

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И.И. Толмачев

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ**

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 620.179.141(075.8)

ББК 30.3я73

T52

Толмачев И.И.

T52 Физические основы и технология магнитопорошкового контроля: учебное пособие / И.И. Толмачев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 125 с.

ISBN 5-98298-235-0

Пособие содержит описание физических основ, технологии и аппаратуры магнитопорошкового контроля качества. Основные разделы снабжены контрольными вопросами.

Разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Неразрушающий контроль» и предназначено для специалистов в области контроля качества, а также для студентов очного, заочного и дистанционного обучения по специальности 200102 – «Методы и приборы контроля качества и диагностики».

УДК 620.179.141(075.8)

ББК 30.3я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензент

Кандидат технических наук
директор ООО Компания «СМТ»

А.Б. Чигорко

ISBN 5-98298-235-0

© Толмачев И.И., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы контроля качества и диагностики материалов и изделий принято классифицировать по видам физических полей, которыми воздействуют на объект контроля с целью получения информации о качестве.

Автор поставил перед собой задачу подробно рассмотреть технологию магнитопорошкового метода контроля и познакомить читателя с физическими основами, методикой, аппаратурой, метрологическим обеспечением данного метода. Для контроля полученных знаний в конце каждого раздела приведены контрольные вопросы, которые помогут Вам определить уровень требований, предъявляемый к специалистам по контролю качества при аттестации по магнитному виду контроля. Приведен сравнительный анализ требований к аттестации специалистов в области неразрушающего контроля по национальным российским правилам (по требованиям Ростехнадзора России) и по международному стандарту EN473 и оценить степень своей готовности к подобной аттестации.

При написании учебного пособия использовался опыт преподавания курса «Электромагнитный контроль» для студентов специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики» Томского политехнического университета и опыт обучения и аттестации специалистов-практиков в Аттестационном региональном центре специалистов по неразрушающему контролю НИИ интроскопии ТПУ.

С уважением, автор

Глава 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛАХ

1.1. Общие положения

Все методы магнитной дефектоскопии заключаются в намагничивании ферромагнитных объектов контроля и в дальнейшей регистрации полей рассеяния дефектов. По способу получения информации о полях рассеяния различают магнитопорошковую, индукционную, феррозондовую и магнитографическую дефектоскопию. Все эти методы контроля объединяют два общих признака: 1) объект контроля обладает ярко выраженными характеристиками ферромагнетика; 2) обязательной процедурой контроля является намагничивание (как правило, в средних или сильных магнитных полях).

Дефектом называется каждое несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией (ГОСТ 17102–71). Понятие дефект – относительно. Например, одинаковое нарушение сплошности для одного изделия можно квалифицировать как допустимое, а для другого (более ответственного) – как недопустимое. Поэтому некоторое количество газовых или шлаковых пор внутри сварного соединения может считаться допустимым, т. к. эти дефекты не обладают концентраторами напряжений и их дальнейшее увеличение маловероятно. В этом случае всегда оговаривается максимальный размер (обычно диаметр) и их количество на базовом расстоянии.

Дефекты разделяют на явные и скрытые, а также критические, значительные и малозначительные [1]. На практике очень популярна классификация дефектов в зависимости от их места расположения на поверхностные, подповерхностные и внутренние. Такое разделение дефектов проводят для последующего выбора вида контроля качества продукции (вид физического поля и тип контроля – выборочный или сплошной). При любом методе контроля о наличии дефекта судят по косвенным признакам (характеристикам), свойственным данному методу.

Так, при необходимости обнаружения внутренних дефектов в металлах, будет выбран радиационный либо акустический контроль. Если же необходимо обнаруживать поверхностные дефекты в металлах, вы-

бор методов контроля существенно расширяется, возможно применение капиллярного, вихретокового и магнитного контроля.

В этой классификации необходимо отдельно выделить категорию подповерхностных дефектов. Точного понятия «подповерхностный дефект» нет. В разных источниках глубина залегания подповерхностных дефектов указывается от 1 до 10 мм и обычно связывается с особенностями и параметрами физических полей, применяемых в данном виде контроля. Так, ГОСТ 21105–87 указывает, что магнитопорошковый метод предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: трещин различного направления, надрывов, **волосовин, непроваров сварных соединений, флокенов, закатов** и т. п., при этом геометрические размеры и предельная глубина подповерхностного дефекта не назначается, но указано, что при выявлении подповерхностных дефектов чувствительность метода снижается.

Дефекты типа нарушения сплошности металла являются следствием несовершенства его структуры и возникают на разных стадиях технологического процесса. К дефектам тонкой структуры относят дислокации – особые зоны искажений атомной решетки. Прочность деталей резко падает при определенном числе дислокаций в единице объема кристалла. Субмикроскопические трещины (размером порядка несколько микрометров) образуются в процессе обработки детали (например, шлифования или термической обработки) и резко снижают ее прочность, особенно в условиях сложного напряженного состояния, воздействия высоких температур и давлений. Наиболее грубыми дефектами являются макроскопические, в ряде случаев видимые невооруженным глазом, представляющие собой нарушения сплошности или однородности металла, особенно резко снижающие прочность детали.

По природе происхождения дефекты подразделяются на производственно-технологические и эксплуатационные.

Производственно-технологические дефекты:

- металлургические – возникают при отливке и прокате;
- технологические – возникают при изготовлении и ремонте (механическая обработка, сварка, пайка, клепка, термообработка, нанесение гальванических покрытий).

Выявление этой группы дефектов очень важно при изготовлении металлических заготовок и полуфабрикатов на стадии **выходного контроля продукции**, который проводит предприятие-изготовитель. Во втором случае **входной контроль** заготовок и полуфабрикатов проводит предприятие-потребитель, что позволяет в итоге обеспечить заданную (расчетную) надежность и долговечность сложных устройств в целом.

В дальнейшем при работе любого объекта после некоторой наработки изделия в результате усталости металла, коррозии, изнашивания, а также неправильной эксплуатации возникают **эксплуатационные дефекты**.

Таким образом, в любой детали, прошедшей эксплуатацию, могут присутствовать дефекты, относящиеся к любой из перечисленных групп. Обнаружить все дефекты невозможно, поскольку само понятие дефект индивидуально для каждой детали (определяется сочетанием свойств материала, технологией изготовления и условий эксплуатации). Кроме этого каждый физический метод имеет порог чувствительности к дефектам, выражаемый в линейных или объемных величинах. Выявление дефектов ниже порога чувствительности маловероятно или невозможно. Поэтому главной задачей дефектоскопии (в том числе и магнитопорошковой) является обнаружение всех **недопустимых** дефектов, наличие которых может привести к аварии либо инциденту на производстве.

В связи с поставленной задачей, специалисту по контролю качества для успешной дефектоскопии очень важно владеть следующей информацией об объекте контроля:

- технология производства заготовки детали – позволяет оценить возможность наличия дефектов металлургического происхождения;
- технология изготовления детали – позволяет оценить возможность наличия дефектов второй группы – дефектов механической обработки, термообработки, дефектов сварных соединений и т. д.
- условия эксплуатации детали – диапазон рабочих температур, давление и агрессивность среды, механические нагрузки и области максимальных механических напряжений – позволяет оценить возможность возникновения усталостных дефектов и зоны их появления.

Наличие этой информации позволит более грамотно провести выбор метода контроля и в рамках выбранного метода разработать технологию контроля, позволяющую выявить дефекты, недопустимые для данного изделия.

1.2. Дефекты металлургического происхождения

1.2.1. Дефекты отливок чугуна и стали

Эти дефекты делятся на следующие группы [3]: несоответствие по геометрии, дефекты поверхности, несплошности в теле отливки, включения и несоответствия по структуре. С учетом специфики магнитопорошковой дефектоскопии рассмотрим определения для трех групп дефектов: дефекты поверхности, включения и несоответствия по структуре (табл. 1).

Таблица 1.1

Дефекты отливок чугуна и стали [2, 3]

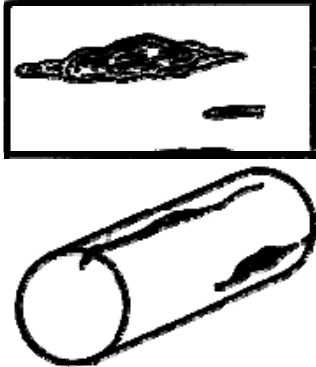
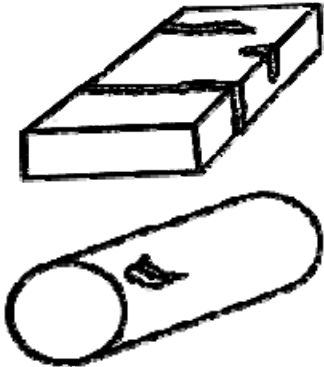
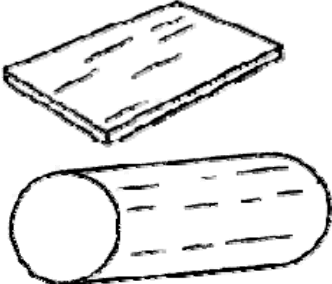
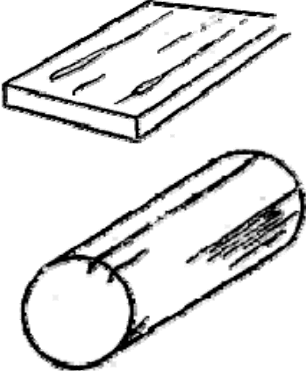
ДЕФЕКТЫ ПОВЕРХНОСТИ		
1	Пригар Burn on	Дефект в виде трудно отделяемого специфического слоя на поверхности отливки, образовавшегося вследствие физического и химического взаимодействия формовочного материала с металлом и его окислами
2	Спай Cold lap, cold shut	Дефект в виде углубления с закругленными краями на поверхности отливки, образованного неполностью слившимися потоками металла с недостаточной температурой или прерванного при заливке
3	Ужимина Expansion scab	Дефект в виде углубления с пологими краями, заполненного формовочным материалом и прикрытого слоем металла, образовавшегося вследствие отслоения формовочной смеси при заливке
4	Нарост Knob, scab	Дефект в виде выступа произвольной формы, образовавшегося из загрязненного формовочными материалами металла вследствие местного разрушения литейной формы
5	Залив Flash, cross-joint	Дефект в виде металлического прилива или выступа, возникающего вследствие проникновения жидкого металла в зазоры по разъемам формы, стержней или по стержневым знакам
6	Засор Surface contamination	Дефект в виде формовочного материала, внедрившегося в поверхностные слои отливки, захваченного потоками жидкого металла
7	Плена Oxide spots	Дефект в виде самостоятельного металлического или окисного слоя на поверхности отливки, образовавшегося при недостаточно спокойной заливке
8	Просечка Veining, mapping	Дефект в виде невысоких прожилок на поверхности отливки, возникших вследствие затекания металла в трещины на поверхности формы или стержня
9	Окисление Oxidation	Дефект в виде окисленного слоя металла с поверхности отливки, получившийся после отжига отливок из белого чугуна на ковкий чугун
10	Поверхностное повреждение Surface damage	Дефект в виде искажения поверхности, возникшего при выбивке отливки из формы, очистке и транспортировании

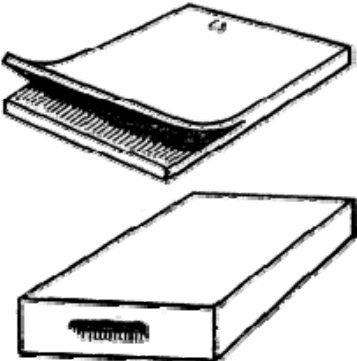
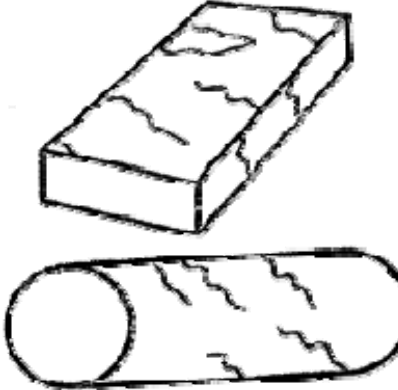
Окончание табл. 1.1

11	Складчатость Foldness, waviness	Дефект в виде незначительных гладких возвышений и углублений на поверхности отливки, возникающих вследствие пониженной жидкотекучести металла
12	Грубая поверхность Rough surface	Дефект в виде шероховатости поверхности с параметрами, превышающими допустимые значения
13	Газовая шероховатость Gas roughness	Дефект в виде сферообразных углублений на поверхности отливки, возникающих вследствие роста газовых раковин на поверхности раздела металл-форма
ВКЛЮЧЕНИЯ		
1	Металлическое включение Exogenous metallic inclusion	Дефект в виде инородного металлического включения, имеющего поверхность раздела с отливкой
2	Неметаллическое включение Exogenous non-metallic inclusion	Дефект в виде неметаллической частицы, попавшей в металл механическим путем или образовавшейся вследствие химического взаимодействия компонентов при расплавлении и заливке металла
3	Королек	Дефект в виде шарика металла, отдельно застывшего и несплавившегося с отливкой, образовавшегося брызгами при неправильной заливке
НЕСООТВЕТСТВИЕ ПО СТРУКТУРЕ		
1	Отбел Chill hard spots	Дефект в виде твердых, трудно поддающихся механической обработке мест в различных частях отливки из серого чугуна, вызванных скоплением структурно свободного цемента
2	Половинчатость E. Mottleness	Дефект в виде проявления структуры серого чугуна в отливках из белого чугуна
3	Ликвация Segregation	Дефект в виде местных скоплений химических элементов или соединений в теле отливки, возникших в результате избирательной кристаллизации при затвердевании
4	Флокен Flakes	Дефект в виде разрыва тела отливки под влиянием растворенного в стали водорода и внутренних напряжений, проходящего полностью или частично через объемы первичных зерен аустенита

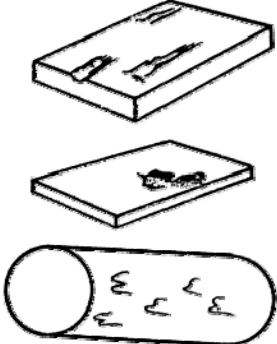
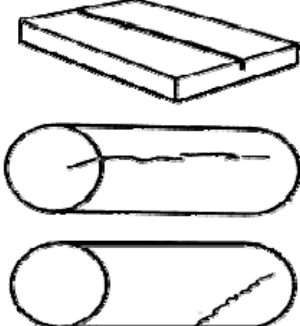

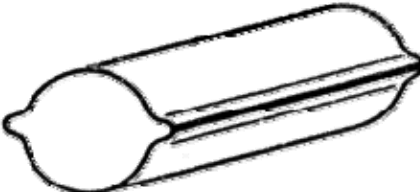
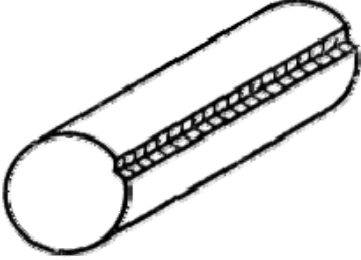
1.2.2. Дефекты проката черных металлов [4]

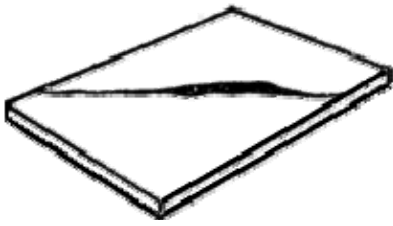
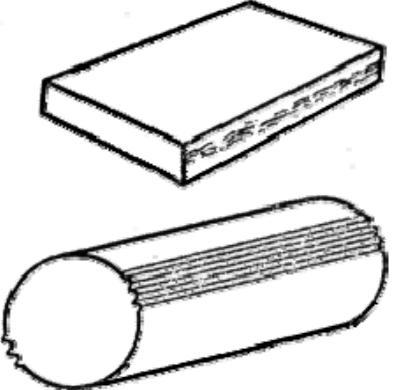
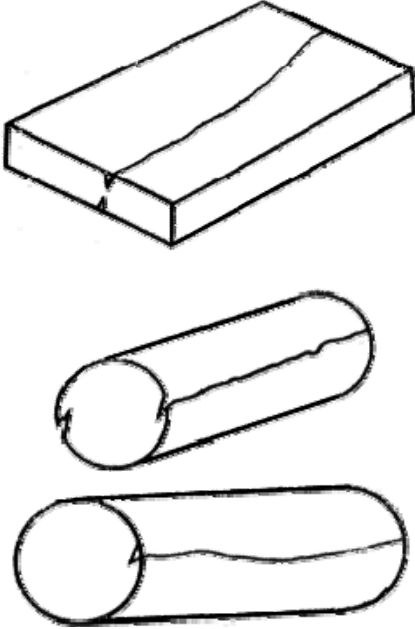

Таблица 1.2

Термин	Определение	Чертеж
Дефекты поверхности, обусловленные качеством слитка и литой заготовки		
1. Раскатанное (раскованное) загрязнение Rolled slag patch, Sand mark	Дефект поверхности, представляющий собой вытянутое в направлении деформации раскатанное (раскованное) поверхностное загрязнение слитка или литой заготовки шлаком, огнеупором, теплоизоляционной смесью	
2. Раскатанная (раскованная) корочка Shelf, Rolled crust	Дефект поверхности, представляющий собой частичное отслоение или разрыв металла, образовавшееся в результате раскатки (расковки) завернувшихся корочек, имевшихся на поверхности слитка или литой заготовки и представляющих собой окисленный металл, сопровождающийся скоплениями неметаллических включений сложного состава	
3. Волосовина Hairline, Spill	Дефект поверхности в виде нитевидных несплошностей в металле, образовавшихся при деформации имеющихся в нем неметаллических включений	
4. Раскатанный (раскованный) пузырь Rolled blister	Дефект поверхности в виде прямолинейной продольной различной протяженности и глубины тонкой трещины, образовавшейся при раскатке (расковке) наружного или подповерхностного газового пузыря слитка или литой заготовки	

