, двумя и тремя возбуждающими обмотками;
- в) феррозонды без сердечников и с сердечниками;
- г) все ответы правильные.

8. В каких единицах измеряется градиент напряженности магнитного поля:

- А) А;
- Б) А/м;
- В) А/м²;
- Г) В/м.

9. Какое преобразование осуществляет феррозонд-градиентометр:

- а) градиент напряженности магнитного поля преобразуется в электрический сигнал;
- б) напряженность магнитного поля преобразуется в электрический сигнал;
- в) напряженность электрического поля преобразуется в электрический сигнал;
- г) градиент магнитного напряжения преобразуется в электрический сигнал.

10. Какое преобразование осуществляет феррозонд-полемер:

- а) напряженность магнитного поля преобразуется в электрический сигнал;
- б) градиент напряженности магнитного поля преобразуется в электрический сигнал;
- в) напряженность электрического поля преобразуется в электрический сигнал;
- г) градиент магнитного напряжения преобразуется в электрический сигнал.

11. Почему при дефектоскопии ферромагнитных объектов чаще используют феррозонды-градиентометры:

- а) из-за простоты их конструкции;
- б) из-за дешевизны приборов;
- в) вследствие более высокой чувствительности контроля, т. к. в зоне дефекта наблюдается большой градиент напряженности магнитного поля, а в зоне структурных, химических и др. неоднородностей, создающих помехи, градиент напряженности магнитного поля невелик;
- г) вследствие более простой методики контроля.

12. В зависимости от каких параметров устанавливают условные уровни чувствительности феррозондового контроля:

- а) в зависимости от ширины, глубины, максимальной глубины залегания дефекта при минимальной длине выявляемого дефекта 2 мм;
- б) в зависимости от отношения наибольшей допускаемой глубины дефекта к максимальной глубине его залегания;
- в) в зависимости от отношения наибольшей допускаемой глубины дефекта к максимальной глубине его залегания;
- г) в зависимости от допустимого количества дефектов на 1 см².

13. В зависимости от каких факторов выбирают способ феррозондового контроля:

- а) в зависимости от глубины залегания дефектов;
- б) в зависимости от вида дефектов;
- в) в зависимости от типа дефектов;
- г) в зависимости от магнитных свойств материала, размеров и геометрии контролируемой детали.

14. Достаточно ли одна настройка дефектоскопа (перед началом контроля) для обеспечения высокой достоверности контроля деталей сложной формы:

- а) да;
- б) нет, т. к. уровень помех в разных местах обычно различается значительно;
- в) настройку дефектоскопа с фиксированным порогом вообще не производят;
- г) нужно выполнить одну настройку перед началом контроля и одну – перед его окончанием.

15. Что входит в состав феррозондовых установок:

- а) два дефектоскопа, намагничивающие устройства и стандартные образцы предприятия;
- б) объект контроля, намагничивающее устройство и дефектоскоп;
- в) объект контроля и намагничивающее устройство;
- г) объект контроля, дефектоскоп, намагничивающее устройство и стандартный образец предприятия.

16. Что входит в состав средств феррозондового контроля:

- а) феррозондовые установки и дополнительные устройства;
- б) феррозондовые дефектоскопы и стандартные образцы предприятий;
- в) намагничивающие устройства и стандартные образцы предприятий;
- г) феррозондовые дефектоскопы и намагничивающие устройства.

17. Что входит в состав дополнительных устройств для феррозондового контроля:

- а) намагничивающие устройства;
- б) измерители напряженности магнитного поля;
- в) измеритель напряженности поля, зарядная станция, компьютер, преобразователь интерфейса;
- г) намагничивающие устройства и измерители напряженности поля.

18. Что включает подготовка к проведению контроля:

- а) подготовку объекта контроля;
- б) подготовку намагничивающих устройств, дефектоскопа, объекта контроля;
- в) подготовку намагничивающих устройств и дефектоскопа;
- г) подготовку намагничивающих устройств.

19. Что предусматривает подготовка намагничивающих устройств к проведению контроля:

- а) проверку работоспособности;
- б) внешний осмотр;
- в) внешний осмотр и проверку работоспособности;
- г) настройку намагничивающих устройств.

20. Что проверяют при внешнем осмотре намагничивающих устройств на основе электромагнитов:

- а) напряженность поля в межполюсном пространстве;
- б) наличие всех элементов намагничивающего устройства;
- в) целостность электрической цепи;
- г) целостность корпуса блока питания и других узлов, надежность; соединения шнура питания и соединительных кабелей, наличие заземления; исправность переключателей, тумблеров блока питания и других узлов; исправность подвижных узлов.

21. Что проверяют при внешнем осмотре приставного намагничивающего устройства с постоянными магнитами:

- а) целостность магнита;
- б) наличие магнита;
- в) отсутствие механических повреждений, надежность крепления гибкого магнитопровода к полюсам, надежность цанговых зажимов;
- г) магнитные характеристики магнита.

22. Как проверяют работоспособность намагничивающих устройств:

- а) определяют силу их отрыва от ферромагнитной пластины;
- б) в соответствии с руководством по эксплуатации;
- в) определяют напряженность поля в межполюсном пространстве;
- г) определяют напряженность поля у полюса магнита.

23. Как зачищают детали для феррозондового контроля?

- а) с помощью волосяных или металлических щеток вручную или с помощью моечной машины;

- б) с помощью металлических скребков;
- в) подвергают дробеструйной обработке;
- г) с помощью ветоши.

24. С какой целью производят внешний осмотр деталей перед проведением феррозондового контроля:

- а) для выявления трещин, рисок, задиров, забоин, электроожогов и других видимых дефектов;
- б) с целью определения степени их износа;
- в) с целью определения наличия клейма завода-изготовителя;
- г) с целью определения возможности применения феррозондового контроля.

25. В каком объеме проводят внешний осмотр деталей и используют ли для этих целей оптические средства:

- а) осматривают только контролируемые поверхности;
- б) осмотру подвергают все поверхности контролируемых деталей, при необходимости используют лупу;
- в) осматривают наиболее нагруженные участки детали;
- г) осматривают только поверхности, контактирующие в процессе эксплуатации с другими объектами.

26. Как устраняют обнаруживаемые при внешнем осмотре деталей дефекты:

- а) такие дефекты не устраняют;
- б) устраняют воздушно-электрической строжкой, а затем заваривают и зачищают;
- в) устраняют только трещины;
- г) выявленные дефекты устраняют зачисткой или другими методами в соответствии с требованиями нормативных и технических документов.

27. Подлежат ли контролю детали с обнаруженными при внешнем осмотре недопустимыми дефектами:

- а) да;
- б) подлежат наименее ответственные;
- в) не подлежат;
- г) подлежат все, кроме колесных пар.

28. Как производят феррозондовый контроль детали, ремонтируемой сваркой:

- а) производят после окончания сварки и полного охлаждения детали;
- б) производят непосредственно после сварки;

в) производят после сварки и зачистки выпуклости шва заподлицо;
г) производят до сварки; если возникает необходимость контроля после сварки, то деталь следует охладить до температуры ниже 40° и вновь намагнитить перед проведением контроля.

29. Подлежат ли размагничиванию детали после феррозондового контроля:

а) подлежат полному размагничиванию и проверке качества размагничивания;
б) не подлежат;
в) размагничивают до показателя размагниченности $K \leq 5$;
г) размагничивают только колесные пары.

30. Как располагают феррозондовый преобразователь при контроле:

а) устанавливают параллельно контролируемой поверхности;
б) устанавливают перпендикулярно поверхности объекта на расстоянии 1...1,5 мм от нее;
в) устанавливают на поверхность детали и плавно перемещают так, чтобы его нормальная ось была перпендикулярна контролируемой поверхности, а продольная ось была направлена вдоль линии сканирования;
г) перемещают по поверхности объекта так, чтобы его продольная ось была перпендикулярна линии сканирования.

31. Как осуществляют сканирование поверхности детали феррозондовым преобразователем:

а) предварительно расчетным путем определяют оптимальное расстояние от преобразователя до объекта контроля, а в процессе перемещения преобразователем совершают вращательные движения;
б) продольную ось преобразователя ориентируют под углом 45° к поверхности;
в) сканирование осуществляют без перекосов, наклонов и отрывов феррозондовых преобразователей от поверхности детали;
г) феррозондовый преобразователь располагают на разном расстоянии от контролируемой поверхности.