<p>5. Пузырь-вздутие</p> <p>Ндп. травильный пузырь</p> <p>D. Beizblase, Geschlossene Blasen (Beulen)</p>	<p>Дефект поверхности в виде локализованного вспучивания металла, образующегося на поверхности листа и ленты из-за повышенного местного загрязнения металла газами или неметаллическими включениями</p>	
<p>6. Расслоение</p> <p>E. Delamination</p>	<p>Дефект поверхности в виде трещин на кромках и торцах листов и других видов проката, образовавшихся при наличии в металле усадочных дефектов, внутренних разрывов, повышенной загрязненности неметаллическими включениями и при пережоге</p>	
<p>7. Слиточная рванина</p> <p>E. Ingot hot tear</p>	<p>Дефект поверхности в виде разрыва, образовавшегося в начале прокатки (ковки) по участкам слитка, пораженного дефектами.</p> <p><i>Примечание.</i> Дефект обусловлен нарушением технологии выплавки и разливки металла</p>	
<p>8. Слиточная плена</p> <p>E. Sliver, Rolled scab</p>	<p>Дефект поверхности в виде отслоения языкообразной формы, частично соединенного с основным металлом, образовавшегося от раската окисленных брызг, заплесков и грубых неровностей поверхности слитка, обусловленных дефектами внутренней поверхности изложницы</p>	
<p>9. Раскатанный пригар</p> <p>E. Rolled burn-on</p>	<p>Дефект поверхности в виде темного пятна неправильной формы, образовавшегося от раската куска металла, приварившегося к слитку из-за нарушения технологии разливки или из-за неисправности изложницы</p>	

<p>10. Раскатанная (раскованная) трещина</p> <p>Rolled crack</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, образовавшийся при раскатке (расковке) продольной или поперечной трещины слитка или литой заготовки</p>	
<p>11. Гармошка</p> <p>Pipe</p>	<p>Дефект поверхности листа в виде чередующихся вздутий, идущих поперек прокатки от торца по плоскости листа, образовавшихся при наличии полостей и рыхлости в осевой зоне слитка</p>	
<p>Дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе деформации</p>		
<p>12. Деформационная рванина</p> <p>E. Hot tears</p>	<p>Дефект поверхности в виде раскрытого разрыва, расположенного поперек или под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокатке или ковке, образовавшийся вследствие пониженной пластичности металла</p>	
<p>13. Рванина на кромках</p> <p>Cracked edge</p>	<p>Дефект поверхности листа и ленты в виде разрыва металла по кромкам листа и ленты, образовавшегося из-за нарушения технологии прокатки, а также при прокатке металла с пониженной пластичностью, обусловленной технологией выплавки</p>	
<p>14. Затянутая кромка</p> <p>Folded edge</p>	<p>Дефект поверхности в виде раскатанной складки на кромке листа, напоминающей по форме зигзагообразную трещину, образующуюся при прокатке без кантовки или путем закатки напльвов, появляющихся при деформации слитков с непрогретой сердцевиной</p>	

<p>15. Прокатная плена Sliver, Rolling skin</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой отслоение металла языкообразной формы, соединенное с основным металлом одной стороной, образовавшееся вследствие раскатки или расковки рванин, подрезов, следов глубокой зачистки дефектов или сильной выработки валков, а также грубых механических повреждений</p>	
<p>16. Трещина напряжения Stress crack</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, идущий вглубь под прямым углом к поверхности, образовавшийся вследствие напряжений, связанных со структурными превращениями или неравномерным нагревом и охлаждением</p>	
<p>17. Скворечник Pigeon hole</p>	<p>Дефект поверхности в виде выходящей на поверхность полости со сглаженными и окисленными стенками, образовавшейся при ковке или прокатке в результате раскрытия внутренней трещины, которая возникла под действием напряжений при нагреве холодного металла</p>	
<p>18. Ус E. Ridge</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой продольный выступ с одной или двух диаметрально противоположных сторон прутка, образовавшийся вследствие неправильной подачи металла в калибр, переполнения калибров или неправильной настройки валков и привалковой арматуры</p>	
<p>19. Подрез</p>	<p>Дефект поверхности в виде продольного углубления, расположенного по всей длине или на отдельных участках поверхности проката, образовавшегося вследствие неправильной настройки привалковой арматуры или одностороннего перекрытия калибра</p>	

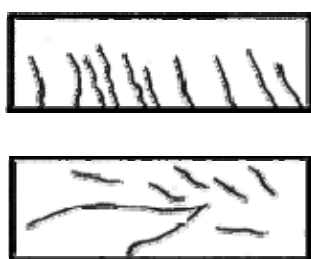
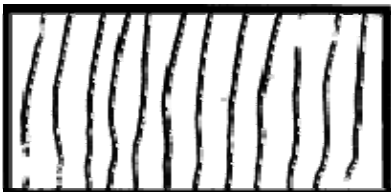

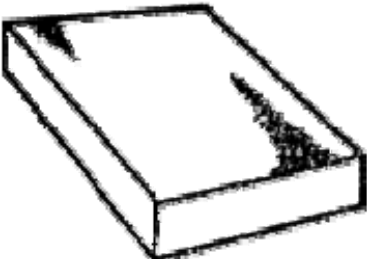
20. Порез	Дефект поверхности тонкого листа в виде частично закатанной складки, расположенной вдоль или под углом к направлению прокатки, образовавшейся из-за деформации различной степени по ширине листа и иногда сопровождаемой сквозным разрывом металла	
21. Морщины Wrinkles	Дефекты поверхности в виде группы чередующихся продольных углублений и выступов, располагающихся, в основном, по всей длине раската, преимущественно в зоне, соответствующей разъему валков, образовавшихся при повышенных обжатиях боковых граней	
22. Закат E. Lap	Дефект поверхности, представляющий собой прикатанный продольный выступ, образовавшийся в результате закатывания уса, подреза, грубых следов зачистки и глубоких рисок. <i>Примечания:</i> 1. Дефект часто расположен с двух диаметрально противоположных сторон и может иметь зазубренный край. 2. На поперечном микрошлифе дефект располагается под острым углом к поверхности без разветвления, заполнен окалиной и сопровождается искажением структуры. Металл вокруг дефекта обезуглерожен	
23. Заков Forging fold	Дефект поверхности, представляющий собой придавленный выступ, образовавшийся при ковке в результате неравномерного обжатия	

<p>24. Риска</p> <p>Groove, Guide mark</p>	<p>Дефект поверхности в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном, образовавшийся от царапания поверхности металла изношенной прокатной арматурой</p>	
<p>25. Сквозные разрывы</p> <p>Through tears</p>	<p>Дефект поверхности в виде сквозных несплошностей листа и ленты, образующихся при деформации полосы неравномерной толщины или с вкатанными инородными телами</p>	
<p>26. Надрывы</p> <p>Surface tears</p>	<p>Дефект поверхности в виде поперечных несквозных разрывов на тонких листах, образующихся при прокатке в местах забоин, углублений от зачистки, раскатанных загрязнений и окалины</p>	
<p>27. Продир</p> <p>Guide scratch</p>	<p>Дефект поверхности в виде широких продольных углублений, образующихся от резкого трения проката о детали прокатного и подъемно-транспортного оборудования</p>	
<p>28. Наколы-проколы</p> <p>E. Pricks</p>	<p>Дефекты поверхности в виде периодически повторяющихся точечных углублений или сквозных отверстий, образовавшихся от соприкосновения ленты с остроугольными наварами на роликах термических печей, травильных агрегатов и вспомогательного оборудования</p>	
<p>29. Отпечатки</p> <p>Indentations and rollmarks</p>	<p>Дефект поверхности в виде углублений или выступов, расположенных по всей поверхности или на отдельных ее участках, образовавшихся от выступов и углублений на прокатных валах, роликах или ковочном инструменте</p>	

<p>30. Раскатанные отпечатки</p> <p>Rolled indentations</p>	<p>Дефект поверхности в виде светлых пятен или матовых полосок, образующихся при холодной прокатке подката, имеющего отпечатки, а также раковины-вдавы, забоины, продиры или следы глубокой зачистки</p>	
<p>31. Сетка отпечатков</p> <p>Net shaped roll marks</p>	<p>Дефект поверхности в виде периодически повторяющихся, имеющих форму сетки выступов, образующиеся от вдавливания прокатываемого листа или ленты в трещины изношенных валков</p>	
<p>32. Чешуйчатость</p> <p>Rippled surface</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой отслоения и разрывы в виде сетки, образовавшиеся вследствие перегрева или пониженной пластичности металла периферийной зоны</p>	
<p>33. Перегрев поверхности</p> <p>Surface overheating</p>	<p>Дефект в виде шероховатости поверхности с крупным зерном, рыхлой окалиной и сеткой трещин по границам крупных кристаллов, образующейся при превышении температуры и времени нагрева</p>	
<p>34. Вкатанная окалина</p> <p>Rolled-in scale</p>	<p>Дефект поверхности в виде вкраплений остатков окалины, вдавленной в поверхность металла при деформации</p>	
<p>35. Рябизна</p> <p>Pitted surface</p>	<p>Дефект поверхности в виде мелких углублений, образующих полосы или сетку, наблюдаемых после удаления вкатанной окалины</p>	

<p>36. Раковины от окалины Pitting, Scale pits</p>	<p>Дефект поверхности в виде отдельных углублений, частично вытянутых вдоль направления прокатки, образующихся при вытравливании и выпадении вкатанной окалины</p>	
<p>37. Вкатанные металлические частицы</p>	<p>Дефект поверхности листа в виде приварившихся и частично закатанных кусочков металла. <i>Примечание.</i> К вкатанным металлическим частицам относятся: стружка, отслой от рваных кромок листа</p>	
<p>38. Раковина-вдав</p>	<p>Дефект поверхности листа и ленты в виде одиночного углубления, образовавшегося при выпадении или вытравливании вкатанной инородной частицы. <i>Примечание.</i> Дефект повторяет форму вкатанного предмета</p>	
<p>39. Отстающая окалина Exfoliating scale</p>	<p>Дефект поверхности в виде отдельных участков с отслоившейся или рыхлой окалиной, образующихся при нарушении технологии нагрева перед прокаткой или при дальнейшей термической обработке</p>	
<p>40. Заплески</p>	<p>Дефект поверхности в виде полосок от натеков оплавленного металла, образующихся при нарушении технологии огневой зачистки дефектов</p>	
<p>41. Следы абразивной зачистки Grinding traces</p>	<p>Дефект поверхности ленты в виде участков с повышенной шероховатостью, образовавшихся после зачистки полосы абразивным инструментом с грубым зерном</p>	

<p>42. Серые пятна Gray spots</p>	<p>Дефект поверхности ленты в виде светло- или темно-серых пятен, расположенных в строчку или группами, образующихся от раската вкатанной окалины или незначительных углублений</p>	
<p>43. Пятнистое науглероживание Spot carburization</p>	<p>Дефект поверхности в виде черных пятен или полос, выявившихся после травления, образовавшихся при длительном нагреве стальных изделий в науглероживающей среде</p>	
<p>44. Пятна загрязнения Dirt spots</p>	<p>Дефект поверхности в виде пятен, полос, натеков, разводов, образующихся вследствие прилипания жидкости к изделию и дальнейшего неравномерного окисления при нагреве и травлении металла</p>	
<p>45. Пятна слипания сварки Sticker patches</p>	<p>Дефект поверхности в виде темно-серых участков налипания или отрыва металла, образовавшихся при разматывании слипшихся или сварившихся участков полос рулона, горячекатаных или отожженных холоднокатаных листов в пакетах</p>	
<p>46. Заусенец Burr</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой острый, в виде гребня, выступ, образовавшийся при резке металла</p>	
<p>47. Зазубрины Nicks</p>	<p>Дефект поверхности в виде выступов и углублений на краях листа и ленты, образовавшихся при нарушении технологии резки или неисправности оборудования</p>	

<p>48. Торцевая трещина End crack</p>	<p>Дефект поверхности в виде разрывов на торцах и (или) на боковых кромках листа и других видов проката, образовавшихся при резке металла тупым или плохо настроенным инструментом, а также в интервале температур синеломкости</p>	
<p>49. Полосы-линии скольжения E. Slip bands</p>	<p>Дефекты поверхности в виде темных полосок и разветвленных линий на поверхности холоднокатаного листа и ленты, образовавшихся вследствие местных напряжений, превышающих предел текучести металла, вызванных нарушением технологии обработки давлением</p>	
<p>50. Полосы нагартовки</p>	<p>Дефект поверхности в виде параллельных светлых полос, расположенных поперек направления прокатки, образовавшихся при повышенной неравномерной деформации, обусловленной автоколебаниями валков</p>	
<p>51. Перегибы Cross breaks, Coil breaks</p>	<p>Дефект поверхности листов и лент в виде шероховатых светлых поперечных полос, образовавшихся в результате резких перегибов при сматывании или разматывании рулонов или при изменении формы прогиба пакета листов при подъемно-транспортных операциях</p>	
<p>52. Цвета побелости E. Heat tints, Oxidation tints</p>	<p>Дефект поверхности в виде пятнистой, от желтого до синевато-серого цвета окисной пленки, образовавшейся на поверхности металла при нарушениях технологии охлаждения после прокатки или при термической обработке, а также при травлении и зачистке дефектов абразивным инструментом</p>	


Дефекты поверхности, образовавшиеся при отделочных операциях		
53. Травильные трещины E. Pickling cracks	Дефект поверхности, представляющий собой разрывы, образовавшиеся при травлении металла, имевшего напряжения от структурных превращений или деформации	
54. Недотрав E. Underpickling	Дефект поверхности в виде пятен или полос, образовавшихся при неполном или неравномерном травлении окислы	 
55. Перетрав E. Overpickling	Дефект поверхности в виде язв, образовавшихся вследствие длительного травления на отдельных участках или всей поверхности металла	
56. Остатки окислы E. Scale residue	Дефект поверхности, представляющий собой отдельные участки поверхности, покрытые окислой, остающиеся после механической обработки	 
57. Пятна ржавчины E. Rust spots	Дефект поверхности в виде пятен или полос с рыхлой структурой окисной пленки, образовавшихся в результате попадания влаги и недостаточной промывки металла от травильных растворов	

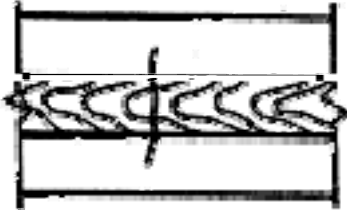
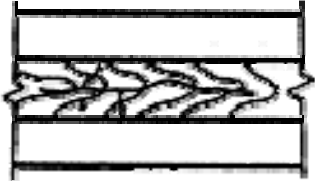
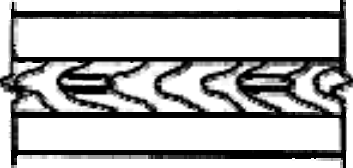


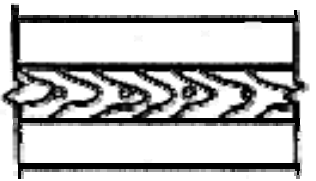
<p>58. Шлифовочные трещины Grinding cracks</p>	<p>Дефект поверхности в виде сетки паутинообразных или отдельных произвольно направленных поверхностных разрывов, образовавшихся при шлифовании и абразивной зачистке металла, обладающего высокой твердостью, хрупкостью и малой теплопроводимостью</p>	
<p>59. Царапина E. Scratch</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой углубление неправильной формы и произвольного направления, образующегося в результате механических повреждений, в том числе, при складировании и транспортировании металла</p>	

1.3. Дефекты обработки металлов и дефекты сварных соединений

Сварка металлов. В Межгосударственном стандарте [6] приведена классификация, обозначение и определения дефектов соединений при сварке металлов плавлением. (Imperfections in metallic fusion welds. Classification, designation and definitions). Сведения о дефектах сварных соединений стальных прессованных труб и профилей приведены в [7, 8]. Ниже приведена классификационная таблица дефектов соединений при сварке металлов плавлением, а также термины и определения основных понятий, относящихся к сварке металлов (Welding of metals) [5].

Таблица 1.3

<p align="center">ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ</p>	
<p>1. Трещина сварного соединения E. Crack</p>	<p>Дефект сварного соединения в виде разрыва в сварном шве и (или) прилегающих к нему зонах</p>
<p>2. Продольная трещина сварного соединения E. Longitudinal crack</p>	<p>Трещина сварного соединения, ориентированная вдоль оси сварного шва</p> 

<p>3. Поперечная трещина сварного соединения</p> <p>E. Transverse crack</p>	<p>Трещина сварного соединения, ориентированная поперек оси сварного шва</p> 
<p>4. Разветвленная трещина сварного соединения</p> <p>E. Branched crack</p>	<p>Трещина сварного соединения, имеющая ответвления в различных направлениях</p> 
<p>5. Микротрещина сварного соединения</p> <p>E. Micro-crack</p>	<p>Трещина сварного соединения, обнаруженная при пятидесятикратном и более увеличении</p>
<p>6. Усадочная раковина сварного шва</p> <p>E. Shrinkage cavity</p>	<p>Дефект в виде полости или впадины, образованный при усадке металла шва в условиях отсутствия питания жидким металлом</p> 
<p>7. Вогнутость корня шва</p> <p>E. Root concavity</p>	<p>Дефект в виде углубления на поверхности обратной стороны сварного одностороннего шва</p> 
<p>8. Свищ в сварном шве</p> <p>E. Worm-hole</p>	<p>Дефект в виде воронкообразного углубления в сварном шве</p> 
<p>9. Пора в сварном шве</p> <p>E. Gas pore; Blowhole</p>	<p>Дефект сварного шва в виде полости округлой формы, заполненной газом</p>
<p>10. Цепочка пор в сварном шве</p> <p>E. Linear porosity</p>	<p>Группа пор в сварном шве, расположенных в линию</p> 

11. Непровар E. Lack of fusion	Дефект в виде несплавления в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков сварного шва
12. Прожог сварного шва E. Burn-through	Дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшийся в результате вытекания части металла сварочной ванны
13. Шлаковое включение сварного шва E. Slag inclusion	Дефект в виде вкрапления шлака в сварном шве
13. Брызги металла E. Spatters	Дефект в виде затвердевших капель на поверхности сварного соединения
14. Поверхностное окисление сварного соединения E. Surface oxidation	Дефект в виде окалины или пленки окислов на поверхности сварного соединения
15. Подрез зоны сплавления E. Undercut	Дефект в виде углубления по линии сплавления сварного шва с основным металлом
16. Наплыв на сварном соединении E. Overlap	Дефект в виде натека металла шва на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним
17. Смещение сваренных кромок E. Edge displacement	Неправильное положение сваренных кромок друг относительно друга

Дефекты обработки металла давлением

Закат – вдавленные и закатанные в металл заусеницы на калибре прокатного стана.

Волосовина – мелкие внутренние или выходящие на поверхность трещины, образовавшиеся из газовых пузырей или неметаллических включений при прокатке или ковке. Длина волосовин 20...50 мм, встречаются во всех конструкционных сталях.

Плена прокатанного металла – тонкие плоские отслоения в виде «языка» – от мелких чешуек до 100 мм по длине и ширине.

Дефекты термообработки

Закалочные трещины – разрывы металла, возникающие при охлаждении деталей преимущественно сложной формы в процессе закалки из-за высоких внутренних напряжений. Наиболее вероятные места возникновения – места срезки с изменением сечения, углы, подрезы. Закалочные трещины могут появляться и на деталях простой конфигурации по причине дефекта материала – волосовины, шлаковые включения, ковочные трещины. Отличительный признак закалочной трещины – неопределенность направления и извилистость формы.

Дефекты механической обработки

Шлифовочные трещины – группы мелких и тонких разрывов, как правило, в виде сетки на поверхности металла. Причины появления:

- неправильный режим термообработки, например очень резкое охлаждение, вызывающее большие внутренние напряжения;
- вследствие местного перегрева металла при нарушении режимов шлифования.

Прижоги – закаленные участки небольшой площади, возникающие при резком нагреве поверхностного слоя металла при шлифовке.

1.4. Дефекты усталостного происхождения

Усталостные дефекты связаны с явлением усталости металла – это процесс постепенного снижения работоспособности металла под действием переменных по величине и направлению нагрузок. Трещины усталости возникают при конструктивной недоработке, при превышении рабочего ресурса детали и в местах концентрации напряжений: у отверстий, глубоких рисок, острых углов; в местах резкого изменения сечений; у основания резьбы и зубьев шестерен; при сочетании предельных режимов эксплуатации оборудования – давления, температуры среды и т. д.



Рис. 1.1. Усталостное разрушение фланца втулки

В зоне усталостного разрушения отсутствуют следы какой-либо пластической деформации, даже у самых пластичных материалов. Ширина раскрытия усталостных трещин на поверхности в начальных стадиях разрушения не превышает нескольких микрон. Это явление используют для создания контрольных образцов для магнитной дефектоскопии. На рис. 1 приведена фотография усталостного разрушения фланца втулки, а на рис. 2 показан пример усталостного разрушения рельса.

Обнаружение усталостных трещин является одной из важнейших задач при проведении контроля и диагностики действующего оборудования, при этом



обычно ставится задача обнаружения усталостных трещин на ранней стадии развития, когда их размер не приводит к серьезным авариям на производстве, а замена или ремонт детали гарантирует нормальную работу оборудования.

Рис. 1.2. Усталостное разрушение рельса

Контрольные вопросы к главе 1

1. Является ли дефектом отклонение геометрических размеров детали от размеров, установленных в нормативной документации?
 - а) Да.
 - б) Нет.
2. К какой группе относится дефект типа складчатость?
 - а) Дефект – включение.
 - б) Дефект поверхности.
 - в) Несоответствие по структуре.
3. К какой группе относится дефект типа плена?
 - а) Дефект сварного соединения.
 - б) Дефект металлургического происхождения.
 - в) Дефект усталостного происхождения.
4. К какой группе относится дефект типа флокен?
 - а) Дефект – включение.
 - б) Дефект поверхности.
 - в) Несоответствие по структуре.
5. Как называется дефект поверхности листа в виде чередующихся вздутий, идущих поперек прокатки от торца по плоскости листа, образовавшихся при наличии полостей и рыхлости в осевой зоне слитка?
 - а) Прокатная плена.
 - б) Расслоение.
 - в) Гармошка.
6. Как называется дефект в виде полости или впадины, образованный при усадке металла шва в условиях отсутствия питания жидким металлом?
 - а) Подрез зоны сплавления.
 - б) Усадочная раковина сварного шва.
 - в) Вогнутость корня шва.

7. К какой группе относится дефект типа подрез зоны сплавления?
 - а) Дефект сварного соединения.
 - б) Дефект металлургического происхождения.
 - в) Дефект усталостного происхождения.
8. Как называется дефект в виде воронкообразного углубления в сварном шве?
 - а) Свищ в сварном шве.
 - б) Пора в сварном шве.
 - в) Непровар.
9. К какому типу дефекта относится трещина у основания зуба шестерни редуктора, бывшего в эксплуатации?
 - а) Дефект сварного соединения.
 - б) Дефект металлургического происхождения.
 - в) Дефект усталостного происхождения.
10. Что является характерным признаком усталостной трещины?
 - а) Обязательное наличие следов пластической деформации в зоне трещины.
 - б) Отсутствие следов какой-либо пластической деформации в зоне трещины.

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТОПОРОШКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

2.1. Основные параметры магнитного поля

Электромагнитное поле (electromagnetic field) – форма существования материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами. Между частицами и их полем, строго говоря, точной границы нет. Однако полагают, что электрический заряд имеет лишь частица материи, сосредоточенная в весьма малой области пространства. Вне этой области материя существует в виде электромагнитного поля, и объемная плотность заряда равна нулю.

Электрически заряженные частицы и их электромагнитное поле, как и другие виды материи, обладают массой, энергией, количеством движения, т. е. характеризуются теми же свойствами, которые учитываются при рассмотрении механической формы движения материи. Но эти частицы и их электромагнитное поле обладают и специфическими свойствами, важнейшими из которых являются электрический заряд, собственный магнитный момент, силовое воздействие электромагнитного поля на заряженные частицы. Последнее проявляется по-разному, в зависимости от того, движется или неподвижна заряженная частица. Условно принимается, что электромагнитное поле имеет две составляющие (две формы проявления): 1) электрическую, характеризующуюся воздействием поля как на движущиеся, так и на неподвижные заряженные частицы; 2) магнитную, характеризующуюся воздействием только на движущиеся заряженные частицы.

Подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электрическое поле (electric field), являющееся средой взаимодействия между ними, так в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое магнитным (magnetic field). Наличие такого поля обнаруживается по силовому воздействию на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты. Название «магнитное поле» связывают с ориентацией магнитной стрелки под действием силового поля, создаваемого током. Это явление впервые было обнаружено датским физиком Х. Эрстедом в 1820 году. При пропускании по прямолинейному горизонтальному проводнику постоянного тока силой I находящаяся под ним магнитная

стрелка поворачивается вокруг своей вертикальной оси, стремясь расположиться перпендикулярно проводнику с током. Ось стрелки тем точнее совпадает с этим направлением, чем больше сила тока и чем слабее влияние магнитного поля Земли. Эрстед обнаружил, что направление поворота северного полюса стрелки под действием электрического тока изменяется на противоположное при изменении направления тока в проводнике. В дальнейшем экспериментально исследовалось действие на магнитную стрелку электрического тока, протекающего по проводникам различной формы. Во всех случаях проводники с током оказывали ориентирующее действие на магнитную стрелку. Таким образом, при прохождении по проводнику электрического тока вокруг него возникает магнитное поле, действующее на помещенную в него магнитную стрелку. Опыты показывают, что вокруг всякого движущегося заряда, помимо электрического поля, существует также и магнитное поле.

Электрическое поле действует как на неподвижные, так и на движущиеся заряды. Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно действует только на движущиеся в этом поле электрические заряды. Характер воздействия магнитного поля на ток зависит от формы проводника, по которому течет ток, от расположения проводника в силовом поле и от направления тока. Следовательно, чтобы охарактеризовать магнитное поле, надо рассмотреть его действие на определенный электрический ток. Подобно тому, как при исследовании электростатического поля использовались точечные электрические заряды, для обнаружения и исследования магнитного поля используется замкнутый плоский контур с током – рамка с током, размеры которой малы по сравнению с расстоянием до токов, создающих магнитное поле. Ориентация контура в пространстве характеризуется направлением нормали к плоскости рамки. В качестве положительного направления нормали принимается направление, связанное с током *правилом буравчика*: за положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, рукоятка (головка) которого вращается в направлении тока, текущего в рамке. Если поместить рамку с током в магнитное поле, то поле будет оказывать на рамку ориентирующее воздействие, поворачивая ее соответствующим образом. Это связано с определенным направлением магнитного поля. **За направление магнитного поля принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке.** За направление магнитного поля может быть также принято направление, совпадающее с направлением силы, действующей на северный полюс магнитной

стрелки, помещенной в данную точку. Так как магнитное поле является силовым, его, по аналогии с электрическим полем, изображают с помощью **линий магнитной индукции** – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора индукции. Их направление определяется правилом буравчика: рукоятка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции. Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с токами или постоянные магниты. Этим они отличаются от линий напряженности электростатического поля, которые являются разомкнутыми (начинаются на положительных зарядах, обрываются на отрицательных и вблизи поверхности заряженного тела направлены перпендикулярно к ней). Согласно предположению французского физика А. Ампера, в любом теле существуют микроскопические (молекулярные) токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах. Эти токи создают свое магнитное поле и могут поворачиваться в магнитных полях макроскопических токов (токов, текущих в проводниках). Так, если вблизи какого-то тела (среды) поместить проводник с током (макроток), то под действием его магнитного поля микротоки в атомах тела определенным образом ориентируются, создавая тем самым дополнительное магнитное поле. Поэтому вектор магнитной индукции характеризует **резльтирующее** магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками, т. е. при одном и том же токе I и прочих равных условиях вектор в различных средах будет иметь разные значения.

2.2. Магнитные свойства материалов

Магнитное поле – электромагнитное поле, характеризуемое его воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости.

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции (induction) \vec{B} , который может быть определен по силе \vec{F} , с которой поле действует на заряд q , перемещающийся со скоростью \vec{V} :

$$\vec{F} = q[\vec{V} \times \vec{B}]. \quad (2.1)$$

Поскольку сила \vec{F} пропорциональна векторному произведению величин \vec{V} и \vec{B} , то ее направление для положительного заряда находится по правилу левой руки. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл).

Магнитное поле проявляется при его воздействии на движущийся электрический заряд, вместе с тем и само магнитное поле порождается движением электрических зарядов (электрическим током). Способность электрического тока возбуждать магнитное поле, пространственное распределение которого определяется силой тока и геометрической структурой контура, характеризуется векторной величиной – **магнитным моментом (magnetic moment) электрического тока** \vec{M} . Модуль вектора \vec{M} в простейшем случае равен произведению тока на площадь контура, а направление совпадает с нормалью к плоскости контура:

$$\vec{M} = I \times \vec{S}. \quad (2.2)$$

Единицей измерения магнитного момента является ампер – квадратный метр (А·м²).

Важное значение в теории электромагнетизма имеет величина Φ , называемая **магнитным потоком (magnetic flow)** вектора магнитной индукции \vec{B} через поверхность S :

$$\Phi = \int_s \vec{B} dS. \quad (2.3)$$

Единицей измерения магнитного потока является вебер (Вб).

Сила взаимодействия магнитного поля и движущегося заряда зависит от среды. Для характеристики магнитного свойства среды усиливать или ослаблять это взаимодействие, а также для характеристики магнитного эффекта тока вне зависимости от среды используются величины **магнитной проницаемости материала (magnetic permeability) μ** и **напряженности магнитного поля (strength of magnetic field) \vec{H}** :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}. \quad (2.4)$$

Единицей измерения напряженности магнитного поля является ампер на метр (А/м).

Физическая величина μ характеризует зависимость силы взаимодействия магнитного поля и движущегося заряда (электрического тока) от среды, в которой находится заряд (электрический ток). Для разных материалов характерны различные значения μ . Магнитная проницаемость вакуума μ_0 – фундаментальная физическая постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Для других сред

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0, \quad (2.5)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость (relative permeability).

Отличие относительной магнитной проницаемости среды от относительной магнитной проницаемости вакуума, равной единице, харак-

теризуется величиной магнитной восприимчивости (magnetic susceptibility) χ_m :

$$\mu_r = 1 + \chi_m. \quad (2.6)$$

Если осуществить подстановку уравнения (2.6) с учетом (2.5) в выражение (2.4), получим:

$$\bar{B} = \mu_0 (\bar{H} + \chi_m \bar{H}) = \mu_0 (\bar{H} + \bar{J}). \quad (2.7)$$

Векторная величина $\bar{J} = \chi_m \bar{H}$ называется **намагниченностью (magnetization)**. Она характеризует способность вещества создавать собственное магнитное поле при воздействии на него внешнего магнитного поля и равна магнитному моменту единицы объема вещества.

В зависимости от модуля и знака восприимчивости χ_m все вещества условно делят на **диамагнетики (diamagnetic)**, **парамагнетики (paramagnetic)** и **ферромагнетики (ferromagnetic)**.

Диамагнетики имеют отрицательную магнитную восприимчивость $\chi_m = -(10^{-5} \dots 10^{-7})$, т. е. это вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном вектору напряженности внешнего поля. К диамагнетикам относятся медь, цинк, висмут, кремний, а также некоторые органические и неорганические соединения.

Парамагнетики имеют положительную магнитную восприимчивость $\chi_m = 10^{-5} \dots 10^{-1}$, т. е. это вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля. К ним относятся, например: алюминий, литий, натрий, калий, титан, ванадий, кислород, некоторые соли. Специфические магнитные свойства диамагнетиков и парамагнетиков в средствах измерительных преобразований использования не нашли. Напротив, очень широкое использование как для измерительных, так и для энергетических преобразований имеют магнитные свойства ферромагнитных материалов, поэтому остановимся на них более подробно.

Ферромагнетики – это вещества, в которых при температуре, меньшей точки Кюри (Curie point), устанавливается состояние **самопроизвольной намагниченности (spontaneous magnetization)**. Характерным признаком ферромагнетиков является высокое значение магнитной восприимчивости $\chi_m = 1 \dots 10^5$ и ее сильная и неоднозначная зависимость от напряженности магнитного поля. Ферромагнитными свойствами обладают железо, кобальт, никель, редкоземельные металлы, многочисленные сплавы и соединения указанных металлов, а также соединения хрома и марганца.

Процесс установления намагниченности ферромагнетика при действии на него внешнего магнитного поля происходит следующим образом. В состоянии полного размагничивания ферромагнитный образец состоит из большого числа **доменов (domain)**, каждый из которых намагничен до насыщения, но при этом их векторы намагниченности \overline{J}_s направлены так, что суммарный магнитный момент образца $\overline{M} = \sum \overline{J}_{si} = 0$. Намагничивание состоит в переориентации векторов намагниченности доменов в направлении приложенного поля, главным образом, за счет процессов смещения и вращения.

Разбиение же ферромагнетика на множество доменов с нулевым суммарным магнитным моментом происходит в соответствии со стремлением любой системы, в том числе и магнитной, к минимуму энергии. Процесс смещения в многодоменном ферромагнетике заключается в перемещении границ между доменами. Объем доменов, векторы \overline{J}_s которых составляют наименьший угол с направлением напряженности магнитного поля, при этом увеличивается за счет соседних доменов с энергетически менее выгодной ориентацией \overline{J}_s относительно поля. Процесс вращения состоит в повороте векторов \overline{J}_s в направлении поля \overline{H} . Причиной возможной задержки или ускорения вращения является **магнитная анизотропия (magnetic anisotropy)** ферромагнетика, что обусловлено наличием у ферромагнетика осей легкого намагничивания, в общем случае не совпадающих с направлением внешнего поля \overline{H} .

Если ферромагнетик, находящийся в состоянии полного размагничивания ($J = 0$), намагничивать в монотонно и медленно возрастающем поле, возникает зависимость $J(H)$, называемая **кривой первоначального намагничивания**. Эту кривую обычно подразделяют на пять участков (рис. 2.1, б).

Участок I – область начального, или обратимого намагничивания, где $\overline{J} = \chi_m \overline{H}$. В этой области протекают главным образом процессы упругого смещения границ доменов при постоянстве начальной магнитной восприимчивости χ_m . Участок II (область Рэлея) характеризуется квадратичной зависимостью J от H (в этой области χ линейно возрастает с ростом H). В области Рэлея намагничивание осуществляется благодаря процессам смещения, как обратимым, линейно зависящим от H , так и необратимым, квадратично зависящим от H . Область наибольших проницаемостей (III) характеризуется быстрым ростом J , свя-

занным с необратимым смещением междоменных границ. На этом участке, в соответствии с **эффектом Баркгаузена (Barkhausen effect)**, намагничивание происходит скачками (скачки Баркгаузена), что обусловлено задержками смещения границ доменов при встрече с какими-либо неоднородностями структуры ферромагнетика (атомами примесей, дислокациями, микротрещинами и т. п.). В области приближения к насыщению (IV) основную роль играет процесс вращения. После достижения **магнитного насыщения (magnetic saturation)**, когда магнитные моменты всех доменов оказываются повернутыми в направлении \vec{H} , намагниченность ферромагнетика с ростом напряженности магнитного поля практически не меняется (область V).