32. Какова скорость сканирования поверхности детали феррозондовым преобразователем:

а) скорость сканирования составляет 20 мм/с;
б) скорость сканирования не должна превышать 8 мм/с;
в) скорость сканирования не должна превышать 8 см/с;
г) скорость сканирования может быть произвольной.

33. Как осуществляют сканирование сварного шва при феррозондовом контроле:

- а) осуществляют сканирование только околошовной зоны;
- б) производят сканирование только выпуклости шва;
- в) сварные соединения феррозондовым методом не контролируют;
- г) преобразователь перемещают вдоль продольной оси шва, при этом

нормальная ось преобразователя должна быть перпендикулярна, а продольная – параллельна продольной оси сварного шва. Сканирование околошовной зоны проводят не менее трех раз с шагом 3...5 мм, начиная с зоны сопряжения сварного шва с основным металлом. При сканировании усиления шва преобразователь располагают перпендикулярно касательной к выпуклости шва в зоне контроля.

34. Какие операции выполняют при срабатывании стрелочного или цифрового индикатора дефекта феррозондового дефектоскопа:

а) отмечают маркером место на поверхности объекта, где наблюдается максимальное показание индикатора;

б) совершают круговые движения преобразователя вокруг места с наибольшим показанием индикатора до исчезновения сигнала, а затем вычерчивают окружность с центром в точке, где показания индикатора максимальны;

в) место, где наблюдается максимум сигнала, не отмечают, а объект контроля бракуют;

г) находят и отмечают маркером точку поверхности, соответствующую максимуму показаний стрелочного или цифрового индикатора; выполняют параллельные перемещения преобразователя с шагом 5 мм слева и справа (выше и ниже) от отметки, фиксируя маркером точки поверхности, соответствующие максимумам показаний индикатора. Параллельные перемещения проводят до прекращения срабатывания индикаторов дефекта. Если отметки образуют линию, то осматривают отмеченный участок, чтобы убедиться в наличии трещины.

35. С помощью феррозондового дефектоскопа обнаружено место расположения дефекта в объекте контроля, однако трещина визуально не обнаруживается. Какие операции при этом следует выполнить:

а) объект контроля бракуют;

б) объект контролируют другим методом;

в) контроль повторяют после дробеструйной обработки поверхности;

г) отмеченный участок зачищают металлической щеткой, осматривают его с помощью лупы, используя переносную лампу; если при этом трещина не обнаруживается, то зачищают отмеченный участок шлифовальной машинкой

до удаления литейных неровностей, а затем сканируют зачищенный участок феррозондом; при исчезновении сигнала дефект исключают из рассмотрения.

36. Что предпринимают, если индикатор дефекта продолжает срабатывать при параллельных перемещениях феррозондового преобразователя с шагом 5 мм относительно точки поверхности, соответствующей максимуму показаний индикатора:

- а) оценивают направление и протяженность обнаруженного дефекта;
- б) объект бракуют;
- в) оценивают глубину дефекта;
- г) определяют глубину залегания дефекта.

37. Какие сигналы индикаторов дефектов исключают из рассмотрения:

- а) обусловленные подповерхностными дефектами;
- б) обусловленные локальными дефектами;
- в) не подтверждающиеся при параллельных перемещениях преобразователя; вызванные неоднородностью магнитного поля, обусловленной конструкцией детали (острые кромки, выступы, ступенчатое сечение и т. д.); в зоне магнитного пятна (на участках размещения полюсов магнитов); появляющиеся при пересечении границы зоны наклёпа;
- г) обусловленные недопустимыми дефектами.

11. ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭКЗАМЕНОВ

Ответы на вопросы общего и специальных экзаменов приведены в табл. 11.1–11.3.

Табл. 11.1. Ответы на вопросы общего экзамена

Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ
1	г	26	б	51	г	76	а
2	г	27	в	52	в	77	г
3	б	28	а	53	в	78	а
4	б	29	г	54	б	79	в
5	г	30	в	55	г	80	а
6	б	31	в	56	б	81	а
7	г	32	а	57	б	82	б
8	в	33	в	58	б	83	б
9	б	34	г	59	а	84	а
10	г	35	а, в, г	60	б	85	г
11	г	36	б, в	61	г	86	б
12	а	37	в	62	в	87	б
13	б	38	а, в, г	63	г	88	г
14	а	39	в	64	в	89	г
15	а	40	а	65	б	90	а
16	г	41	б	66	г	91	в
17	г	42	г	67	а	92	г
18	в	43	б	68	в	93	г
19	г	44	б	69	в	94	г
20	б	45	г	70	г	95	г
21	г	46	а	71	г	96	б
22	г	47	б	72	г	97	а
23	б	48	а	73	а	98	а
24	г	49	в	74	в	99	б
25	г	50	б	75	в	100	а

Табл. 11.2. Ответы на вопросы специального экзамена (магнитопорошковый метод)

Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ
1	г	16	б	31	а	46	а
2	г	17	б	32	г	47	а
3	б	18	в	33	в	48	г
4	а	19	б	34	а	49	а
5	а	20	г	35	в	50	б
6	б	21	г	36	г	51	а
7	в	22	в	37	б	52	а
8	г	23	б	38	в	53	г
9	б	24	а	39	а	54	б
10	в	25	в	40	б	55	г
11	в	26	б	41	а	56	г
12	в	27	а	42	г	57	в
13	б	28	г	43	а	58	в
14	а	29	в	44	б	59	г
15	в	30	б	45	б	60	в

Табл. 11.3. Ответы на вопросы специального экзамена (феррозондовый метод)

Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ	Номер вопроса	Ответ
1	а	11	в	21	в	31	в
2	б	12	а	22	б	32	в
3	г	13	г	23	а	33	г
4	а	14	б	24	а	34	г
5	в	15	а	25	б	35	г
6	в	16	а	26	г	36	а
7	а	17	в	27	в	37	в
8	в	18	б	28	г		
9	а	19	в	29	б		
10	а	20	г	30	в		

Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие электромагнитного, магнитного и электрического полей?
2. Назовите основные характеристики магнитного поля.
3. Как графически изображают магнитное поле?
4. Назовите известные Вам ферромагнетики.
5. Назовите основные свойства ферромагнетиков.
6. Чем обусловлены ферромагнитные свойства материалов?
7. В чем отличие диамагнитных и парамагнитных веществ от ферромагнитных?
8. Приведите основные физические величины, которые характеризуют ферромагнитные свойства вещества.
9. Что понимают под кривой первоначального намагничивания?
10. Почему кривая первоначального намагничивания не является технической характеристикой материала?
11. Дайте определение основной кривой намагничивания (индукции).
12. Почему для получения основной кривой намагничивания требуется многократное коммутирование намагничивающего тока?
13. Какая кривая намагничивания называется безгистерезисной?
14. Что такое абсолютная и относительная магнитная проницаемость?
15. Как построить график зависимости $\mu = f(H)$?
16. Докажите, что если провести касательную из начала координат к основной кривой намагничивания, то точке касания соответствует $\mu_r \max$.
17. Что такое дифференциальная магнитная проницаемость?
18. Чем качественно отличаются графики зависимости $B(H)$ от $M(H)$?
19. Что такое индукция технического насыщения?
20. Как влияет температура ферромагнетика на его магнитные свойства?
21. Что такое домен?
22. Что называют монокристаллом?
23. Одинаково ли намагничивается монокристалл железа вдоль различных кристаллографических направлений?
24. Что происходит в монокристалле железа при намагничивании его сильным полем вдоль направления легкого намагничивания?
25. Что происходит в монокристалле ферромагнетика, если намагничивающее поле направлено под углом к оси легкого намагничивания?
26. Что происходит в монокристалле ферромагнетика при температуре, равной абсолютному нулю?
27. Что произойдет в монокристалле ферромагнетика, если его температура возрастет от абсолютного нуля до точки Кюри?