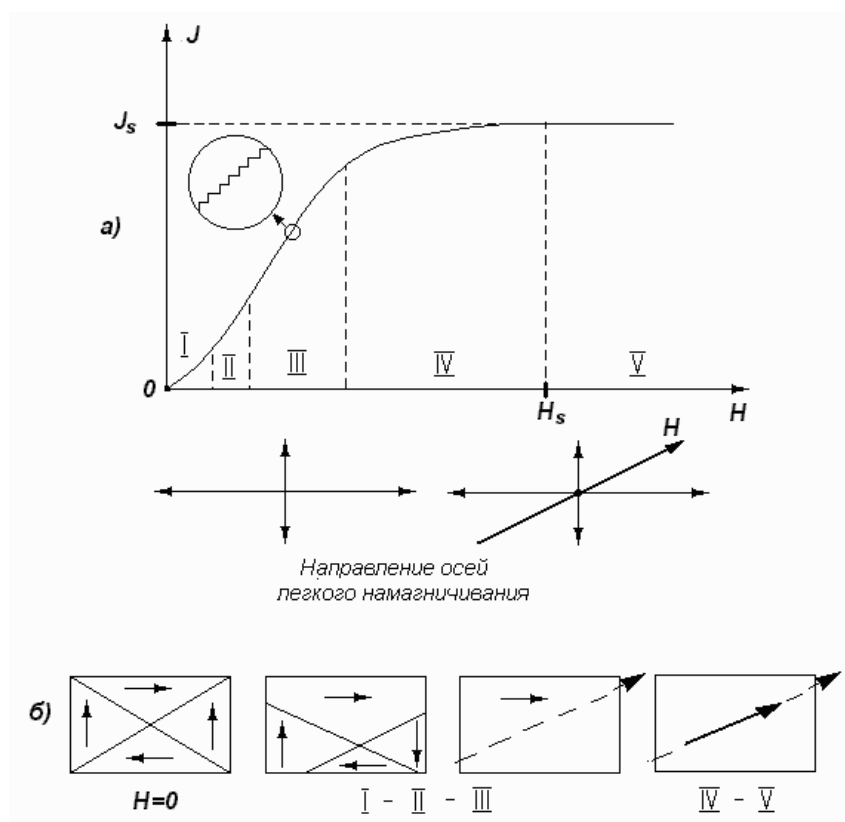


Рис. 2.1. Кривая первоначального намагничивания

Если после достижения состояния магнитного насыщения J_s в поле H_s начать уменьшать напряженность, то будет уменьшаться и намагниченность J , но по кривой, лежащей выше кривой первоначального намагничивания. Данное явление, заключающееся в том, что физическая величина, характеризующая состояние объекта, неоднозначно зависит от физической величины, характеризующей внешнее условие,

называется гистерезисом. В данном случае имеет место **магнитный гистерезис (magnetic hysteresis)**.

При уменьшении напряженности магнитного поля от H_s до нуля значение намагниченности будет уменьшаться за счет возникновения и роста доменов с магнитным моментом, направленным против поля (рис. 2.2), что обусловлено стремлением магнитной системы к минимуму энергии. Рост доменов сопровождается движением доменных стенок, который может тормозиться наличием различных неоднородностей. Поэтому при уменьшении напряженности до нуля у ферромагнетика сохраняется так называемая **остаточная намагниченность (remnant or residual magnetization) J_r** .

Образец полностью размагничивается лишь в достаточно сильном поле противоположного направления, называемом коэрцитивным, с напряженностью H_c , называемой **коэрцитивной силой (coercive force)**. При дальнейшем увеличении магнитного поля обратного направления образец вновь намагничивается вдоль поля до насыщения и т. д. Таким образом, при циклическом изменении поля кривая, характеризующая изменение намагниченности образца, образует **петлю магнитного гистерезиса (hysteresis loop)**. Различают **предельную петлю гистерезиса (major(saturation) hysteresis loop)** и **частные петли гистерезиса (incremental(minor) hysteresis loop)**, **симметричные и несимметричные петли гистерезиса (symmetrical and nonsymmetrical hysteresis loop)**.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, теряемой в образце за один цикл изменения поля. Эта энергия идет, в конечном счете, на нагревание образца. Такие потери энергии называются гистерезисными. С ростом частоты переменного магнитного поля (числа циклов перемагничивания в единицу времени) к гистерезисным потерям добавляются другие потери, связанные с **вихревыми токами (eddy current)** и **магнитной вязкостью (magnetic viscosity)**.

Площадь петли гистерезиса при высоких частотах увеличивается. Такую петлю называют динамической, в отличие от описанной выше статистической петли. Соответственно и остальные магнитные характеристики веществ делятся на динамические и статические.

Основными статическими характеристиками являются следующие параметры предельной петли гистерезиса: коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность J_r , намагниченность насыщения J_s , напряженность поля, обеспечивающая магнитное насыщение H_s , а также параметры кривой первоначального намагничивания: начальная χ_n и мак-

симальная χ_m магнитные восприимчивости. На практике для характеристики магнитных свойств ферромагнитных материалов чаще используют не намагниченность J , а индукцию B , которая, в отличие от J , может быть определена прямыми измерениями. Соответственно вместо магнитной восприимчивости χ используется относительная магнитная проницаемость μ_r . Связь величин B , H , μ_r и χ определяется выражениями (2.4) и (2.7).

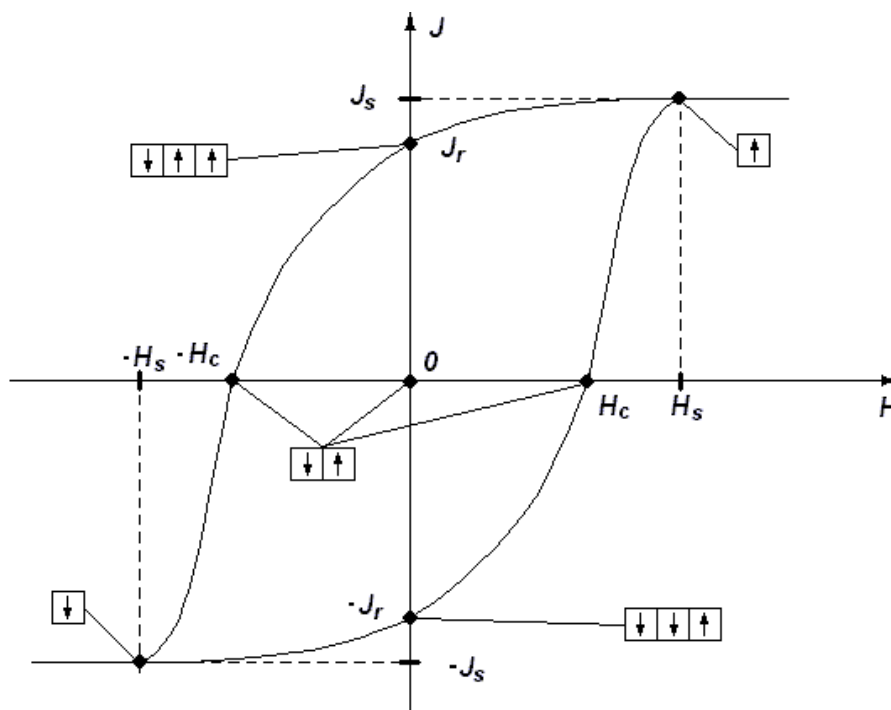


Рис. 2.2. Предельная петля гистерезиса ферромагнетика

Кроме перечисленных статических магнитных характеристик, одной из основных паспортных характеристик магнитного материала является **основная кривая намагничивания (normal magnetization curve)** – зависимость $B(H)$, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных установившихся частных циклов гистерезиса в диапазоне изменения напряженности от нуля до H_s . Для изучения поведения ферромагнетика при сложном перемагничивании (одновременно в постоянном и переменном полях) используется **дифференциальная магнитная проницаемость (differential magnetic permeability)**

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}. \quad (2.8)$$

В зависимости от значений статических магнитных характеристик магнитные материалы подразделяются на **магнитомягкие (magneto soft)**

и **магнитотвердые (magneto-hard)** (табл. 2.1). К магнитомягким относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью $H \approx 10 \dots 10^3$ А/м. Для этих материалов характерны высокие значения относительной магнитной проницаемости – начальной $\mu_{нач} = 10^2 \dots 10^5$ и максимальной $\mu_{r\max} \approx 10^3 \dots 10^6$. Коэрцитивная сила H_c магнитомягких материалов составляет обычно от 1 до 10^2 А/м, а потери на гистерезис очень малы ($1 \dots 10^3$ Дж/м³ на один цикл).

К магнитотвердым относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью $H \approx 10^3 \dots 10^5$ А/м. Магнитотвердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы $H_c \approx 10^3 \dots 10^5$ А/м и остаточной индукции $B_r \approx 0,5 \dots 1,5$ Тл.

Магнитные свойства материалов зависят не только от их химического состава, но в значительной мере от структурного состояния кристаллической решетки, определяемого механической термообработкой, а также от наличия дефектов **кристаллической решетки (crystal lattice)**.

Важное значение для технического использования ферромагнетиков имеет наблюдаемое при намагничивании ферромагнитных образцов изменение их формы и размеров, называемое **магнитострикция (magnetostriction)**. Относительное удлинение таких образцов при перемагничивании $\frac{\Delta l}{l} \approx 10^{-5} \dots 10^{-2}$. Явление магнитострикции обусловлено процессами смещения при намагничивании границ ферромагнетика между доменами и поворота магнитных доменов по полю. Оба эти процесса изменяют энергетическое состояние кристаллической решетки, что проявляется в изменении равновесных расстояний между ее узлами. В результате атомы смещаются, происходит деформация решетки. Такой механизм магнитострикции действует в диапазоне изменения магнитного поля от нуля до H_s и проявляется, главным образом, в изменении формы кристалла без изменения его объема (линейная магнитострикция). В полях, превышающих по напряженности H_c , проявляется обусловленная обменными силами объемная магнитострикция.

Наблюдается и обратный магнитострикции магнитоупругий эффект (эффект Виллари), заключающийся в зависимости магнитных свойств ферромагнетиков от механических деформаций (растяжения, кручения, изгиба и т. п.). Магнитоупругий эффект в областях смещения и вращения объясняется тем, что при действии механических напряже-

ний изменяется доменная структура ферромагнетика – векторы намагниченности доменов J_s меняют свою ориентацию, что может в одних случаях облегчать, а в других затруднять процесс намагничивания.

Таблица 2.1

Магнитные свойства некоторых ферромагнитных материалов

Марка материала		Коэрцитивная сила H_c , А/м	Остаточная индукция B_r , Тл	Индукция насыщения B_s , Тл
Магнитомягкие	80НМ (супермаллой)	0.4	–	0.8
	79НМ (пермаллой)	1.6	–	0.8
	50НП	8	–	1.5
	Э330	16	–	2.0
	Э44	40	–	1.98
	Армко–железо	64	–	2.15
Магнитотвердые	Сталь 20А	320	1.17	–
	Сталь 45	640	1.12	–
	Сталь 45 закал.	2160	1.18	–
	Сталь Х17Н2	1760	0.59	–
	Сталь Х17Н2 закал.	3600	0.62	–
	Сталь ШХ15	3600	0.79	–
	Сталь У13	4800	0.8	–
	Сталь ЕХ9К	12800	0.82	–
	Сталь 12КМВ	20000	1.05	–
	Сталь ЮДНК (магнито)	48000	1.23	–
	2ФК (Со–феррит)	144000	0.3	–
	Co_5Sm	272000	0.94	–
	ПлК (платинакс)	320000	0.79	–

2.3. Физические основы магнитопорошковой дефектоскопии

2.3.1. Общие положения [9]

Любой процесс неразрушающего контроля (НК) (**nondestructive testing**) состоит из нескольких основных операций: воздействия на объект контроля (ОК) каким-либо физическим полем; получения (преобразования) информации и обработки информации с принятием соответствующего решения. Физическое поле определяет вид НК, а использование того или иного преобразования информации в данном виде НК – метод этого вида НК. При магнитном виде контроля в качестве

физического поля, воздействующего на объект, используется магнито-статическое поле (магнитные поля создаются постоянными магнитами или катушками с постоянными токами) или квазимагнито-статическое поле (магнитные поля создаются катушками с переменными токами, но с такой частотой, что влиянием вихревых токов можно пренебречь).

Каждый вид НК можно классифицировать по следующим признакам:

- характер взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом (в нашем случае магнитным);
- первичный информативный параметр (табл. 2.2);
- способ получения первичной информации (табл. 2.2).

Могут быть предложены и другие классификации, например, по типу решаемых задач с учетом того, что метод применим в основном к металлам.

Таблица 2.2

Классификация методов магнитного контроля

Признак	Метод
Первичный информативный параметр	Коэрцитивная сила Намагниченность Остаточная индукция Магнитная проницаемость Эффект Баркгаузена
Способ получения первичной информации	Магнитопорошковый Индукционный Феррозондовый Эффект Холла Магнитографический Пондеромоторный Магниторезисторный

С физической точки зрения, металл или металлический сплав обладают характерными упругими, магнитными и электрическими свойствами, которые в простейшем случае описываются упругими константами, магнитной восприимчивостью, электропроводностью и могут быть измерены. С технической точки зрения, представляют интерес такие параметры металлов, как твердость, пластичность, предел прочности, геометрические размеры, наличие дефектов. В магнитных методах контроля используются зависимости, существующие между отдельными физическими (магнитными) свойствами и свойствами, интересными для техники.

2.3.2. Соотношение с другими методами контроля

Каждый метод контроля качества (в том числе магнитные методы в целом и магнитопорошковый метод контроля как наиболее массовый в этой группе) имеет свои достоинства и недостатки, область или области применения и перспективы развития. Нет смысла слишком выделять или излишне критиковать какой-либо метод. Задача организации контроля качества состоит в обоснованном выборе метода или группы методов контроля, исходя из свойств и параметров объекта (свойства и форма материала, технология обработки материала и состояние поверхности, необходимость обнаружения дефектов или контроль структурных характеристик и т. д.). Если бы на сегодняшний день существовал такой вид контроля качества, который позволял бы решать всю существующую гамму практических задач по контролю качества, то этот гипотетический метод постепенно вытеснил бы все остальные методы в науке и промышленности. Поскольку этого не происходит, очевидно, что каждый метод имеет свою область применения, определить которую специалист может на основе понимания физических закономерностей данного метода. В связи с усложнением практических задач, в области контроля качества в последнее время сложилась концепция применения комплексного контроля, т. е. применения нескольких методов (различных физических полей) для наилучшего решения задачи.

«Ниша» каждого из методов определяется особенностью применяемого физического поля. Например, акустический контроль не применяют для обнаружения дефектов, размеры которых сравнимы с длиной акустической волны, а вихретоковый контроль позволяет получить информацию только о поверхностном слое электропроводного изделия, толщина которого определяется глубиной проникновения электромагнитной волны. Ограничение магнитных методов – в их применимости к контролю только ферромагнитных материалов и изделий из них.

2.3.3. Физические основы магнитопорошковой дефектоскопии

Магнитные поля, которые образуются около трещин или каких-либо других физических или магнитных неоднородностей материала, называют магнитными **полями рассеяния (leakage field)**. На рис. 2.3 показаны силовые линии магнитного поля рассеяния, которое образуется над трещиной в постоянном магните. Воздух в полости трещины оказывает большое сопротивление магнитному потоку. Магнитный поток всегда стремится найти путь с наименьшим сопротивлением. Силовые линии магнитного поля деформируются вблизи трещины – рас-

сеиваются, образуя как бы мост над трещиной. На гранях трещины образуются магнитные полюса N' и S' противоположной полярности.

Магнитными полюсами (magnetic poles) называются участки ферромагнитного материала, на которых силовые линии магнитного поля пересекают границу «сталь-воздух».



Рис. 2.3. Магнитное поле рассеяния над трещиной в постоянном магните. N и S – полюса магнита, N' и S' – магнитные полюса на гранях и на поверхности детали вблизи трещины

Если деталь из ферромагнитного материала однородна по своим магнитным свойствам (не имеет дефектов), то силовые магнитные линии будут распространяться в детали без изменения направления (рис. 2.4, а).

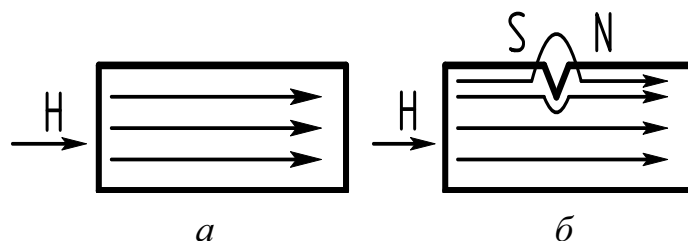


Рис. 2.4. Магнитное поле в ферромагнитном материале при отсутствии (а) и наличии (б) трещины. N и S – магнитные полюса вблизи трещины

Напротив, если неоднородность среды нарушена дефектом (например, трещиной), то магнитные силовые линии деформируются в этих местах. Стремясь обойти эти места с повышенной магнитной проницаемостью, часть силовых линий выходит за пределы детали – рассеивается в воздухе. Там, где силовые линии выходят из ферромагнитной детали в воздух и входят обратно из воздуха в деталь, возникают разноименные магнитные полюса N и S . Эти полюса создают над дефектом свое магнитное поле, которое называется магнитным полем рассеяния дефекта. Оно сохраняется в магнитотвердых материалах даже после снятия внешнего магнитного поля (рис. 2.4, б). Таким образом, всякие магнитные неоднородности (несплошности металла или включения) вносят возмущения в распространение силовых линий магнитного поля.

2.3.4. Выявление магнитного поля рассеяния дефекта с помощью ферромагнитных частиц

Магнитное поле рассеяния, создаваемое дефектом, можно выявить с помощью **ферромагнитных частиц (magnetic particles)**. Всякая ферромагнитная частица в присутствии магнитного поля намагничивается, и на ней образуются разноименные полюса. В однородном магнитном поле оба полюса частицы находятся в магнитном поле одинаковой напряженности, поэтому на частицу действует только вращающий момент, поворачивающий частицу осью наиболее легкого намагничивания вдоль поля.

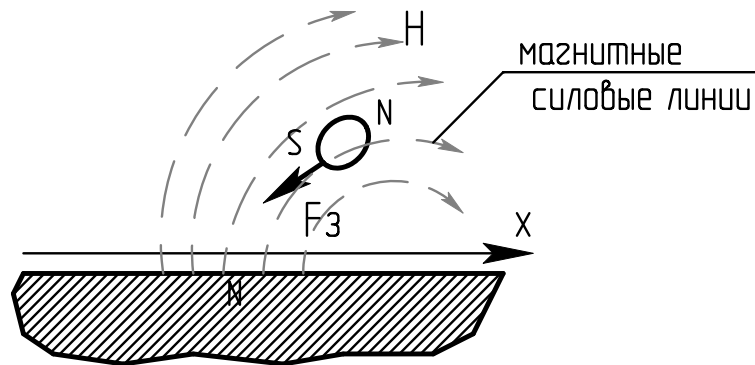


Рис. 2.5. Магнитная частица в неоднородном магнитном поле:
N и *S* – магнитные полюса; *H* – вектор напряженности магнитного поля;
F_з – затягивающая сила действующая на частицу

В неоднородном поле рассеяния дефекта один полюс частицы находится в более сильной части поля, чем другой полюс (рис. 2.5), и на частицу, кроме вращающего момента, действует **затягивающая сила** (сила притяжения разноименных полюсов), значение которой определяется по формуле:

$$F_3 = v \cdot \chi \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}, \quad (2.9)$$

где *v* - объем частицы; χ – магнитная восприимчивость частицы; *H* – напряженность магнитного поля; $\frac{dH}{dx}$ – градиент напряженности магнитного поля; *x* – ось декартовой системы координат.