28. Что происходит в ферромагнетике при намагничивании слабым магнитным полем?
29. Какие особенности намагничивания ферромагнетика в области Релея?
30. Что происходит в ферромагнетике при намагничивании в области наибольших магнитных проницаемостей?
31. Что происходит в ферромагнетике в области приближения к насыщению?
32. Что происходит в ферромагнетике при его намагничивании в области парапроцесса?
33. Что такое петля гистерезиса?
34. Какая петля гистерезиса называется предельной?
35. Что такое коэрцитивная сила по намагниченности?
36. Дайте определение коэрцитивной силы по индукции.
37. Какими свойствами обладают магнитомягкие и магнито-жесткие материалы?
38. Какие циклы гистерезиса называются частными?
39. При каком условии магнитные характеристики можно считать характеристиками вещества?
40. Как определяют размагничивающий фактор объектов, не имеющих формы эллипсоида вращения?
41. В чем отличие кривых намагничивания вещества и тела?
42. Ферромагнитный объект находится в вакууме. Вблизи некоторой точки A , находящейся на границе раздела сред, в вакууме вектор магнитной индукции равен B_0 и направлен под углом α к поверхности. При этом относительная магнитная проницаемость материала объекта равна μ_r . Чему равно значение магнитной индукции в ферромагнетике в окрестностях той же точки A ?
43. Какие требования предъявляют к кольцеобразным образцам, которые предназначены для определения основных магнитных параметров ферромагнитных материалов, а также кривой первоначального намагничивания, основной кривой намагничивания, петли гистерезиса?
44. Как наносят намагничивающую и измерительную обмотки на поверхность кольцеобразного образца при определении магнитных характеристик материалов?
45. Приведите принципиальную электрическую схему устройства для определения статических магнитных характеристик материала.
46. Как определяют кривую первоначального намагничивания материала?
47. Как определяют основную кривую намагничивания?
48. Опишите методику экспериментального определения петли гистерезиса.

49. Как измеряют коэрцитивную силу по намагниченности?

50. Охарактеризуйте качественно магнитное поле, создаваемое проводником с током.

51. К противоположным вершинам проволочного ромба подведены провода от источника постоянного тока. Какова напряженность поля в центре ромба, если сечение проволоки, из которой изготовлен ромб, одинаковое?

52. Два проводника расположены параллельно друг другу. Что произойдет с проводниками, если по ним пропустить ток в одном направлении, в противоположных направлениях?

53. Постоянный электрический ток I течет вдоль неферромагнитного проводника, который имеет форму цилиндра радиусом R . Определите напряженность поля на произвольном расстоянии X от центра проводника, считая, что ток равномерно распределен по сечению цилиндра.

54. Изменится ли напряженность магнитного поля в некоторой точке A вблизи проводника с током (см. предыдущий вопрос), если к проводнику приблизить массивный ферромагнитный объект с плоской поверхностью?

55. Постоянный ток течет вдоль тонкой оси ферромагнитного цилиндра радиусом R . Определите напряженность и индукцию магнитного поля внутри и вне цилиндра.

56. Постоянный ток I пропускают по сечению трубки с внутренним радиусом R_1 и наружным радиусом R_2 . Определите напряженность поля в произвольной точке в отверстии трубки, в металле и снаружи трубки, считая, что ток равномерно распределен по сечению трубки.

57. Как распределяется магнитная индукция внутри и вне сплошного цилиндрического проводника радиусом R с током? Электрический ток постоянный и распределен равномерно по сечению проводника.

58. Как изменяется магнитная индукция внутри и вне трубки, по которой протекает постоянный электрический ток?

59. Как изменяется магнитная индукция вне и внутри трубки, намагничиваемой проводником радиусом R с постоянным током, равномерно протекающим по всему сечению проводника?

60. По какой формуле определяется напряженность магнитного поля в центре витка с током?

61. Как определить магнитный момент контура с током?

62. Виток из эластичного тонкого провода имеет форму квадрата и располагается в горизонтальной плоскости. Что произойдет с витком, если по нему пропустить ток (проводники подключены к противоположным вершинам) и поместить в однородное магнитное поле, направленное вертикально вниз? Что изменится, если поменять направление тока или поля на противоположное?

63. Какая электрическая катушка называется бесконечно длинной?

64. Как вычислить напряженность магнитного поля в центре соленоида небольшой длины?

65. Как вычислить напряженность магнитного поля в произвольной точке оси соленоида небольшой длины?

66. Для наблюдателя, смотрящего на конец соленоида, ток в обмотке идет по направлению движения часовой стрелки. Каким полюсом (северным или южным) обращен к наблюдателю соленоид?

67. Что произойдет, если рядом с внутренним отверстием соленоида, по обмотке которого проходит постоянный или переменный ток, расположить небольшую ферромагнитную деталь?

68. Длинный изолированный медный провод сложили вдвое и им намотали катушку. Будет ли такая катушка при включении ее в электрическую цепь притягивать железные детали?

69. По каким формулам определяют напряженность магнитного поля и индукцию в ферромагнитном образце, который имеет форму тора с равномерно нанесенной обмоткой?

70. Охарактеризуйте постоянные магниты.

71. Что такое старение постоянного магнита?

72. Постоянный магнит имеет U-образную форму. Его полюсы соединили пластиной (якорем) из магнитомягкого материала. Докажите, что если увеличить зазор l_0 между пластиной и полюсами магнита, то это приведет к уменьшению магнитной индукции по сравнению с остаточной индукцией B_r в сердечнике, когда воздушный зазор между полюсами и якорем отсутствует.

73. По какой формуле определяют силу взаимодействия магнитных полюсов?

74. В каких единицах измеряется количество магнетизма (магнитная масса, магнитный заряд)?

75. Можно ли изготовить магнит с двумя одноименными полюсами?

76. Шар разрезали плоскостями, проходящими через его центр. Полученные объемные фигуры в виде пирамид, основаниями которых являются шаровые сегменты, по отдельности намагнитили так, что на шаровой поверхности оказался один полюс, а на вершине пирамиды – второй. Затем из этих намагниченных фрагментов составили шар. Будет ли в центре такого ферромагнитного шара находиться один полюс магнита, а на поверхности шара – второй?

77. Почему постоянные магниты рекомендуют хранить, складывая их в пары, разноименными полюсами друг к другу?

78. Имеются два одинаковых стержня. Известно, что один из них – постоянный магнит, а другой изготовлен из магнитного материала. Как

определить без вспомогательных средств (нити, магнитных опилок, магнитных измерительных приборов и т. д.), который из них магнит?

79. Почему стрелка компаса располагается в направлении с севера на юг?

80. Совпадают ли магнитные полюсы Земли с ее географическими полюсами?

81. Если магнитную стрелку прикрепить к пробке, плавающей в пластмассовом сосуде с водой, то под действием магнитного поля Земли стрелка повернется и расположится вдоль магнитного меридиана, однако перемещаться в южном или северном направлении не будет. Если же недалеко от стрелки расположить полюс полосового магнита, то под действием поля магнита стрелка не только повернется в сторону магнита, но и начнет к нему двигаться. Почему?

82. Полосовой магнит разрезали по нейтральному сечению, получив таким образом два одинаковых магнита. Будет ли сила притяжения одного такого магнита вдвое меньше силы притяжения исходного магнита?

83. Один из двух одинаковых ферромагнитных шариков поместили в слабое магнитное поле, а второй – в сильное. При этом во втором случае на него действовала меньшая сила, чем в первом. Объясните причину.

84. Вблизи двух полосовых магнитов, которые расположены в одной плоскости и образуют друг с другом угол α , находится ферромагнитный шарик. Если бы не было второго магнита, то первый действовал бы на шарик с силой F_1 , а если бы не было первого магнита, то второй действовал бы на шарик с силой F_2 . Будет ли сила F , с которой действуют на шарик оба магнита, равна геометрической сумме сил F_1 и F_2 ?

85. Два одинаковых ферромагнитных стержня расположены на широте Могилева в плоскости магнитного меридиана: один – горизонтально, другой – вертикально. Через некоторое время они намагничиваются под действием поля Земли. Какой из стержней намагнитится сильнее? На каком конце вертикального стержня возникнет северный полюс и на каком южный?

86. Как объяснить намагничивание ферромагнитных тел в магнитном поле?

87. Как используется способность ферромагнитных тел намагничиваться в магнитном поле Земли на производстве?

88. Назовите основные элементы характеристик постоянных магнитов.

89. Как осуществляют намагничивание и размагничивание постоянных магнитов?

90. Как устроены электромагниты?

91. С какой целью в электромагнитах применяют ферромагнитные сердечники?

92. По какой формуле рассчитывается отрывная сила электромагнита или постоянного магнита?

93. Определите отрывную силу электромагнита, у которого сечение внутреннего полюса S_1 , м², магнитная индукция B_1 , Тл, а сечение внешнего цилиндрического кольцевого полюса S_2 , м².

94. Сердечник электромагнита состоит из двух полюсов и перемычки, выполненных из магнитно-мягкого материала. На полюсах находятся одинаковые электрические катушки, по которым течет постоянный ток. Однако электромагнит не притягивает ферромагнитный стержень, касающийся обоих полюсов. Один же полюс магнита притягивает железные тела. В чем причина?

95. Можно ли электромагнитным краном переносить раскаленные ферромагнитные объекты?

96. Что такое дефект?

97. По каким признакам классифицируют дефекты?

98. Как классифицируют дефекты по степени их влияния на работоспособность изделия?

99. Как классифицируют дефекты по использованию правил, методов и средств контроля?

100. Как подразделяют дефекты по геометрическим признакам и массовости?

101. Как классифицируют дефекты по природе их возникновения?

102. Как подразделяют дефекты в зависимости от этапа их возникновения?

103. Какие могут быть дефекты формы сварных швов?

104. Приведите примеры наружных дефектов сварных соединений. Какие причины их возникновения?

105. Назовите внутренние дефекты сварных соединений и основные причины их образования.

106. Как влияют дефекты на работоспособность сварных соединений?

107. Назовите основные дефекты литья.

108. Назовите дефекты механической обработки.

109. Назовите основные дефекты, возникающие в процессе пластической деформации металла.

110. Какие дефекты возникают в процессе термической и химико-термической обработки?

111. Что такое магнитный неразрушающий контроль?

112. По каким признакам, согласно ГОСТ 18353–79, производят классификацию методов неразрушающего контроля?

113. Как классифицируют методы магнитного контроля по перечисленным выше признакам?

114. Как классифицируют средства неразрушающего контроля?

115. Что такое индикатор?

116. Дайте определение понятия измерительного преобразователя. Что такое магнитный преобразователь?
117. На каком законе основан принцип действия индукционного преобразователя?
118. Как устроен индукционный преобразователь?
119. Какие преобразователи называются полемерами, а какие градиентометрами?
120. Какие преобразователи называются пассивными, а какие активными?
121. Что собой представляют сканирующие индукционные преобразователи?
122. Как устроены измерительные приборы с вращающимися индукционными преобразователями?
123. Какие недостатки имеют приборы, основанные на применении вибрирующих индукционных преобразователей?
124. Каковы особенности устройства индукционных приборов, предназначенных для измерения переменных и импульсных магнитных потоков?
125. Что собой представляют пондеромоторные преобразователи?
126. В чем сущность эффекта Холла?
127. Какие преобразователи называют магниторезистивными?
128. Какой принцип действия магнитополупроводниковых преобразователей?
129. Как устроен феррозонд-полемер и в чем его отличие от феррозонда-градиентометра?
130. Какие виды намагничивания Вы знаете?
131. Чем руководствуются при выборе вида и способа намагничивания?
132. Как намагничивают объект контроля, если ориентация дефектов не известна?
133. Какой вид имеют магнитные силовые линии при циркулярном намагничивании?
134. Почему при циркулярном намагничивании рекомендуют применять импульсный ток?
135. Какие способы циркулярного намагничивания Вы знаете?
136. По каким формулам определяют значение намагничивающего тока при циркулярном намагничивании объектов, имеющих поперечное сечение простой формы, а также крупногабаритных объектов?
137. С какой целью при циркулярном намагничивании в процессе магнитопорошковой дефектоскопии иногда применяют мягкие металлические прокладки?
138. Какие способы продольного (полюсного) намагничивания Вам известны?
139. Можно ли рассчитать режим при полюсном намагничивании?

140. Как на практике измеряют напряженность поля у поверхности объекта при полюсном намагничивании?
141. Как определить напряженность намагничивающего поля при намагничивании перемещением постоянного магнита по объекту контроля?
142. Какой вид намагничивания называется комбинированным?
143. В каких случаях объекты контроля намагничивают во вращающемся магнитном поле?
144. В каких случаях можно не размагничивать объект контроля?
145. В каких случаях недопустима повышенная остаточная намагниченность детали?
146. Какие способы размагничивания деталей Вам известны?
147. Судно находится в северном полушарии Земли. Для его размагничивания внутри корпуса имеется петля (кольцо) электрического кабеля. Где расположены магнитные полюсы на корпусе судна? В какой плоскости находится петля? Как должен быть направлен ток в петле?
148. Назовите принцип действия магнитных мин и способы борьбы с ними.
149. Как чаще всего осуществляют размагничивание объектов контроля на предприятиях?
150. По какой формуле определяют максимальную скорость перемещения детали через размагнивающий соленоид, питаемый переменным током, при которой обеспечивается качественное размагничивание объекта?
151. Как влияют частота размагнивающего поля ω , магнитная проницаемость материала μ и его удельная электрическая проводимость σ на глубину проникновения размагнивающего поля в металле?
152. Что такое скин-эффект?
153. Проявляется ли остаточная намагниченность у деталей, намагниченных циркулярно?
154. Нужно ли размагничивать цилиндрическую деталь, которую в процессе магнитопорошкового контроля намагничивали циркулярно путем пропускания тока вдоль продольной оси детали?
155. Назовите факторы, ухудшающие качество размагничивания деталей.
156. При каких условиях можно обеспечить качественное размагничивание детали?
157. Назовите способы повышения качества размагничивания деталей.
158. Как осуществить магнитное экранирование объекта?
159. В чем отличие принципов экранирования в электростатическом, магнитном и электромагнитном полях?
160. Какие приборы используют для оценки качества размагничивания объектов?

161. Как осуществляют оценку качества размагничивания объекта контроля?

162. Как образуется магнитное поле рассеяния над дефектом сплошности ферромагнитного объекта?

163. Зависит ли характер поля дефекта от того, выходит несплошность на поверхность объекта контроля или нет?

164. Что понимают под напряженностью поля дефекта?

165. От чего зависит величина измеренного поля дефекта?

166. Как влияет увеличение глубины поверхностного дефекта на величину его поля?

167. Какая особенность формирования магнитного поля протяженного дефекта, ориентированного под углом к внешнему приложенному полю?

168. Как влияет режим намагничивания на формирование поля наружного и внутреннего дефекта?

169. Как влияет форма внутреннего дефекта большого раскрытия на величину и топографию его поля?

170. Как влияет глубина залегания внутреннего дефекта на напряженность его поля?

171. Магнитное поле наружного или внутреннего дефекта убывает быстрее при удалении от поверхности объекта контроля?

172. Какой вид имеют топографии тангенциальной и нормальной составляющей поля внутреннего дефекта на поверхности ферромагнитной пластины?

173. Чем обнаруживают магнитные поля рассеяния дефектов при различных методах неразрушающего контроля?

174. Какой метод контроля называют магнитопорошковым?

175. В каких отраслях народного хозяйства применяют магнитопорошковый метод контроля?

176. Какие основные нормативные документы регламентируют применение магнитопорошкового метода для контроля ферромагнитных объектов?

177. Для выявления каких дефектов применяют магнитопорошковый метод контроля?

178. Какие условные уровни чувствительности установлены при магнитопорошковой дефектоскопии?

179. При какой шероховатости поверхности достигаются условные уровни чувствительности A , B и B ?

180. Под действием каких сил уединенные частицы магнитного порошка скапливаются над дефектами сплошности?

181. По какой формуле определяют затягивающую пондеромоторную силу, действующую на уединенную частицу магнитного порошка? Как влияет форма частицы на величину пондеромоторной силы?