На рис. 2.6 показаны основные силы, действующие на магнитную частицу при приближении ее к поверхности намагниченной ферромагнитной детали с дефектом. Перемещение частицы происходит под действием результирующей силы *F_{рез}*. Кроме того, намагниченные под действием магнитных полей рассеяния частицы, притягиваются друг к другу, образуя цепочки ориентированные по направления магнитного поля.

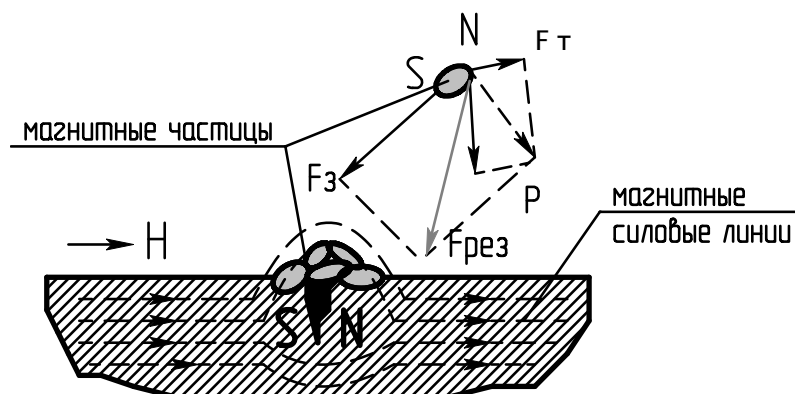


Рис. 2.6. Силы, действующие на магнитную частицу в магнитном поле рассеяния:

P – сила тяжести (вес); $F_з$ – затягивающая сила; $F_т$ – сила трения;
 $F_{рез}$ – результирующая сила; H – напряженность внешнего магнитного поля;
 N и S – магнитные полюса

Отдельные частицы и образовавшиеся цепочечные структуры движутся по направлению к дефекту. В результате происходит скопление магнитных частиц над дефектом в виде валика. Ширина валика порошка больше ширины раскрытия дефекта (трещины), поэтому метод позволяет выявлять мельчайшие дефекты, плохо различимые невооруженным глазом. Форма и размеры скопления магнитных частиц в виде валика (магнитопорошковая индикация) зависят от характера и размеров дефекта. По виду индикации можно определить характер дефекта (несплошности металла). Длина валика порошка сопоставима с длиной дефекта. С другой стороны, этот метод не дает объективной информации о глубине дефекта, поэтому он не пригоден для решения задач дефектометрии, в данном случае для определения глубины и раскрытия дефекта.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Что является важнейшей особенностью магнитного поля?
 - а) Магнитное поле действует на движущиеся и неподвижные электрические заряды.
 - б) Магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды.
 - в) Магнитное поле действует на неподвижные электрические заряды.
2. Линии магнитной индукции – это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора:
 - а) Магнитного момента.
 - б) Напряженности магнитного поля.
 - в) Индукции магнитного поля.

3. Какое из утверждений верно?
 - а) Линии магнитной индукции всегда замкнуты и в нелинейном поле могут пересекаться.
 - б) Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с токами или постоянные магниты.
 - в) Линии магнитной индукции могут быть разомкнуты вокруг постоянных магнитов.
4. Какой величиной является магнитная индукция?
 - а) Векторной.
 - б) Скалярной.
 - в) Может быть и векторной, и скалярной.
5. Какой величиной является собственная намагниченность материала?
 - а) Векторной.
 - б) Скалярной.
 - в) Может быть и векторной, и скалярной.
6. Какой знак имеет магнитная восприимчивость диамагнетиков?
 - а) Положительный.
 - б) Отрицательный.
7. К какой группе материалов относиться ферромагнетик с коэрцитивной силой 3000 А/м?
 - а) Магнитотвердые материалы.
 - б) Магнитомягкие материалы.
8. Как изменяется сила, затягивающая магнитную частицу в поле рассеяния дефекта, с ростом магнитной восприимчивости материала частицы?
 - а) Уменьшается.
 - б) Увеличивается.
 - в) Не изменяется.
9. Как изменяется сила, затягивающая магнитную частицу в поле рассеяния дефекта, с ростом градиента магнитного поля в месте расположения частицы?
 - а) Уменьшается.
 - б) Увеличивается.
10. Какова ширина валика магнитного порошка над дефектом?
 - а) Меньше ширины дефекта.
 - б) Строго равна ширине дефекта.
 - в) Больше ширины дефекта.

Глава 3

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

3.1. Методы создания и расчета магнитных полей

3.1.1. Магнитное поле. Закон Био–Савара–Лапласа (Biot–Savart–Laplace) [9]

Если по проводнику течет ток, то вокруг него образуется некоторое поле, которое можно обнаружить по силам, действующим, например, на другой проводник с током. Так, если по двум параллельным проводникам токи I_1 и I_2 текут в одну сторону, то эти проводники будут ощутимо притягиваться, а если в разные стороны, то отталкиваться (рис. 3.1). Эти силы можно назвать электродинамическими, поскольку они связаны именно с током, т. е. движением зарядов, в отличие от электростатических сил. Но их назвали магнитными, и это название идет, по-видимому, от Эрстеда, обнаружившего их по действию на магнитную стрелку (1817 г.).

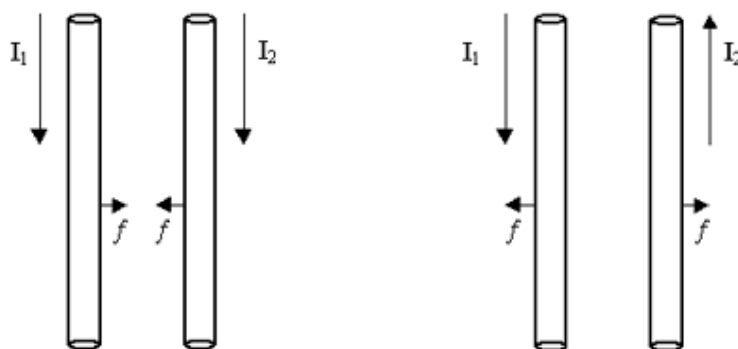


Рис. 3.1. Взаимодействие двух токов, текущих по параллельным проводникам

Магнитное поле может быть **однородным (uniform)** в некотором конечном объеме пространства, а может меняться от точки к точке. Существуют источники поля (например, провод с током) и объекты, на которые это поле воздействует (например, другой провод с током или любой ферромагнетик). Для количественного описания магнитного поля используют величину H , которую называют напряженностью поля и которая является векторной величиной. Величина поля определяется законом Био–Савара–Лапласа: элемент контура Δl (рис. 3.2), по которому течет ток силой I , создает в произвольно избранной точке А магнитное поле напряженностью ΔH :

$$\Delta H = \frac{I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (3.1)$$

где r – расстояние от элемента тока Δl до точки A ; α – угол между r и Δl . Вектор ΔH перпендикулярен плоскости, содержащей Δl и r . Как видно из (3.1), размерность напряженности поля – ампер на метр (А/м). С помощью закона Био–Савара–Лапласа можно вычислить поле различных систем токов в любой точке пространства.

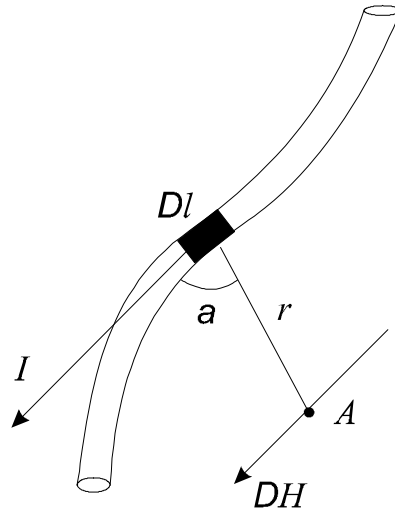


Рис. 3.2. К выводу закона Био–Савара–Лапласа

3.1.2. Поле прямого провода с током

Для вывода аналитического выражения для напряженности магнитного поля прямого провода с током необходимо просуммировать все ΔH от всех Δl (рис. 3.3):

$$H = \sum \frac{I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}.$$

Как видно из рис. 3.3,

$$\Delta l = \frac{r \Delta \alpha}{\sin \alpha}, \text{ откуда, } \frac{\Delta l}{r^2} = \frac{\Delta \alpha}{r \sin \alpha} = \frac{\Delta \alpha}{r_0},$$

поэтому

$$H = \sum \frac{I \sin \alpha \Delta \alpha}{4\pi r_0}.$$

Переходя к интегрированию, получаем:

$$H = \frac{I}{4\pi r_0} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = \frac{I}{2\pi r_0}. \quad (3.2)$$

Вектор H перпендикулярен плоскости чертежа.

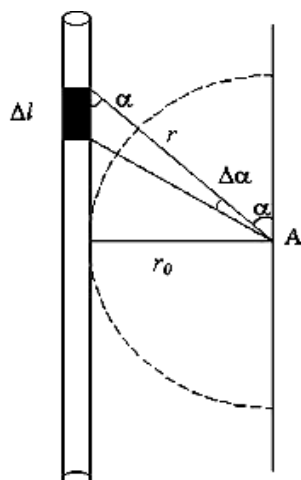


Рис. 3.3. К расчету поля прямого провода с током

3.1.3. Поле кругового тока

Для центра кругового тока (рис. 3.4), поскольку $\alpha = \pi/2$, $\sin\alpha = 1$ и

$$\Delta H = \frac{I \Delta l}{4\pi R^2},$$

$$H = \sum \frac{I \Delta l}{4\pi R^2} = \frac{I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{I}{2R}. \quad (3.3)$$

Направление поля перпендикулярно плоскости чертежа.

Поле на оси кругового тока запишем без вывода (рис. 3.4):

$$H = \frac{IR^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}. \quad (3.4)$$

Вектор поля – в плоскости чертежа.

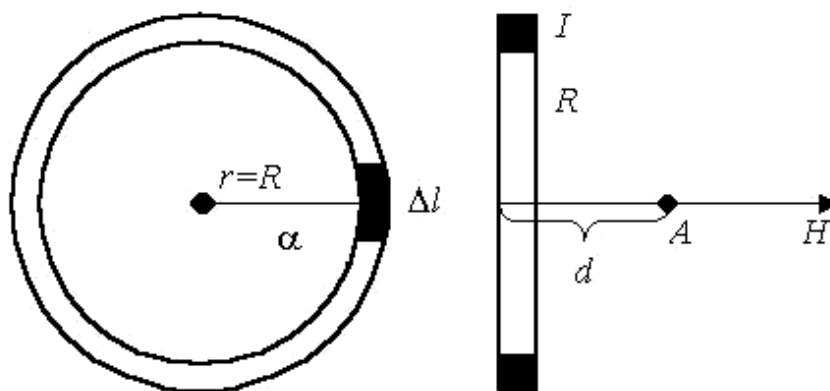


Рис. 3.4. Поле кругового тока

При $d = 0$ (т. е. в центре кругового тока) выражение (3.4) переходит в (3.3). При $d \gg R$, то $H = \frac{IR^2}{2d^3}$, т. е. очень быстро спадает с увеличением диаметра d .

Если в катушке имеется W проводников (но при этом катушка достаточно тонкая, т. е. размеры ее сечения много меньше размера R), то в формулу (3.4) необходимо добавить множитель W . Приведенные соотношения показывают, что поле круглой катушки обладает большой неравномерностью как по оси, так и в плоскости катушки. С точки зрения контроля качества это означает, что объект контроля, помещенный внутрь короткой катушки, будет иметь в разных точках поверхности разное значение напряженности (а следовательно, и индукции) поля. Поэтому будет трудно отделить изменения индукции поля, вызванные изменением параметров объекта контроля от собственной неоднородности магнитного поля катушки. По этой причине в технике магнитного контроля обычно применяются намагничивающие устройства, создающие относительно равномерное магнитное поле в известной зоне.

3.1.4. Поле на оси соленоида

Для обозначений, показанных на рис. 3.5, напряженность поля на оси соленоида (поле направлено вдоль оси X),

$$H = \frac{WI}{2l} \left[\frac{\frac{l}{2} + d}{\sqrt{\left(\frac{l}{2} + d\right)^2 + R^2}} + \frac{\frac{l}{2} - d}{\sqrt{\left(\frac{l}{2} - d\right)^2 + R^2}} \right]. \quad (3.5)$$

Эта формула весьма важна для магнитной дефектоскопии, т. к. соленоиды употребляются для намагничивания изделий весьма широко. Часто пользуются упрощенным вариантом выражения (3.5), считая соленоид бесконечно длинным. При этом $l \gg d$ и $l \gg R$, тогда

$$H = \frac{WI}{l}, \quad (3.6)$$

т. е. поле соленоида пропорционально току I и числу витков W на единицу длины l соленоида. В центре соленоида ($d = 0$)

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

на конце соленоида ($d = l/2$)

$$H = \frac{WI}{2} \frac{1}{\sqrt{l^2 + R^2}}, \quad (3.7)$$

при $l \gg R$

$$H = \frac{WI}{2l}, \quad (3.8)$$

то есть на конце длинного соленоида поле в 2 раза меньше, чем в середине. Если $R \gg l$, то (3.5) переходит в (3.3) с соответствующим числом витков.

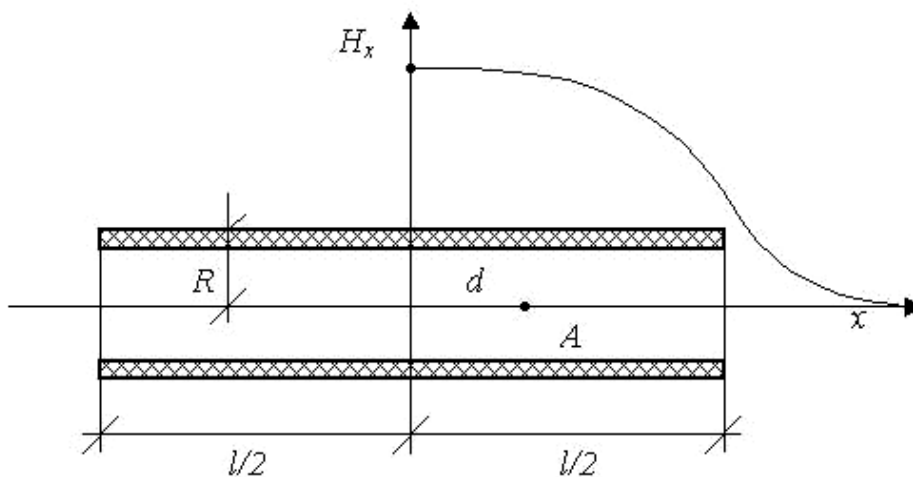


Рис. 3.5. Поле на оси соленоида

3.1.5. Поле проводника конечного сечения

В практике магнитной дефектоскопии для контроля изделий цилиндрической формы часто применяют **циркулярное намагничивание (circular magnetization)**, когда пропускают ток непосредственно по изделию. При этом поле в некоторой точке A , расположенной на расстоянии r_0 от центра цилиндра, рассчитывается по формуле (3.2). Поле H_r внутри цилиндра (рис 3.6, *a*) создается током $I_r = jS_r$, где плотность тока $j = I/\pi R^2$, а площадь сечения внутреннего цилиндра радиусом r определяется как $S_r = \pi r^2$, поэтому

$$H_r = \frac{I r^2}{R^2} \frac{1}{2\pi R} = \frac{I r}{2\pi R^2}. \quad (3.9)$$

Таким образом,

$$H = 0 \text{ при } r = 0;$$

$$H = I r / 2\pi R^2 \text{ при } r \leq R;$$

$$H = I / 2\pi r \text{ при } r \geq R.$$

График этой функции показан на рис. 3.6, *a*.

Для контроля труб также применяется циркулярное намагничивание. Рассуждая аналогично предыдущему, получаем:

$$1. H = 0 \text{ при } r \leq R_1.$$

$$\begin{aligned}
& 2. H = I/2\pi r \text{ при } r \geq R_2. \\
& 3. H = \frac{I(r^2 - R_1^2)}{2\pi r(R_2^2 - R_1^2)} \text{ при } R_1 \leq r \leq R_2.
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

График этой функции показан на рис. 3.6, б.

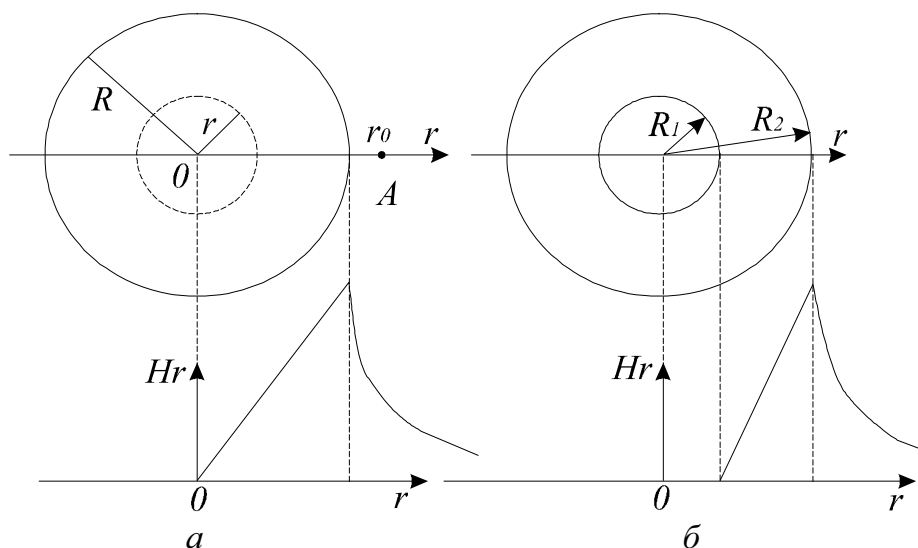


Рис 3.6. Поле тока, текущего по цилиндру (а) и по трубе (б)

3.2. Намагничивание тел. Поле рассеяния дефекта

3.2.1. Намагничивание тел

Намагничивание является обязательной процедурой во всех методах магнитного контроля, при этом на практике используются, как правило, средние и сильные магнитные поля (доводящие ферромагнетик до состояния технического насыщения).

Магнитные свойства железа и его сплавов могут меняться в широких пределах в зависимости от структуры, фазового состава, величины зерна металла, наличия внутренних напряжений и т. д. Различают ферромагнитную (**феррит – ferrite**) и парамагнитную (**аустенит – austenite**) фазы железа. Безуглеродистые сплавы железа, а также аустенитные стали обычно парамагнитны – содержат лишь небольшое количество феррита (α -фазы), поэтому для их магнитного насыщения требуются большие намагничивающие поля (до 1 000 000 А/м). Для обычных конструкционных мало- и среднелегированных сталей, у которых преобладает ферромагнитная фаза (феррит, **мартенсит – martensite**), а количество аустенита не превышает 10–15%, магнитное насыщение достигается уже в полях $H \approx 100\,000$ А/м. В технике магнитопорошкового контроля используются намагничивающие поля в диапазоне от 2000 до 20 000 А/м. Определяя изменение магнитных характеристик сталей,

можно определить количественное соотношение их фаз, например, содержание аустенита и феррита, а также исследовать состояние сталей после термообработки, сварки, прокатки и т. д.

3.2.2. Особенности поведения ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях

При внесении ферромагнетика в переменное магнитное поле в нем возникают вихревые токи, создающие свое собственное электромагнитное поле. Вихревые токи, по правилу Ленца, стремятся противодействовать изменению внешнего магнитного поля. Это приводит к неравномерному распределению индукции и напряженности магнитного поля, а также электрического поля по сечению образца. Амплитуда B и H убывает с удалением от его поверхности вглубь по экспоненциальному закону $H_z = H_0 e^{-kz}$, где H_z – амплитуда напряженности магнитного поля на некотором расстоянии z от поверхности образца (на поверхности $H_z = H_0$); k – коэффициент затухания, m^{-1} ; $k = \sqrt{2\pi f \sigma \mu \mu_0}$, здесь f – частота электромагнитных колебаний, Гц; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; μ – относительная магнитная проницаемость. По мере увеличения частоты, электрической проводимости и магнитной проницаемости и удаления вглубь от поверхности детали происходит затухание электромагнитного поля. Поэтому высокочастотные электромагнитные поля распространяются фактически в тонком поверхностном слое, а в глубине электропроводного объекта они пренебрежимо малы, причем в ферромагнитных деталях затухание поля происходит значительно сильнее. Это явление носит название **поверхностного эффекта или скин-эффекта (skin-effect)**. Переменное поле обычно создают с помощью катушек различной формы (в том числе и соленоидов), питаемых переменным током. Ток в катушке зависит от приложенного напряжения, активного (R) и реактивного ($\omega L = 2\pi fL$) сопротивления катушки (ω – круговая частота, Гц; L – индуктивность, Гн). Общее сопротивление катушки $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. При внесении в поле катушки магнитного или немагнитного тела с электропроводностью σ , отличающейся от нуля, активное и реактивное сопротивления катушки изменяются, что приводит к изменению силы тока в катушке. Значения R и L зависят от физических свойств внесенного тела, а также от его геометрии и степени дефектности (наличие нарушений сплошности), поэтому изменение амплитуды и фазы намагничивающего тока содержит информацию о качестве изделия и может быть использовано для контроля его физико-механических свойств, контроля сплошности или геометрических размеров.

3.2.3. Размагничивающее действие полюсов образца

Все магнитные характеристики, рассмотренные в главе 2, приведены при отсутствии размагничивающего поля, обусловленного геометрической формой образца. Магнитные характеристики сталей и сплавов, которые вы найдете в справочной литературе, измеряют при помощи известной стандартной процедуры на образцах замкнутой формы (например, образец в форме тороида), в которых магнитный поток замкнут внутри образца, а магнитные потоки рассеяния (часть потока, выходящая в воздух) минимальны. Размагничивающее поле возникает в ферромагнетике вследствие поляризации в разомкнутом магнитопроводе. На разомкнутых концах магнитопровода образуются магнитные заряды противоположного знака (магнитные полюсы), которые и создают размагничивающее поле напряженностью H_p , направленное в ферромагнетике навстречу намагничивающему полю H_o (рис. 2.7). В результате истинное значение напряженности магнитного поля на поверхности детали

$$H_i = H_o - H_p . \quad (3.11)$$

Напряженность размагничивающего поля пропорциональна намагниченности J разомкнутого образца и может быть определена расчетным путем, если известен коэффициент пропорциональности N , называемый **размагничивающим фактором (demagnetizing factor)**, из выражения $H_p = NJ$.

Размагничивающий фактор N зависит в большей степени от формы тела и его положения в магнитном поле и менее зависит от собственных магнитных характеристик материала, из которого изготовлена деталь. В большинстве случаев тело намагничивается неоднородно, значения N и J в разных точках различны, поэтому пользуются некоторыми усредненными значениями N .

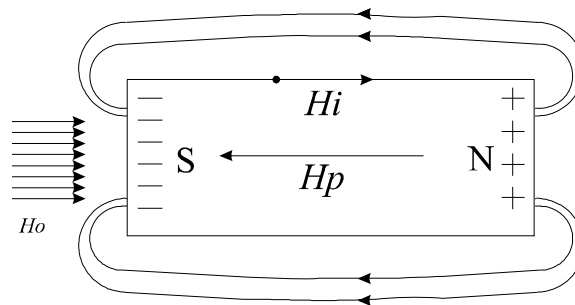


Рис. 3.7. Размагничивающее действие полюсов при продольном намагничивании образца

Однородно по всему внутреннему объему намагничиваются только тела, форма которых описывается эллипсоидами вращения, для них известны точные значения N . Для тел другой формы значения N индивидуальны. Для шара коэффициент размагничивания $N = 1/3$, для цилиндрических деталей (включая проволоки) диаметром d , длиной l , намагничиваемой в направлении l , значения N приведены ниже в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Отношение l/d	0	1	2	5	10	20	50	500
N	1	0,27	0,14	0,04	0,017	0,006	0,0013	$13 \cdot 10^{-6}$

Из сказанного выше следует, что основные магнитные характеристики любого ферромагнитного **материала** определяются основной кривой намагничивания и предельной петлей гистерезиса, но для **тела**, изготовленного из того же **материала**, эти характеристики могут существенно отличаться, т. е. правомерно говорить об основной кривой намагничивания и предельной петле гистерезиса **тела**. На рис. 3.8 показано, как можно перестроить кривую намагничивания для вещества в кривую намагничивания для тела.

Построение проведено для точки A , соответствующей точке $H_i = OD$. Проведем прямую AC так, чтобы $\operatorname{tg} \theta = N$. Тогда $OC = OD + DC = H_i + B_a N = H_i + H_o$. На кривой намагничивания тела индукции B_a соответствует точка F . Кривая намагничивания тела изобразится кривой 2 – чем больше будет коэффициент N , тем более пологой будет эта кривая. Такое же построение можно провести для всей петли гистерезиса, при этом легко убедиться, что значение коэрцитивной силы H_c и площади предельной петли гистерезиса остается неизменным для вещества и тела, а вот значение остаточной индукции B_r для тела всегда меньше, чем для вещества. Отсюда следует, что **коэрцитивная сила и площадь предельной петли гистерезиса (т. е. потери на гистерезис) являются единственными магнитными параметрами, не зависящими от формы объекта контроля.**

Поскольку кривая намагничивания для материала становится более пологой, то действие размагничивающего механизма можно условно объяснять кажущимся снижением магнитных свойств материала, для чего применяется параметр под названием **магнитная проницаемость тела μ_m .**

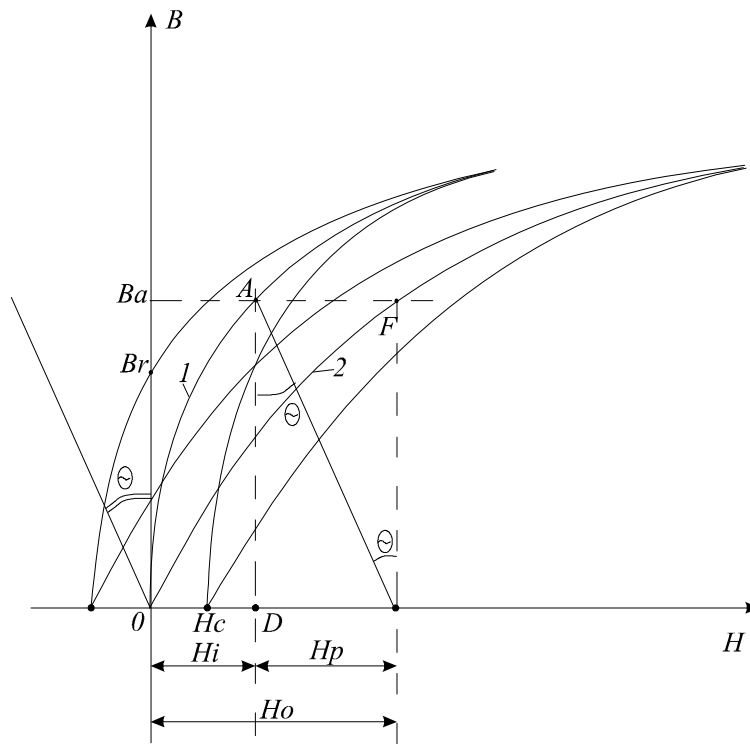


Рис. 3.8. Построение кривой намагничивания тела (2) по кривой намагничивания материала (1)

Магнитная проницаемость тела μ_m и магнитная проницаемость материала μ связаны соотношением

$$\mu_m = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + N}. \quad (3.12)$$

Отсюда видно, что если коэффициент размагничивания N велик по сравнению с обратной величиной $1/\mu$, то проницаемость тела μ_m независимо от истинной проницаемости μ определяется главным образом значением N , и наоборот, при $N = 0$ получается равенство $\mu_m = \mu$. При более подробном исследовании выявляется, что коэффициент размагничивания N зависит не только от соотношения размеров цилиндрического образца $p = l/d$, но и от магнитной проницаемости материала μ , причем он получается тем большим, чем больше μ . Поэтому, в соответствии с (3.12), проницаемость тела тоже получается сложной функцией и от отношения размеров p и от проницаемости материала μ .

В простейшем случае для диапазона $1 \leq p \leq 10$ можно пользоваться эмпирической формулой $\mu_m = 3p$, которая показывает, что в данном

случае собственными магнитными свойствами материала можно вообще пренебречь.

Так, например, если $p = 3$, то при намагничивании деталь будет вести себя в магнитном поле так, как будто магнитная проницаемость материала равна 9, хотя действительное значение относительной проницаемости материала может находиться в диапазоне 200...2000. Для того, чтобы довести такую деталь до технического насыщения, требуется очень мощное магнитное поле.

Каким же образом на практике намагничивают и проводят контроль деталей с большим размагничивающим фактором? Можно предложить три пути решения проблемы.

1. Применить специальное намагничивающее устройство, состоящее из магнитопровода с намагничивающей катушкой, причем намагничиваемая деталь должна являться составной частью этого магнитопровода. При условии хорошего механического контакта с торцами детали будет реализовано намагничивание в замкнутой магнитной цепи, при этом магнитные потоки рассеяния и коэффициент размагничивания будут минимальными.

2. Если контролируемые детали имеют простую форму с ровными торцами (например, ролики подшипников), то при намагничивании необходимо прижать детали друг к другу торцами и намагничивать все детали одновременно. Количество намагничиваемых деталей должно удовлетворять следующему условию – $L_c/d \geq 10$, где L_c – суммарная длина деталей, d – диаметр одной детали. В случае, если намагничиванию подвергаются детали не круглого сечения, применяют понятие $d_{эkv}$ – эквивалентный диаметр детали. В этом случае площадь сечения детали произвольной формы приравнивают к площади эквивалентной окружности $S_{дет} = \pi d_{эkv}^2/4$, откуда рассчитывается значение $d_{эkv}$. После намагничивания цепочку деталей можно разнять и проводить контроль каждой детали отдельно.

3. Если деталь имеет большой размагничивающий фактор, но форма торцов такова, что прижать детали друг к другу невозможно, изготавливают специальные удлиняющие наконечники. Размеры наконечников (длину) выбирают таким образом, чтобы свести к минимуму размагничивающий фактор, в качестве материала выбирают магнитомягкую сталь.

3.2.4. Поле рассеяния дефекта (Leakage Field Of Flaw)

Для лучшего понимания этого вопроса необходимо предварительно рассмотреть явление преломления магнитных силовых линий. По аналогии с преломлением света, при переходе потока из одной среды в другую, с иным коэффициентом преломления, магнитные силовые линии на границе раздела двух веществ с различными магнитными проницаемостями тоже испытывают внезапное изменение направления, что можно назвать **преломлением (refraction)** магнитных силовых линий.

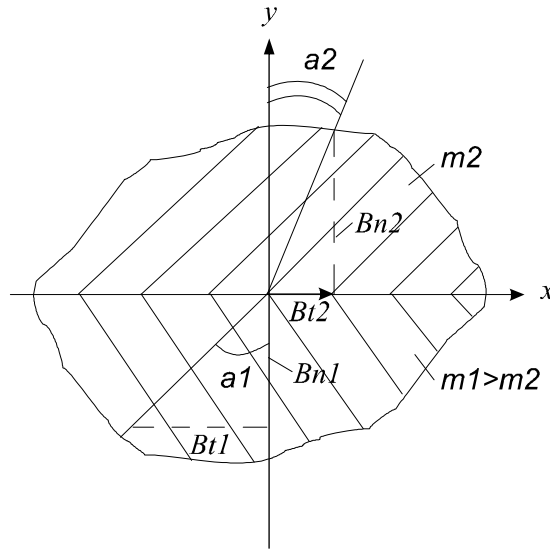


Рис. 3.9. Схема к выводу закона преломления магнитных силовых линий на границе раздела двух сред

Для количественного описания этого эффекта рассмотрим силовую линию магнитного поля (рис. 3.9) вблизи границы раздела двух ферромагнитных сред с проницаемостями μ_1 и μ_2 , причем $\mu_1 > \mu_2$.

Для вывода закона преломления используем тот факт, что нормальная (normal) составляющая индукции поля не имеет разрыва на границе раздела

$$\overline{B_{n1}} = \overline{B_{n2}} \quad (3.13)$$

и, во-вторых, **тангенциальная (tangential)** составляющая напряженности поля тоже непрерывна

$$\overline{H_{t1}} = \overline{H_{t2}}. \quad (3.14)$$

Тангенциальная составляющая магнитной индукции в обоих веществах определяется по формулам:

$$B_{t1} = \mu_1 H_{t1} \quad (3.15)$$

$$B_{t2} = \mu_2 H_{t2}, \quad (3.16)$$

откуда с учетом (3.14)

$$\frac{B_{t1}}{B_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (3.17)$$

Если обозначить углы входа и выхода силовых линий по отношению к нормали границы раздела через α_1 и α_2 , то

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{B_{t1}}{B_{n1}}; \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{B_{t2}}{B_{n2}}, \quad (3.18)$$

откуда

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{B_{t1}}{B_{n1}} \frac{B_{n2}}{B_{t2}}. \quad (3.19)$$

Согласно (3.13), вблизи границы раздела двух сред $B_{n1} = B_{n2}$, откуда

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{B_{t1}}{B_{t2}} = \frac{H_{t1} \mu_1}{H_{t2} \mu_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (3.20)$$

Выражение (3.20) называется законом преломления магнитной силовой линии на границе двух сред. Из него следует, что если $\mu_1 > \mu_2$, как показано на рис 3.9, то $\alpha_1 > \alpha_2$. Если $\mu_1 \gg \mu_2$, то $\alpha_1 \gg \alpha_2$ либо $\alpha_2 \rightarrow 0$. Таким образом, закон преломления сводится к тому, что при входе в вещество с большей магнитной проницаемостью силовые линии отклоняются дальше от перпендикуляра к границе раздела, а при входе в вещество с меньшей магнитной проницаемостью они, наоборот, приближаются к этому перпендикуляру.

Для техники важное значение имеет переход магнитного потока из стали в воздух и наоборот. У магнитомягких сталей относительная магнитная проницаемость имеет порядок значений от 100 до 1000. Если принять, что на рис. 2.9 среда 1 – сталь с $\mu_1 = 100$, а среда 2 – воздух с $\mu_2 = 1$, и если принять $\alpha_1 = 45^\circ$, то нетрудно рассчитать, что $\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,01$, откуда $\alpha_2 \cong 0,5^\circ$. Следовательно, силовые линии выходят в воздух почти перпендикулярно к поверхности стали при условии, что в стали они не подходили к ее поверхности слишком полого. Если же $\alpha_1 \rightarrow 90^\circ$, т. е. силовые линии в стали идут почти параллельно ее поверхности, то и в воздух они выходят почти по касательной.

Рассмотрим характер изменения однородного магнитного поля в ферромагнитной среде с проницаемостью $\mu_1 \gg 1$ при наличии в ней дефекта типа нарушения сплошности, заполненного веществом, магнитная проницаемость которого μ_2 меньше μ_1 (например, окалиной, пылью или просто воздухом) или, наоборот, больше μ_1 (например,

включения феррита в чугуна). В однородном магнитном поле H_0 ферромагнетик приобретает намагниченность J_u , значительно большую намагниченности материала, заполняющего трещину. По этой причине часть магнитных силовых линий обрывается на одной грани дефекта и снова начинается на другой грани. Конец каждой линии можно рассматривать как некоторый положительный **магнитный заряд (magnetic charge)**, поэтому на одной грани будут положительные, а на другой – отрицательные магнитные заряды. Эти заряды обязаны своим появлением размагничивающему действию граней дефекта. Каждый магнитный заряд создает магнитное поле, направленное из него как из центра. Суммарное поле магнитных зарядов H_d называют **полем дефекта**. Поле H_d имеет сосредоточенный характер, поэтому результирующее поле, которое является суперпозицией внешнего намагничивающего поля H_0 и поля дефекта H_d , становится неоднородным и имеет сложную топографию.