182. Какова кинетика осаждения магнитного порошка, находящегося в суспензии, над трещиной?
183. Как влияет интенсивность магнитной коагуляции на выявляемость дефектов при магнитопорошковой дефектоскопии?
184. Какие факторы влияют на интенсивность магнитной коагуляции?
185. Как влияет длина цепочек магнитных частиц на выявляемость дефектов?
186. Назовите основные операции магнитопорошковой дефектоскопии.
187. Какие операции включает подготовка к контролю?
188. Какие основные устройства применяют для магнитопорошкового контроля?
189. Какие материалы и вспомогательные устройства применяют при магнитопорошковой дефектоскопии?
190. Чем удаляют загрязнения и лакокрасочные покрытия с контролируемых поверхностей?
191. Как удаляют влагу с поверхности объекта контроля?
192. Как зачищают наконечники электрокарандашей и места электрического контакта перед циркулярным намагничиванием объекта?
193. Как снимают электростатические заряды с контролируемой магнитопорошковой дефектоскопией поверхности?
194. Какие способы контроля применяют при магнитопорошковой дефектоскопии?
195. В каких случаях при контроле изделий рекомендуют применять СОН?
196. Какому участку кривой $\mu(H)$ соответствует режим намагничивания при магнитных методах контроля?
197. Как влияет содержание углерода в стали на ее магнитную проницаемость?
198. Как определяют режим намагничивания при контроле СОН?
199. В каких случаях контроль при магнитопорошковой дефектоскопии производят способом приложенного поля? Как при этом определяют режим намагничивания?
200. Гарантирует ли правильно выбранный и установленный режим намагничивания обнаружение дефектов в объекте контроля?
201. Как учитывают наличие немагнитного покрытия при определении режима намагничивания?
202. Каковы особенности магнитопорошкового контроля изделий, содержащих покрытия?
203. Как на практике определяют напряженность намагничивающего поля вблизи поверхности объекта контроля при полюсном намагничивании?
204. Какова длительность пропускания тока при контроле СОН и СПП?

205. Как влияет ориентация дефектов в изделии на выбор способа и определение режима намагничивания?

206. При магнитопорошковой дефектоскопии деталь поочередно намагничивают в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Нужно ли производить промежуточное размагничивание детали?

207. Как определяют режим при комбинированном виде намагничивания?

208. Какие виды тока применяют при намагничивании объектов контроля при магнитопорошковом методе?

209. Какие требования предъявляют к дефектоскопам, предназначенным для намагничивания изделий переменным, выпрямленным или импульсным током?

210. Какой величины достигает постоянная составляющая тока, возникающая при различных схемах выпрямления переменного тока промышленной частоты?

211. Какие факторы влияют на чувствительность магнитопорошкового контроля?

212. Влияет ли на результаты магнитопорошковой дефектоскопии при контроле способом остаточной намагниченности скорость уменьшения намагничивающего поля при его выключении?

213. Как повысить эффективность контроля СПП деталей с большим размагничивающим фактором (имеющих отношение длины к эквивалентному диаметру менее 5) при полюсном намагничивании?

214. Можно ли контролировать СОН детали с большим размагничивающим фактором?

215. Рекомендуют ли применять электромагниты постоянного тока при контроле СОН?

216. Какой ток следует применять при контроле различных объектов магнитопорошковым методом?

217. Какие объекты целесообразно контролировать во вращающемся магнитном поле?

218. Как устроен дефектоскоп вращающегося поля и как контролируют детали в нем?

219. Суперпозиция каких полей участвует в формировании магнитного поля дефекта при контроле во вращающемся магнитном поле?

220. Что Вам известно о магнитных порошках, используемых для индикации магнитных полей рассеяния, создаваемых дефектами?

221. Какими магнитными свойствами должны обладать частицы магнитного порошка, применяемого для магнитопорошковой дефектоскопии?

222. Каковы особенности применения сухого магнитного порошка при магнитопорошковой дефектоскопии?

223. Как наносят высокодисперсный и грубодисперсный сухой магнитный порошок на поверхность объекта контроля?
224. В каких случаях применяют способ воздушной взвеси?
225. Почему при нанесении магнитного порошка на объект контроля способом воздушной взвеси мелкие частицы магнитного порошка парят в потоке воздуха?
226. Что собой представляет магнитная суспензия?
227. Каковы особенности магнитопорошкового контроля, основанного на применении магнитных суспензий?
228. Какие дисперсионные среды применяют при магнитопорошковой дефектоскопии для приготовления магнитных суспензий и какие свойства магнитной суспензии влияют на выявляемость дефектов?
229. Какой механизм действия поверхностно-активных веществ в суспензии?
230. Каким требованиям должна удовлетворять дисперсионная среда магнитной суспензии?
231. Приведите пример состава магнитной суспензии.
232. Какой должна быть концентрация магнитного порошка в магнитной суспензии?
233. Каковы особенности применения флуоресцентных магнитных порошков при магнитопорошковой дефектоскопии?
234. С какой целью иногда размагничивают магнитный порошок в суспензии?
235. Как осуществляют подготовку поверхности детали перед применением водной и масляной суспензии?
236. С помощью каких средств и способов наносят магнитную суспензию на объект контроля?
237. Почему сухой магнитный порошок позволяет обнаруживать более глубоко расположенные в объекте контроля дефекты, чем магнитная суспензия?
238. Когда производится обработка деталей суспензией при контроле СПП и СОН?
239. Как удаляют остатки магнитной суспензии с объекта контроля?
240. Как устроены магнитные индикаторные пакеты, применяемые для магнитопорошковой дефектоскопии?
241. Как осуществляют проверку дефектоскопических свойств магнитного порошка и магнитной суспензии?
242. Для чего применяют магнитные пасты?
243. Какой должна быть концентрация магнитной пасты в дисперсионной среде?
244. Что такое магнитогумированная паста?

245. В каких случаях и как применяют способ магнитоумированной пасты?
246. Как производят осмотр деталей при магнитопорошковой дефектоскопии?
247. Каковы типичные признаки дефектов по картине осаждения магнитного порошка?
248. Что такое мнимые дефекты?
249. Укажите причины появления мнимых дефектов и пути их устранения.
250. Как при магнитопорошковой дефектоскопии определить, есть ли на дне риски трещина?
251. Что такое дефектограмма?
252. Приведите примеры способов изготовления дефектограмм.
253. Для чего применяют стандартные образцы при магнитопорошковой дефектоскопии?
254. Приведите пример технологии изготовления стандартного образца.
255. Что собой представляет тест-образец ТО-1?
256. Как намагничивают при магнитопорошковой дефектоскопии крупные детали сложной формы?
257. Как намагничивают при магнитопорошковой дефектоскопии мелкие детали сложной формы?
258. Как контролируют детали с резьбовой поверхностью?
259. Как намагничивают пружины при магнитопорошковой дефектоскопии?
260. Как контролируют детали в виде шайб, если внутренний и наружный диаметры близки?
261. Как контролируют детали вида шайб, если наружный и внутренний диаметры сильно отличаются?
262. Как контролируют магнитопорошковой дефектоскопией сварные соединения со снятой выпуклостью шва?
263. Каковы особенности магнитопорошкового контроля соединений, выполненных сваркой плавлением?
264. Как контролируют магнитопорошковой дефектоскопией соединения, выполненные сваркой плавлением?
265. Как контролируют детали, изготовленные литьем?
266. Как контролируют зубчатые колеса, а также детали, имеющие фигурные выступы?
267. Каковы особенности магнитопорошковой дефектоскопии ферромагнитных лопаток турбин?
268. Каковы особенности магнитопорошкового контроля объектов в процессе их эксплуатации, а также при проведении ремонта?

269. Как организуют ремонт дефектных объектов контроля?

270. Какие типы магнитопорошковых дефектоскопов Вам известны?

Приведите их основные технические характеристики.

271. Что предусмотрено в магнитопорошковых дефектоскопах для уменьшения опасности прижогов?

272. Какие операции выполняют при проверке магнитопорошковых дефектоскопов?

273. Какие требования предъявляют к участку магнитопорошкового контроля?

274. Назовите основные правила безопасной эксплуатации магнитопорошковых дефектоскопов и выполнения контроля объектов.

275. В чем сущность метода магнитографического контроля (МГК)?