На рис. 3.10 показано типичное поле рассеяния над поверхностным дефектом в виде прямоугольной канавки шириной $2b$ и глубиной h , а на рис. 3.10, б – топография тангенциальной H_{td} и нормальной H_{nd} , составляющих напряженности поля этого дефекта. Кружочки с плюсами и минусами обозначают положительные и отрицательные магнитные заряды, возникающие на гранях дефекта.

Если над поверхностью изделия перемещать индикатор магнитного поля, то над трещиной индикатор укажет на возрастание поля (рис. 3.10, б). В дефектоскопии используют индикаторы магнитного поля двух типов: **полемеры** – для измерения абсолютного значения напряженности магнитного поля и **градиентометры (gradiometer)** – для считывания разности напряженности поля в двух точках в направлении перемещения индикатора. В зависимости от конструктивных особенностей индикаторы обоих типов регистрируют нормальную либо тангенциальную составляющую поля рассеяния дефекта. Поэтому для анализа полей дефектов используют нормальную H_n и тангенциальную H_t , составляющие напряженности поля и их пространственные производные dH_{nd}/dx и dH_{td}/dx по направлению перемещения индикатора.

Амплитудные значения составляющих поля H_{td} и H_{nd} зависят от размеров дефектов, их ориентации по отношению к внешнему полю, соотношения проницаемостей материала и дефекта, а также от расстояния до точки наблюдения. С увеличением глубины дефекта растут амплитуды составляющих поля дефекта и амплитуды пространственных производных. При возрастании ширины дефекта растут амплитуды

ды составляющих поля дефекта, а амплитуды пространственных производных падают.

Вектор намагничивающего поля должен быть направлен перпендикулярно плоскости дефекта, тогда поле дефекта по направлению совпадает с внешним полем и будет иметь максимальное значение. Если же направление намагничивающего поля совпадает с плоскостью дефекта, то магнитный поток будет огибать дефект, поле дефекта будет значительно слабее и, возможно, окажется недостаточным для регистрации. Следует подчеркнуть, что магнитное поле рассеяния возникает не только над дефектами, но и над любыми локальными изменениями однородности магнитных свойств материала. Интенсивность поля рассеяния в этом случае зависит от соотношения проницаемостей. Чем выше остаточная индукция B_r и меньше дифференциальная магнитная проницаемость μ_d материала, тем больше напряженность поля рассеяния дефекта при прочих равных условиях. С приближением точки наблюдения к поверхности материала напряженность поля дефекта также возрастает.

Практически измерение составляющих поля дефекта можно проводить на небольшом расстоянии от поверхности материала (не более 1...2 мм в зависимости от размеров дефекта). При больших расстояниях амплитуда поля дефекта становится слишком малой.

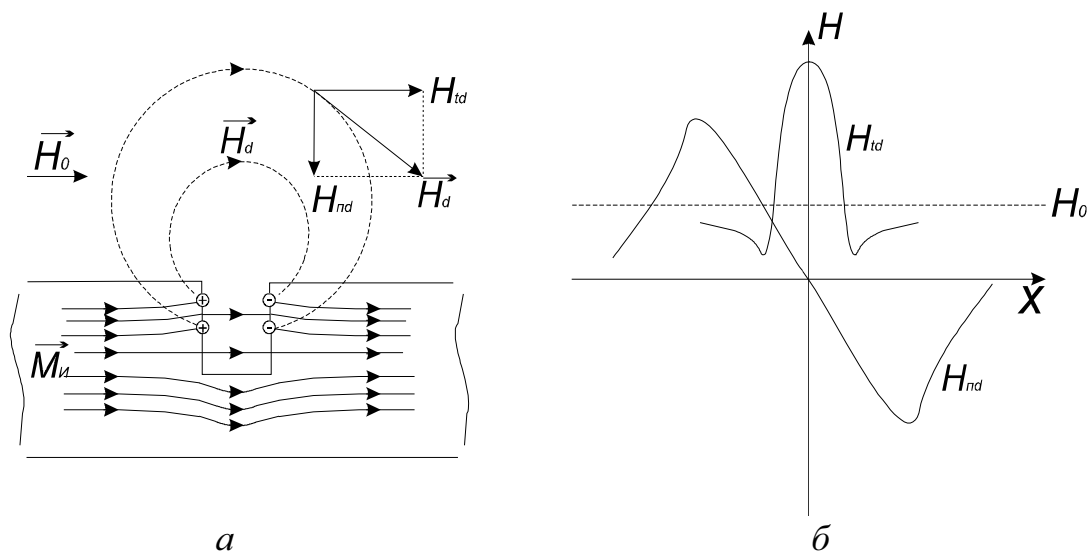


Рис. 3.10. Распределение намагниченности в ферромагнитном изделии и поля рассеяния H_d над поверхностным дефектом (а), а также топография тангенциальной H_{td} и нормальной H_{nd} составляющих напряженности поля поверхностного дефекта (б)

Следует также отметить, что ширина зоны, в которой присутствует тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта, превышает ширину дефекта, что является благоприятным фактором при обнаружении дефектов. Например, при магнитопорошковой дефектоскопии

это приводит как бы к визуальному увеличению ширины дефекта, после чего он легко обнаруживается оператором.

Если дефект залегает внутри материала (т. е. он перекрыт сверху ферромагнитной перемычкой), то он называется внутренним или подповерхностным (при небольших глубинах залегания). По сравнению с поверхностным дефектом форма тангенциальной и нормальной составляющих дефекта принципиально не меняется, только показанные на рис. 3.10, б отрицательные экстремумы тангенциальной составляющей практически исчезают, при этом очевидно, что с ростом глубины залегания дефекта амплитуда поля рассеяния дефекта падает.

При намагничивании в переменном магнитном поле процесс отличается тем, что может быть получена информация о поверхностных дефектах и о подповерхностных дефектах, залегающих на глубине не более 1...2 мм. На больших глубинах залегания, вследствие влияния поверхностного эффекта, напряженность магнитного поля в материале резко падает.

3.2.5. Способы намагничивания тел

Для намагничивания деталей применяют постоянный, переменный и импульсный токи. Дефекты оптимально обнаруживаются, когда направление намагничивания контролируемой детали перпендикулярно преобладающему направлению дефектов. Для создания оптимальных условий контроля применяют три способа намагничивания:

- полюсное (рис. 3.11);
- циркулярное (рис. 3.12);
- комбинированное (рис. 3.13).

3.2.5.1. Полюсное намагничивание (Pole Magnetization)

Полюсное намагничивание называют:

- **продольным (longitudinal)**, если намагничивающее поле H направлено вдоль оси детали (все варианты на рис. 3.11);
- **поперечным (transverse)**, если намагничивающее поле H направлено перпендикулярно продольной оси проверяемой детали.

Полюсное намагничивание проводят:

- намагничивающими устройствами на постоянных магнитах (рис. 3.11, а);
- с помощью переносного электромагнита (возможно применение постоянного и переменного тока – рис. 3.11, б);
- с применением катушки (может представлять несколько витков гибкого кабеля – рис. 3.11, в).

Намагничивающие устройства на постоянных магнитах и переносные электромагниты используют для контроля небольших участков крупногабаритных деталей или деталей в конструкции. Ширина намагниченной зоны равна ширине полюсных наконечников электромагнита, а длина этой зоны несколько меньше (практически на 30...50 мм) расстояния между полюсными наконечниками, т. к. около наконечников отношение нормальной и тангенциальной составляющих намагничивающего поля $H_n/H_t \gg 1$. Это означает, что если дефект оказался под полюсным наконечником или вблизи от него, то он не будет намагничен оптимальным образом и его поле рассеяния будет недостаточным для регистрации, т. к. в формировании валика магнитного порошка над дефектом важную роль играет тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта, а нормальная составляющая не принимает участие в этом процессе. Поэтому при продольном намагничивании существует дополнительное условие намагничивания: при $H_n/H_t > 3$ дефекты не выявляются или выявляются неудовлетворительно. На практике можно использовать следующую рекомендацию: если расстояние между осями полюсов магнита или электромагнита равно L , то длина зоны контроля равна $L/2$.

При продольном намагничивании переносными электромагнитами необходимо обеспечить хороший контакт полюсов магнита с поверхностью детали и отсутствие воздушных зазоров или немагнитных покрытий на поверхности детали. Наличие зазоров и покрытий может существенно снизить индукцию в магнитной цепи, частью которой является деталь.

Если при намагничивании соленоидом длина детали намного превышает длину соленоида, то предварительно деталь размечают карандашом или мелом на контролируемые участки и контроль проводят последовательно по участкам. При выборе длины участка учитывают магнитные характеристики материала детали и напряженность в центре соленоида (помня, что напряженность на торце соленоида в 2 раза ниже).

При намагничивании соленоидом коротких деталей (при соотношении длины к диаметру менее 10) обязательно необходимо учитывать размагничивающий фактор. Способы намагничивания таких деталей приведены в разделе 3.2.3. Ориентация дефектов, оптимально выявляемых при полюсном намагничивании, показана на рис. 3.11.

Полюсное намагничивание (Pole magnetization)

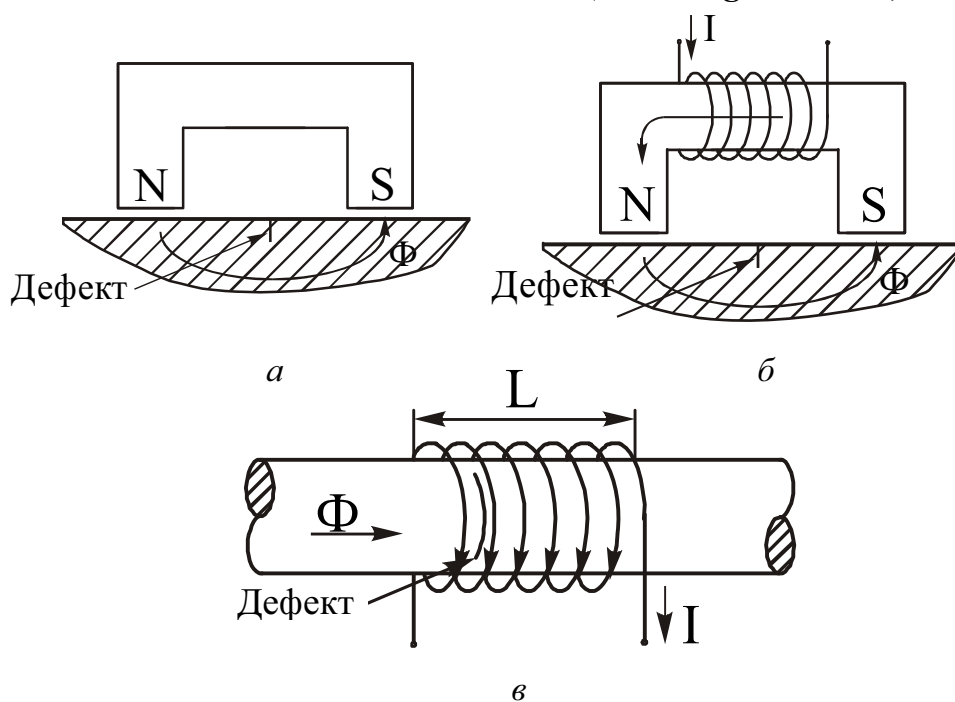


Рис. 3.11. Способы полюсного намагничивания:

- а) постоянным магнитом (применяется при обнаружении дефектов в балках, элементах стрел решетчатой и коробчатой конструкции, сварных соединениях);
- б) электромагнитом (применяется при обнаружении дефектов в балках, элементах стрел решетчатой и коробчатой конструкции, сварных соединениях);
- в) намагничивающим соленоидом (применяется при обнаружении дефектов типа поперечных трещин в валах, осях, болтах)

3.2.5.2. Циркулярное намагничивание (Circular Magnetization)

Получило свое название от формы линий магнитной индукции, имеющей вид колец вокруг направления тока. Циркулярное намагничивание проводят:

- пропусканием тока непосредственно по детали (рис. 3.12, а);
- пропусканием тока по участку детали с применением электроконтактов (рис. 3.12, б).
- пропусканием тока по центральному проводнику, который продевают через полую деталь или через отверстие в детали (рис. 3.12, в);
- с применением тороидальной обмотки (изделие типа кольца).

При циркулярном намагничивании необходимо знать связь между током и напряженностью поля на поверхности детали.

Циркулярное намагничивание (Circular Magnetization)

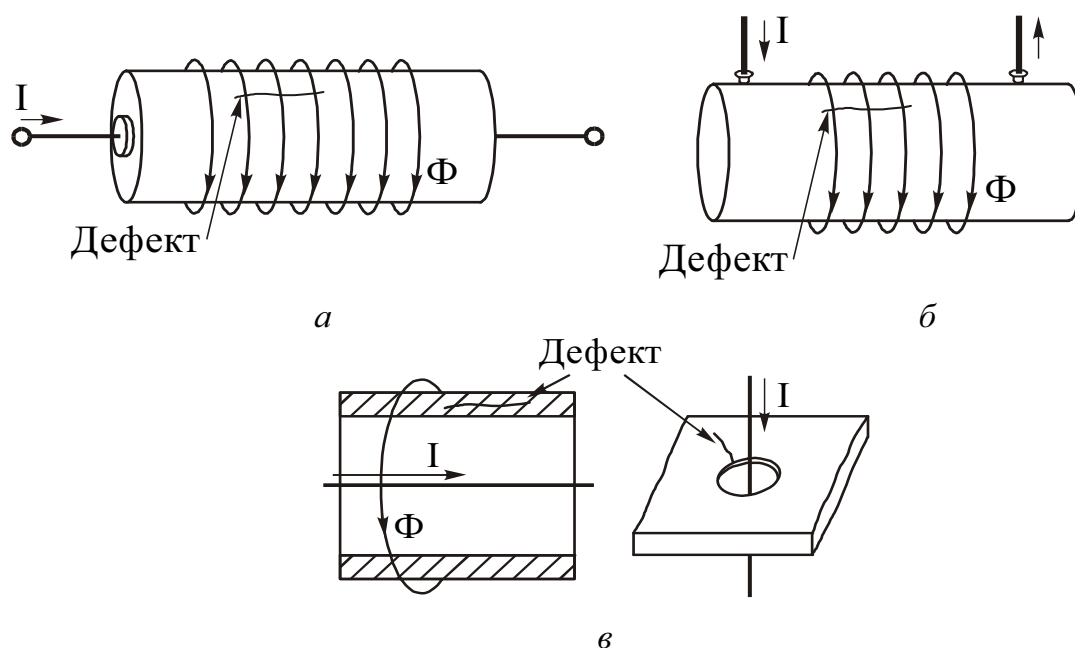


Рис. 3.12. Способы циркулярного намагничивания:

- а) пропусканием тока по всему изделию (оси, валы, длина которых позволяет пропустить ток необходимой величины);
- б) пропусканием тока по контролируемой части изделия (отдельные участки валов, плоских поверхностей, сварных соединений, часто применяется при одностороннем доступе к детали);
- в) с помощью провода с током, помещаемого в отверстие изделия (внутренние и наружные поверхности труб, кольца подшипников, края отверстий)

Для случая на рис. 3.12, а справедливо выражение

$$I_{\text{ц}} = \pi D_{\text{ц}} H, \quad (3.21)$$

где $I_{\text{ц}}$ – значение циркулярного тока; $D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра; H – напряженность поля (в данном случае тангенциальная составляющая) на поверхности цилиндра. Формула (3.21) применима для случая б на рис. 2.12, если расстояние между токовыми электродами не менее чем в 5 раз превышает диаметр детали. Обратите внимание, что длина детали не входит в расчетную формулу.

На рис. 3.12, в показаны варианты циркулярного намагничивания деталей с отверстиями. Этот удобный способ часто применяют на практике для обнаружения дефектов на внутренней поверхности деталей трубчатой формы и на краях отверстий. В этом случае для расчета циркулярного тока применяется формула

$$I_{\text{ц}} = \pi D_{\text{отв}} H, \quad (3.22)$$

где $D_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия или внутренний диаметр трубчатой детали.

В случае контроля детали прямоугольного сечения (рис. 3.13)

$$I_{\text{ц}} = 2H(a + b), \quad (3.23)$$

где a и b – размеры сечения детали. Для деталей с соотношением $a/b \geq 10$ допустимо упрощение формулы

$$I_{\text{ц}} = 2Ha, \quad (3.24)$$

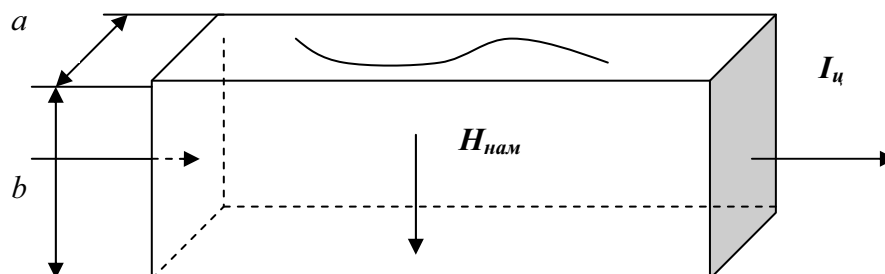


Рис. 3.13. Циркулярное намагничивание детали прямоугольного сечения

Часто вариант намагничивания, приведенный на рис. 3.12, б, применяют при контроле крупногабаритных деталей. В этом случае расстояние между электроконтактами $L_{\text{к}}$ выбирать из условия $75 \text{ мм} \leq L_{\text{к}} \leq 250 \text{ мм}$. На рис. 3.14 показан вид сверху на участок крупногабаритной детали. Здесь 1 и 2 – точки установки электроконтактов. Намагничивающий ток растекается по поверхности металла, при этом считается, что эффективно намагничивается область эллиптической формы (на рис. 3.14 показана пунктиром), причем размер малой оси эллипса составляет $0,6L_{\text{к}}$. Вся эта область намагничена в направлении, перпендикулярном направлению пропускаемого тока, следовательно, при таком способе намагничивания можно эффективно обнаруживать дефекты, направление которых совпадает с направлением тока циркулярного намагничивания.

Полезное практическое правило: В случае, если при контроле известно преобладающее направление возможных дефектов, ток циркулярного намагничивания необходимо пропускать вдоль направления ожидаемых дефектов.