276. Укажите основные области применения магнитографической дефектоскопии.

277. Какие магнитные ленты применяют для магнитографической дефектоскопии?

278. Поясните физику процесса записи магнитных полей рассеяния дефектов на магнитную ленту.

279. Почему график зависимости амплитуды сигнала, обусловленного дефектом, от напряженности намагничивающего поля (или величины тока в обмотке намагничивающего устройства) имеет максимум?

280. Какая суперпозиция магнитных полей записывается на магнитную ленту при поперечном намагничивании сварных соединений?

281. Изобразите вид топографий тангенциальных составляющих внешнего намагничивающего поля, поля валика шва, поля дефекта, а также суперпозиции магнитных полей, воздействующих на магнитную ленту на поверхности сварного соединения, при поперечном намагничивании шва (дефект расположен на небольшой глубине).

282. Объясните принцип работы воспроизводящей индукционной магнитной головки.

283. Что такое щелевая функция воспроизводящей магнитной головки?

284. Что происходит при укорочении длины волны записанных на ленте магнитных отпечатков, когда длина их полуволновых диполей становится меньше ширины рабочего зазора воспроизводящей головки?

285. Как выбирают ширину рабочей щели воспроизводящих магнитных головок?

286. Для чего применяют электронные усилители воспроизведения и какие требования предъявляют к ним?

287. Объясните вид сигналаграммы на экране магнитографического дефектоскопа.

288. Назовите основные характеристики сигнала от дефекта при магнитографической дефектоскопии.

289. Назовите основные характеристики выявленного дефекта при магнитографической дефектоскопии.

290. Каким требованиям, согласно ГОСТ 25225–82, должен удовлетворять сварной шов, подвергаемый магнитографическому контролю?

291. Какова предельная толщина контролируемого металла при магнитографическом контроле?

292. Какова предельно допустимая температура металла контролируемого участка объекта при магнитографическом контроле?

293. Какие операции выполняют при подготовке объекта к магнитографическому контролю?

294. Какие операции выполняют при проведении магнитографического контроля?

295. Какие устройства и материалы применяют при магнитографической дефектоскопии?

296. Почему при магнитографическом контроле не нашло применение перпендикулярное намагничивание контролируемых сварных соединений с помощью соленоида?

297. Какие требования предъявляют к намагничивающим устройствам для МГК?

298. Какие типы намагничивающих устройств для магнитографической дефектоскопии Вам известны?

299. Назовите способы прижатия магнитной ленты к поверхности объекта контроля.

300. Назовите наиболее важные свойства магнитной ленты.

301. Какие типы магнитных лент рекомендует ГОСТ 25225–82 для контроля изделий магнитографическим методом?

302. Магнитную ленту какой ширины следует применять при магнитографическом контроле сварных соединений?

303. Как более точно выбрать тип ленты при магнитографическом контроле?

304. Что собой представляет ленточный локальный магнитоноситель (ЛЛМ) и почему с его помощью можно выполнять измерения напряженности магнитного поля?

305. Почему для измерения напряженности магнитного поля на поверхности сварного соединения нецелесообразно использовать преобразователи Холла, феррозондовые, магниторезистивные и другие преобразователи?

306. Как градуируют ЛЛМ?

307. Как на практике можно установить требуемое значение напряженности магнитного поля на поверхности валика сварного шва?

308. Что такое обобщенный параметр валика шва при магнитографическом контроле сварных соединений?

309. Сварное соединение намагничивают в поперечном направлении. Как изменяется на поверхности тангенциальная составляющая поля дефекта при увеличении глубины его расположения в плоскости симметрии сварного шва?

310. Как изменяется топография результирующего магнитного поля на поверхности сварного соединения при поперечном намагничивании шва с увеличением глубины залегания дефекта?

311. Укажите области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении.

312. Можно ли ожидать при магнитографической дефектоскопии сварных соединений большой перебраковки изделий?

313. Что такое предельная и реальная чувствительность метода контроля?

314. Какова реальная чувствительность магнитографического метода контроля ферромагнитных изделий?

315. Почему при контроле сварных соединений изделий из низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей рекомендуют изделие намагничивать поперек шва?

316. Почему при магнитографическом контроле сварных соединений, имеющих выпуклость шва, дефекты сплошности обнаруживаются хуже, чем в соединениях без выпуклости шва?

317. Как изменится топография результирующего магнитного поля на поверхности сварного соединения, если сварной шов намагнитить под углом к его продольной оси?

318. Почему при намагничивании сварного соединения вдоль выпуклости шва и считывании записи с магнитной ленты вдоль линии намагничивания одиночные поры и шлаковые включения обнаруживаются лучше, чем при намагничивании шва в поперечном направлении?

319. Что такое разрешающая способность метода?

320. Почему при намагничивании объекта контроля вдоль цепочки пор и считывании записи вдоль направления остаточной намагниченности ленты происходит повышение разрешающей способности метода?

321. Что собой представляют концентраторы магнитной индукции и когда их рекомендуют применять при магнитографическом контроле сварных соединений?

322. Предложено осуществлять намагничивание контролируемого изделия вместе с плотно прижатой к его поверхности магнитной лентой перемещаемым постоянным магнитом. За счет чего обеспечивается высокая чувствительность метода при небольшой массе магнита?

323. Укажите назначение, область применения и преимущества способа магнитографического контроля на основе постоянных магнитов.

324. В чем заключается принцип отдельного контроля в магнитографической дефектоскопии?

325. Как намагнитить в продольном направлении начальный и конечный участки сварного шва?

326. Зависит ли поле дефекта от ширины дефекта?

327. Позволяет ли магнитографический метод контроля точно определить величину выявляемых дефектов?

328. Для чего применяют испытательные образцы при магнитографической дефектоскопии?

329. Что собой представляет испытательный образец?

330. Назовите основные недостатки испытательного образца для магнитографического контроля сварных соединений.

331. Существует ли контрольный образец, который позволяет учесть все многообразие размеров выпуклости сварного шва по ГОСТу при магнитографическом контроле?

332. Какие условные обозначения обнаруженных дефектов используются при магнитографической дефектоскопии?

333. Как составляют заключение о выявленных дефектах при магнитографической дефектоскопии ферромагнитных объектов?

334. Назовите известные Вам типы магнитографических дефектоскопов.

335. Назовите преимущества и недостатки магнитографической дефектоскопии.

336. Произведите расчет оптимального режима намагничивания при магнитографическом контроле ферромагнитных изделий.

337. Совпадают ли результаты расчета оптимальной индукции в контролируемых сечениях изделия с результатами, получаемыми экспериментально?

338. Что такое магнитное напряжение и как его определяют?

339. Как определить магнитное напряжение на участке магнитной цепи длиной l и сечением S ?

340. Что такое магнитодвижущая сила?

341. Какие основные законы используют при расчете магнитных цепей?

342. Приведите методику расчета устройства для намагничивания постоянным полем изделий в процессе магнитного контроля.

343. Какой метод контроля называют индукционным?

344. Для контроля каких объектов применяют индукционные дефектоскопы?

345. Какие виды намагничивания изделий нашли применение при индукционной дефектоскопии?

346. Контролируют ли изделия индукционным методом на остаточной намагниченности?

347. За счет чего снижают мощность намагничивающих устройств в индукционной дефектоскопии?

348. Почему ось индукционного преобразователя обычно ориентируют перпендикулярно поверхности контролируемого изделия?

349. Какие требования предъявляют к конструкциям индукционных преобразователей и к их расположению относительно объекта контроля?

350. Какой шаг сканирования должен быть для качественного контроля цилиндрических изделий индукционным методом?

351. Какую информацию содержит сигнал, снимаемый с индукционного преобразователя?

352. Приведите примеры отстройки от мешающих факторов при индукционном контроле.

353. Приведите пример схемной отстройки от помех при индукционном контроле.

354. Приведите структурную схему индукционного дефектоскопа и сделайте ее описание.

355. Приведите технические характеристики индукционных дефектоскопов.

356. Какой метод контроля называют феррозондовым?

357. Какие виды феррозондовых преобразователей применяют в феррозондовых дефектоскопах?

358. Какие требования предъявляют к габаритным размерам преобразователей феррозондовых дефектоскопов?

359. Назовите основные мешающие факторы при контроле объектов феррозондовыми дефектоскопами.

360. Назовите основные пути отстройки от помех, реализуемые в феррозондовых дефектоскопах.

361. Как уменьшить помехи, создаваемые наклепом?

362. При каких условиях феррозондовые дефектоскопы обеспечивают наибольшую чувствительность контроля изделий?

363. Приведите технические характеристики феррозондовых дефектоскопов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. – Москва: Изд-во стандартов, 1988, 19 с.
2. Шелихов, Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г. С. Шелихов. – Москва: ЭКСПЕРТ, 1995. – 224 с.
3. Неразрушающий контроль материалов и изделий: справочник / Под ред. Г. С. Самойловича. – Москва: Машиностроение, 1976. – С. 181–188.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник в 2 кн. / Под общ. ред. В. В. Ключева. – Москва: Машиностроение, 1986. – Кн. 2. – 351 с.
5. Герасимов, В. Г. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 3: Электромагнитный контроль / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков. – Москва: Высшая школа, 1992. – 312 с
6. Фалькевич, А. С. Магнитографический контроль сварных соединений / А. С. Фалькевич, М. Х. Хусанов. – Москва: Машиностроение, 1966. – 176 с.
7. Козлов, В. С. Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.
8. Способ измерения магнитного поля на поверхности исследуемого объекта: пат. ВУ 12508 / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер. – Оpubл. 30.10.2009.
9. Новиков, В. А. Выбор режима намагничивания при контроле стыковых сварных соединений магнитографическим методом / В. А. Новиков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – № 2. – С. 54–58.
10. Новиков, В. А. Исследование магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений с целью повышения его разрешающей способности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.11 / В. А. Новиков. – Свердловск, 1985. – 22 с.
11. Новиков, В. А. Магнитный контроль сварных швов на наличие локальных дефектов / В. А. Новиков, В. А. Романов // Дефектоскопия. – 1994. – № 1. – С. 32–39.
12. Способ магнитографического контроля: а. с. 1677601 СССР / В. А. Новиков. – Оpubл. 15.09.1991.
13. Способ магнитографического контроля ферромагнитных изделий: пат. 2154818 РФ / В. А. Новиков. – Оpubл. 20.08.2000.
14. Определение реальной чувствительности магнитографического метода контроля, основанного на намагничивании объекта через уложенный на его поверхность магнитоноситель / В. А. Новиков, Г. И. Скрыбина, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 2. – С. 76–80.
15. Новиков, В. А. Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым

постоянным магнитом через магнитоноситель, I / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 7. – С. 42–50.

16. **Кушнер, А. В.** Повышение эффективности магнитографического метода контроля при намагничивании изделий перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / А. В. Кушнер. – Могилев, 2011. – 24 с.

17. Исследование вида сигналограмм при магнитографическом контроле с намагничиванием объекта через магнитоноситель, II / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Метрология и приборостроение. – 2004. – № 4. – С. 15–20.

18. **Новиков, В. А.** Экспериментальное исследование магнитографического контроля объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель, II / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 7. – С. 51–58.

19. **Новиков, В. А.** Запись поля дефекта на магнитную ленту при тангенциальном намагничивании полями последовательно противоположных направлений / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 8. – С. 54–60.

20. **Новиков, В. А.** Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитоноситель. Схемы намагничивания / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 30–35.

21. **Кушнер, А. В.** Программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля / А. В. Кушнер, А. В. Шилов, В. А. Новиков // Дефектоскопия. – 2010. – № 6. – С. 36–40.

22. **Новиков, В. А.** Повышение разрешающей способности магнитного контроля изделий / В. А. Новиков, В. А. Романов // Дефектоскопия. – 1993. – № 11. – С. 78–83.

23. **Новиков, В. А.** Повышение эффективности магнитографического контроля сварных соединений на наличие протяженных дефектов / В. А. Новиков // Дефектоскопия. – 1996. – № 11. – С. 23–27.

24. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. 1534380 СССР / В. А. Новиков, Л. В. Кублицкая, Т. М. Киселева. – Оpubл. 07.01.1990.

25. Способ магнитографического контроля: а. с. 1633349 СССР / В. А. Новиков. – Оpubл. 07.03.1991.

26. Способ магнитографического контроля изделий: а. с. 1744630 СССР / В. А. Новиков, В. А. Романов. – Оpubл. 30.06.1992.

27. **Новиков, В. А.** Некоторые особенности магнитографического контроля ферромагнитных объектов на остаточной намагниченности / В. А. Новиков, А. В. Кушнер, А. В. Шилов // Современные методы и приборы контроля качества

и диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 сент. – Могилев, 2017. – С. 138–143.

28. **Кушнер, А. В.** Определение условий магнитографического метода контроля на остаточной намагниченности объекта / А. В. Кушнер, А. В. Шилов, В. А. Новиков // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – Могилев, 2019. – С. 315–316.

29. Способ магнитного контроля изделий: а. с. 1567964 СССР / В. А. Новиков. – Оpubл. 30.05.1990.

30. **ГОСТ 25225–82.** Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. – Москва: Изд-во стандартов, 1983. – 19 с.

31. **Шилов, А. В.** Дефектоскопия ферромагнитных объектов с визуализацией магнитных полей на пленке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / А. В. Шилов. – Могилев, 2015. – 24 с.

32. **Новиков, В. А.** Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки «Flux-detector» / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // *Контроль. Диагностика.* – 2010. – № 4. – С. 24–30.

33. **Павлюченко, В. В.** Применение пленочных флюкс-детекторов для определения свойств электропроводящих и магнитных объектов / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // *Дефектоскопия.* – 2018. – № 1. – С. 52–57.

34. Антимагнитные пломбы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://miploba.ru/пломбировочная-продукция/антимагнитные-пломбы/>. – Дата доступа: 12.03.2010.

35. Способ магнитографической дефектоскопии объекта и устройство для его осуществления: пат. 21905 С1 ВУ / В. А. Новиков, А. В. Шилов. – Оpubл. 28.02.2018.

36. **Новиков, В. А.** Границы применения магнитного метода контроля с использованием визуализирующей поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та.* – 2014. – № 1. – С. 106–116.

37. **Новиков, В. А.** Экспериментальные исследования коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов / В. А. Новиков, А. В. Шилов // *Дефектоскопия.* – 2014. – № 3. – С. 40–49.

38. **Шилов, А. В.** Обнаружение реальных дефектов в ферромагнитных объектах с помощью визуализирующей магнитные поля пленки / А. В. Шилов, А. В. Кушнер, В. А. Новиков // *Дефектоскопия.* – 2016. – № 4. – С. 41–47.

39. **Новиков, В. А.** Экспериментальное определение глубины залегания и величины цилиндрического дефекта в ферромагнитной пластине с использованием визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов // *Дефектоскопия.* – 2014. – № 4. – С. 25–30.

40. **Зацепин, Н. Н.** К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов, II. Экспериментальная проверка основных расчетных закономер-

ностей / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 59–65.

41. Определение измененных номеров кузовов автомобилей с помощью визуализирующей магнитные поля пленки / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер, С. Г. Ислевский // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 50–57.

42. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии: а. с. 741136 СССР / А. М. Шарова, В. А. Новиков. – Оpubл. 15.06.1980.

43. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии: а. с. 1677602 СССР / В. А. Новиков. – Оpubл. 15.09.1991.

44. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии: а. с. 1732250 СССР / В. А. Новиков, В. А. Романов, М. А. Шкель, Е. С. Алексеенко. – Оpubл. 07.05.1992.

45. Способ магнитографического контроля стыковых сварных соединений: а. с. 1506346 СССР / В. А. Новиков. – Оpubл. 07.09.1989.

46. Способ магнитографического контроля изделий из ферромагнитных материалов: а. с. 1392485 СССР / В. А. Новиков, С. А. Новиков. – Оpubл. 30.04.1988.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

Табл. А.1. Магнитные характеристики некоторых сталей

Марка стали	Термообработка	Коэрцитивная сила H_c , А/м	Остаточная индукция B_r , Тл	Напряженность, необходимая для получения $B_{r \max}$, Н, А/м
20А	В состоянии поставки	320	1,17	5000
10	То же	480	0,86	3200
45	То же	640	1,12	7200
45	Закалка с $(820 \pm 10)^\circ\text{C}$ Отпуск в масле при 160°C	2160	1,18	15200
5	В состоянии поставки	640	1,10	3600
ШХ-15	Закалка с 840°C в масле, отпуск при 160°C , охлаждение на воздухе	3600	0,79	17600
P9	Закалка с 1240°C , отпуск при 550°C	3440	1,04	18400
P18	Закалка с 1270°C , отпуск при 550°C	4160	0,91	14400

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное)

Табл. Б.1. Исходные данные для построения кривой намагничивания

Напряженность намагничивающего поля H , А/м	Магнитная индукция B , Тл, для сталей следующих марок				
	10	20	30	Ст 3	09Г2
200	0,09	–	0,09	0,2	0,06
500	0,535	0,5	0,49	0,85	0,31
1000	1,11	0,975	0,95	1,22	0,87
1500	1,25	1,24	1,165	1,35	1,15
2000	1,36	1,38	1,29	1,4	1,30
2500	1,445	1,43	1,3	1,47	1,41
3000	1,49	1,515	1,445	1,51	1,48
4000	1,575	1,585	1,53	1,57	1,565
5000	1,635	1,630	1,58	1,62	1,70
7500	1,71	1,725	1,68	1,7	1,73
10000	1,78	1,78	1,755	1,77	1,795
12500	1,835	1,83	1,81	1,83	1,82
15000	1,87	1,86	1,915	1,87	1,86
20000	1,94	1,94	1,945	1,95	1,93
25000	2,0	1,96	1,96	2,01	1,99
30000	2,04	2,04	2,01	2,07	2,03
35000	2,07	2,07	2,04	2,12	2,06
40000	2,09	2,11	2,06	–	2,085
45000	2,1	2,14	2,08	–	2,10
50000	2,1	2,166	2,1	–	2,12
55000	–	–	–	–	–
60000	–	–	–	–	–

Табл. Б.2. Характеристики двухслойных магнитных лент

Тип ленты	Коэрцитивная сила, А/м
И4701-35	8000
МКУ	12400...12800
Тип 6	17600

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ.....	6
1.1. Магнитное поле и его характеристики	6
1.2. Краткие сведения о ферромагнетизме. Свойства ферромагнетиков. Парамагнетики и диамагнетики.....	10
1.3. Физические величины, характеризующие магнитные свойства вещества. Кривая намагничивания. Напряженность магнитного поля, намагниченность, магнитная индукция, индукция технического насыщения, магнитная проницаемость.....	13
1.4. Домены. Особенности намагничивания ферромагнетиков.....	21
1.5. Петля гистерезиса. Коэрцитивная сила. Частные циклы гистерезиса.....	27
1.6. Намагничивание ферромагнитного тела и вещества	30
1.7. Определение статических магнитных характеристик ферромагнитных материалов	33
1.8. Основные источники магнитных полей	38
2. ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	75
2.1. Классификация дефектов в сталях	75
2.2. Дефекты сварки, литья, механической обработки, пластической деформации металла, химико-термической обработки.....	77
3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ	85
3.1. Классификация методов и средств магнитного контроля	85
3.2. Первичные магнитные преобразователи и индикаторы магнитных полей	86
3.3. Виды, способы и схемы намагничивания объектов.....	93
3.4. Способы размагничивания объектов. Демагнетизаторы. Контроль размагниченности	100
3.5. Образование поля дефекта при намагничивании объекта контроля	109
4. МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ	113
4.1. Сущность метода. Область применения. Выявляемые дефекты. Уровни чувствительности. Требования к шероховатости поверхности	113

4.2. Кинетика осаждения магнитного порошка над дефектом.....	116
4.3. Основные операции магнитопорошковой дефектоскопии.	
Материалы и оборудование. Подготовка к контролю.....	120
4.4. Способ приложенного поля и способ остаточной намагниченности. Определение режима намагничивания	123
4.5. Особенности намагничивания постоянным, переменным и импульсным полем.....	132
4.6. Факторы, влияющие на чувствительность магнитопорошкового контроля. Пути повышения эффективности магнитопорошковой дефектоскопии	133
4.7. Особенности применения вращающегося магнитного поля	137
4.8. Сухой магнитный порошок. Магнитные суспензии. Магнитные индикаторные пакеты. Магнитные пасты. Магнитогумированная паста. Нанесение дефектоскопического материала на объект контроля. Проверка дефектоскопических свойств магнитного порошка и суспензии.....	138
4.9. Осмотр деталей. Типичные признаки дефектов по картине осаждения магнитного порошка.....	151
4.10. Мнимые дефекты. Отстройка от мешающих факторов при магнитопорошковой дефектоскопии.....	152
4.11. Способы изготовления дефектограмм	155
4.12. Стандартные образцы	155
4.13. Контроль деталей сложной формы, пружин, шайб, сварных швов, литья, зубчатых колес, лопаток турбин и объектов в процессе их эксплуатации. Организация ремонта дефектных объектов контроля.	156
4.14. Магнитопорошковые дефектоскопы.....	163
4.15. Требования, предъявляемые к участку магнитопорошкового контроля на предприятии. Требования техники безопасности при магнитопорошковой дефектоскопии	165
4.16. Краткое руководство по разработке технологической карты магнитопорошкового контроля.....	166
5. МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ	176
5.1. Сущность метода. Области применения.....	176
5.2. Физические основы записи магнитных полей дефектов на магнитную ленту	176
5.3. Преобразование магнитного отпечатка на ленте в электрический сигнал. Вид сигналограмм.....	181
5.4. Требования к сварным соединениям. Подготовка объекта контроля. Основные операции контроля	184
5.5. Оборудование и материалы. Требования к намагничивающим устройствам. Магнитная лента. Ленточный локальный магнитоноситель.....	187

5.6. Определение режима намагничивания. Обобщенный параметр валика шва.....	194
5.7. Области качественно разной выявляемости дефектов в сварном соединении. Чувствительность и разрешающая способность метода. Повышение эффективности МГК. Принцип отдельного контроля в магнитографической дефектоскопии	196
5.8. Дефектометрия	227
5.9. Условные обозначения дефектов	235
5.10. Достоинства и недостатки метода.....	237
5.11. Расчет оптимального режима намагничивания при магнитографическом контроле ферромагнитных изделий.....	237
5.12. Расчет намагничивающих устройств	240
6. ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ	247
6.1. Сущность, область применения и особенности метода. Требования к первичным преобразователям.....	247
6.2. Повышение селективности метода. Типы приборов.....	249
7. ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ	253
7.1. Сущность и особенности метода. Требования к первичным преобразователям	253
7.2. Основные мешающие факторы и отстройка от них. Типы приборов	253
8. МЕТОД ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКИ	256
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.....	265
9.1. Лабораторная работа № 1. Построение основной кривой намагничивания материала	265
9.2. Лабораторная работа № 2. Размагничивание деталей и оценка качества размагничивания.....	268
9.3. Лабораторная работа № 3. Исследование выявляемости дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов магнитопорошковым методом	271
9.4. Лабораторная работа № 4. Магнитографический контроль объектов с плоской поверхностью	273
9.5. Лабораторная работа № 5. Магнитографический контроль сварных соединений.....	275

10. ТЕСТЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНАМ ПО МАГНИТНОМУ КОНТРОЛЮ	277
10.1. Общий экзамен	277
10.2. Специальный экзамен (магнитопорошковый метод)	296
10.3. Специальный экзамен (феррозондовый метод)	307
11. ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭКЗАМЕНОВ	316
Вопросы для самоконтроля	318
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	336
ПРИЛОЖЕНИЕ А	340
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	341

Учебное издание

Новиков Владимир Алексеевич

**МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ
В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ**

Учебное пособие

Редакторы *Т. А. Рыжикова, А. Т. Червинская*

Художественное оформление обложки *В. П. Бабичева*

Компьютерный дизайн *Н. П. Полевнича*

Подписано в печать 24.11.2020. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 20,23. Уч.-изд. л. 21,69. Тираж 100 экз. Заказ № 640.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.