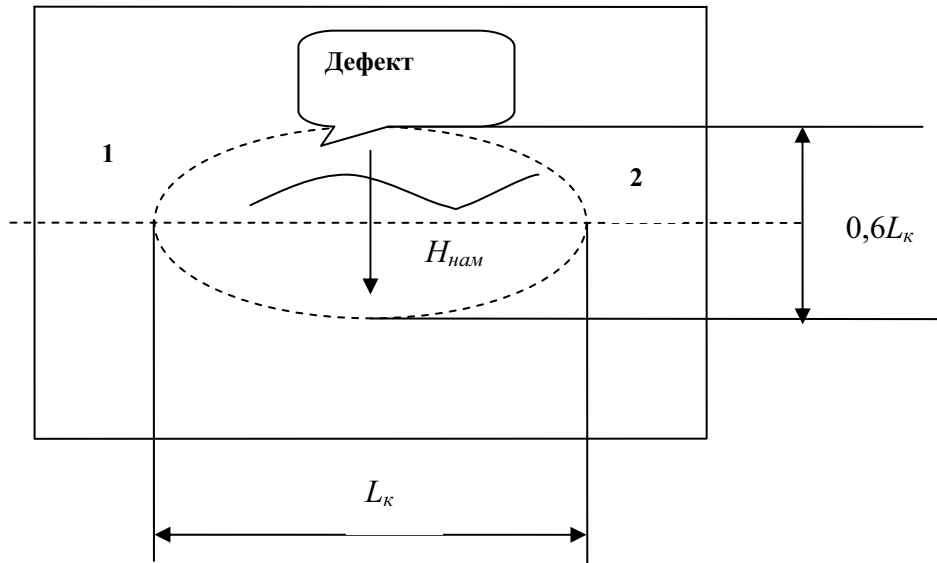


Рис. 3.14. Циркулярное намагничивание участка крупногабаритной детали:
1, 2 – точки установки электроконтактов

Для случая циркулярного намагничивания участка детали также необходимо знать связь между величиной намагничивающего тока и напряженностью магнитного поля на поверхности детали. Поскольку при намагничивании возможно применение как постоянного, так и переменного тока, существует два варианта расчетных соотношений. Для случая постоянного тока

$$I_{ц} = 1,7HL_{к}, \quad (3.25)$$

где $L_{к}$ – расстояние между электроконтактами.

Для случая переменного тока

$$I_{ц} = 2,1HL_{к}. \quad (3.26)$$

При циркулярном намагничивании деталей тороидальной формы намагничивающий циркулярный ток в обмотке $I_{ц}$ связан с напряженностью магнитного поля H на поверхности детали:

$$I_{ц}W = HL_{ср}, \quad (3.27)$$

где W – число витков намагничивающей обмотки; $L_{ср}$ – средняя длина магнитной силовой линии поля в тороидальной детали (определяется с учетом среднего диаметра детали).

Все способы циркулярного намагничивания удобны тем, что в отличие от полюсного намагничивания, здесь мы не сталкиваемся с явлением размагничивающего фактора и можем контролировать детали сложной формы. Недостатком циркулярного намагничивания при пропускании тока по детали является то, что на практике значения токов составляют сотни и тысячи ампер. Это предъявляет повышенные требования к подготовке поверхности детали для обеспечения хорошего

электрического контакта (зачистка поверхности и отсутствие ржавчины и окисных пленок в месте контакта). Сами электроконтакты изготавливают из сплавов цветных металлов (медь, свинец). Форма наконечников обеспечивает поверхность прилегания не менее 10 мм^2 , что снижает вероятность прижогов металла в зоне контакта. Прижоги металла на поверхности детали недопустимы, т. к. в зоне прижогов возникают поверхностные дефекты металла.

3.2.5.3. Комбинированное намагничивание (*Combine Magnetization*)

Осуществляется двумя или несколькими полями, ориентированными различно в пространстве и отличающимися законами изменения во времени. При комбинированном намагничивании результирующий вектор намагничивающего поля поворачивается на угол минимум 90° или вращается в пространстве, поэтому его применяют для выявления разноориентированных дефектов за одну операцию намагничивания. Две схемы комбинированного намагничивания приведены на рис. 3.15. По варианту *а* возможно применение переменного тока I_1 (продольное полюсное намагничивание) и постоянного тока I_2 (циркулярное намагничивание). При этом нетрудно убедиться, что если обеспечить приблизительное равенство напряженности магнитного поля циркулярного и полюсного намагничивания на поверхности детали, то суммарный магнитный поток на поверхности детали будет прецессировать (менять пространственную ориентацию) приблизительно на 90° с частотой переменного тока I_1 . В варианте *б* по изделию пропускают два независимых тока во взаимно перпендикулярных направлениях.

Целесообразность применения того или иного устройства комбинированного намагничивания зависит от параметров имеющегося оборудования, особенностей контролируемой детали (состояния контактных поверхностей для пропускания тока, формы, размагничивающего фактора и т. д.).

На практике такие схемы намагничивания обычно применяют в заводских условиях, что позволяет сократить время при массовом контроле однотипных деталей. При контроле деталей различного сортамента и деталей в полевых условиях дефектоскопист обычно имеет в наличии ограниченное количество намагничивающих устройств. В этом случае комбинированное намагничивание осуществляется намагничиванием детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях **последовательно во времени**, при этом объем контроля удваивается.

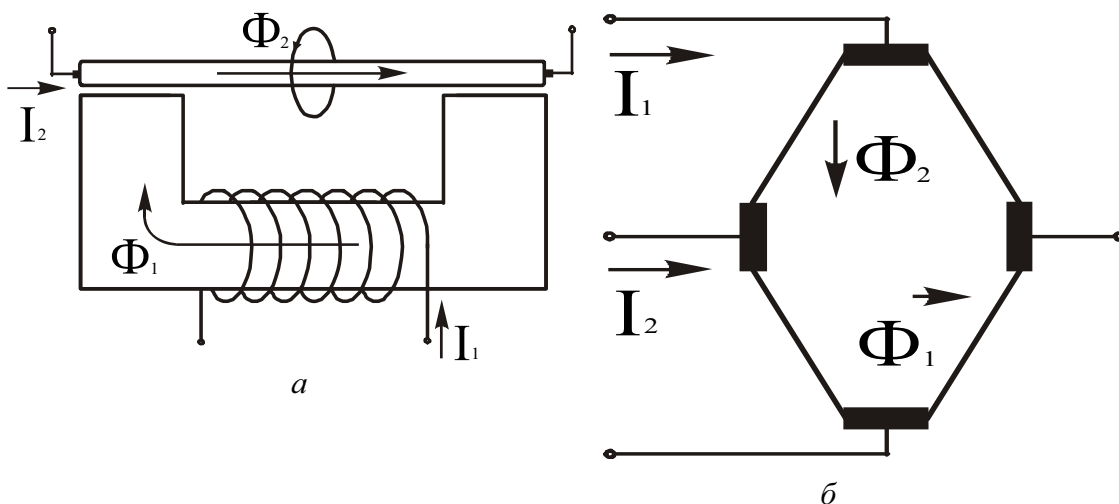


Рис. 3.15. Способы комбинированного намагничивания:

- а) пропусканием через изделие электрического тока I_2 и магнитного потока Φ_1 от электромагнита (выявление дефектов произвольной ориентации в осях, валах);
 б) пропускание по изделию двух (или более) независимых токов I_1, I_2 во взаимно перпендикулярных направлениях (отдельные участки валов, плоских поверхностей, сварных швов)

3.2.6. Способы размагничивания (demagnetizing) тел

Часто по нормативно-технической документации после проведения контрольных операций требуется размагничивание изделий. Действительно, остаточная намагниченность в изделии при дальнейшей эксплуатации может вызвать нежелательные явления: прилипание ферромагнитных частиц, что крайне нежелательно в зубчатых передачах, узлах скольжения, узлах гидравлических и пневматических машин; создание вихревых токов во вращающихся деталях (лопатки турбин), что может вызвать ухудшение балансировки механизма; возникновение мешающих магнитных полей (помехи навигационному оборудованию).

В некоторых случаях (например, после переноски изделия электромагнитными кранами) размагничивание полезно и перед контролем. С другой стороны, размагничивание не требуется, если деталь после контроля будет проходить термообработку (закалку, отпуск). Также не требуется размагничивать после контроля некоторые крупногабаритные изделия – опоры линий электропередач, нефте- и газопроводы, сосуды для хранения нефтепродуктов, т. к. остаточная намагниченность не влияет на их работу.

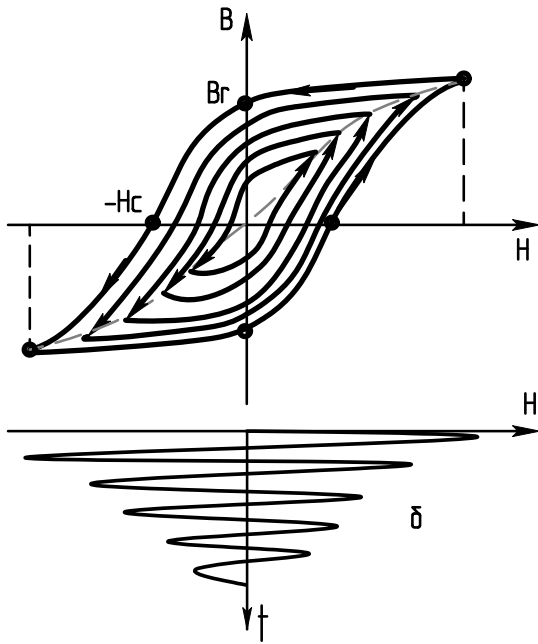


Рис. 3.16. Изменение магнитной индукции при размагничивании:

B – магнитная индукция;
 H – напряженность магнитного поля;
 B_r – остаточная индукция;
 H_c – коэрцитивная сила; t – время

Самый эффективный способ размагничивания – нагрев изделия до температуры выше точки Кюри ($\sim 650 \dots 700$ °С для большинства марок сталей) с последующим охлаждением, после чего деталь становится практически размагниченной. Способ применяется редко, т. к. при нагревании могут произойти необратимые изменения механических свойств стали, а для массивных деталей это еще и дорогой способ. Поэтому на практике размагничивание осуществляется с помощью циклического перемагничивания полем H , величина которого меняется от поля насыщения H_S до $-H_S$. При этом изделие перемагничивается по все уменьшающимся по амплитуде частным циклам петель гистерезиса, имеющим все меньшие и меньшие значения остаточной индукции B_r , пока не будет достигнуто $B = 0$ (рис. 3.17).

Размагничивание можно проводить теми же устройствами, что и намагничивание – соленоидом, гибким кабелем, электроконтактами, электромагнитом. При этом необходимо обеспечить изменение тока по закону, представленному на рис. 3.17.

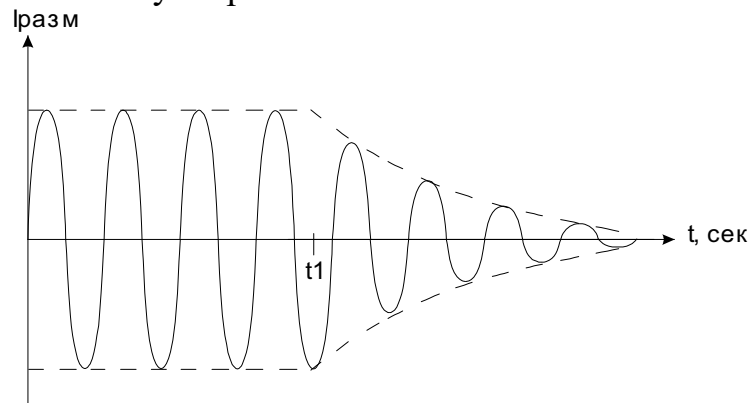


Рис. 3.17. Закон изменения тока в размагничивающем устройстве

В первый момент времени максимальное значение размагничивающего тока $I_{p \text{ макс}}$ должно гарантированно довести изделие до технического насыщения. Затем, начиная с момента t_1 , амплитуда тока постепенно убывает, обеспечивая перемагничивание по частным убывающим циклам вплоть до нуля. Мелкие детали возможно размагничивать токами промышленной частоты, но в массивных деталях за счет влияния вихревых токов внутренние слои останутся неразмагничеными. Поэтому для размагничивания относительно массивных деталей (при толщине более 5 мм) применяют постоянный знакопеременный убывающий ток. Это можно обеспечить, например, коммутированием тока через соленоид с последующим уменьшением амплитуды тока. Процесс размагничивания можно обеспечить и без коммутации тока. Если имеется соленоид с большой напряженностью поля в центре, то изделие можно медленно выдвигать из соленоида в окружающее пространство (где поле затухает до нуля), одновременно вращая изделие вокруг его оси (что даст смену знака напряженности поля). Последний способ применяют при работе в полевых условиях.

Строго говоря, размагнитить деталь до нуля невозможно, т. к. нас окружает собственное постоянное магнитное поле Земли. В зависимости от географического положения напряженность поля Земли составляет 20...30 А/м и в каждой точке имеет определенное направление. Поэтому все окружающие нас ферромагнитные объекты намагничены, как минимум, до напряженности поля Земли H_z . Изделие считается размагниченным, с технической точки зрения, если остаточная напряженность поля в любой точке изделия не превышает тройного значения поля Земли. Такой уровень остаточной намагниченности невелик и не может вызывать, например, отложения магнитного порошка в зоне дефекта.

3.3. Магнитопорошковая дефектоскопия

3.3.1. Технология магнитопорошковой дефектоскопии

Магнитопорошковый метод позволяет контролировать полуфабрикаты, изделия, сварные соединения и наплавки любых размеров и форм, изготовленные из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40 (ГОСТ 21105–87). Чувствительность магнитопорошкового метода определяется следующими характеристиками:

- магнитной индукцией насыщения B_s ;
- остаточной магнитной индукцией B_r ;
- коэрцитивной силой H_c ;
- шероховатостью поверхности объекта контроля;

- формой и размером объекта контроля;
- напряженностью намагничивающего поля;
- толщиной немагнитных покрытий;
- формой, размером и ориентацией дефекта;
- ориентацией намагничивающего поля по отношению к плоскости дефекта;
- качеством дефектоскопических средств;
- освещенностью поверхности объекта.

В зависимости от размеров выявляемых поверхностных несплошностей устанавливаются три условных уровня чувствительности, определяемых минимальной шириной раскрытия и протяженностью условного дефекта. При этом под условным дефектом понимается поверхностный дефект в форме плоской щели с параллельными стенками, ориентированный перпендикулярно к контролируемой поверхности и направлению магнитного поля. Следует заметить, что требуемого уровня чувствительности можно достичь лишь в том случае, когда поверхность детали обработана с шероховатостью не хуже приведенной в таблице.

Таблица 3.2

Условные уровни чувствительности (по ГОСТ 21105–87)

Условный уровень чувствительности	Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мкм	Минимальная протяженность условного дефекта, мм
А	2,0	0,5
Б	10,0	
В	25,0	

Примечание.

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

Магнитопорошковый контроль проводится по технологическим картам контроля, в которых указываются следующие сведения:

- номер документа, по которому проводится контроль;
- обозначение типов изделий;
- наименование изделия;
- объём контроля;

- эскиз детали с указанием габаритных размеров;
- условный уровень чувствительности;
- вид и способ намагничивания;
- значение намагничивающего тока или напряженности поля;
- средства контроля;
- тип магнитного индикатора;
- метрологическое обеспечение контроля;
- необходимость размагничивания.

В качестве индикаторов несплошностей используются чёрные и цветные магнитные и магнитолюминесцентные порошки. Перед проведением контроля порошки должны проходить контроль качества.

При проведении магнитопорошкового контроля выполняют следующие операции:

- подготовка поверхности объекта контроля;
- выбор способа и режима контроля;
- намагничивание объекта контроля;
- нанесение магнитного индикатора;
- оценка результатов контроля;
- отметка дефектного места;
- размагничивание объекта (если необходимо).

Смысл каждой из операций понятен из ее названия. Обратим внимание на некоторые особенности их выполнения.

3.3.1.1. Подготовка поверхности детали

При подготовке детали к контролю – очистке поверхности от грязи, ржавчины, смазки и т. п. – можно не убирать тонкие защитные покрытия. Если намагничивание предполагается циркулярное (пропусканием тока по поверхности детали), то в местах подведения контактов изолирующее покрытие, конечно, должно быть удалено. При полной зачистке поверхности детали диапазон применяемых технических средств весьма широк – от промывки мыльным раствором или зачистки очень мягкой наждачной бумагой до зачистки грубым напильником или шлифовальной машинкой. Применимость того или иного способа подготовки определяются индивидуально для различных групп изделий, в зависимости от требований к детали на стадии изготовления или от условий эксплуатации. Так, очевидно, что если деталь в зоне контроля шлифована или полирована по высокому классу чистоты поверхности и требуется выявить дефекты очень малого размера, то грубая обработка поверхности (напильник, наждачная бумага) исключаются.

При контроле деталей с темной поверхностью (резьбовые канавки, водо- и паропроводы, работающие при высоких температурах) для усиления контраста допускается покрывать участок детали тонким слоем белой краски. Толщина покрытия до 20 мкм не снижает чувствительность контроля и допускается по ГОСТ 21105–87.

3.3.1.2. Выбор способа и режима контроля

Проводится в зависимости от магнитных свойств контролируемого металла и требуемой чувствительности. Магнитопорошковый контроль осуществляется способом остаточной намагниченности (СОН) или способом приложенного поля (СПП). При способе СОН намагничивание детали и нанесение магнитного индикатора производится отдельно во времени, перерыв между намагничиванием и нанесением магнитного индикатора может достигать 1 часа. Напряженность магнитного поля при контроле СОН определяется с учетом достижения магнитного технического насыщения материала, способ применим только для магнитотвердых материалов с $H_c \geq 10$ А/см. Требуемый уровень чувствительности при контроле СОН определяется по известным магнитным характеристикам материала объекта контроля (коэрцитивная сила H_c и остаточная индукция B_r определяют положение точки на графике (рис. 3.18). Например, для значений $H_c = 24$ А/см и $B_r = 0,75$ Тл точка находится между кривыми А и Б. Следовательно, данную деталь можно контролировать способом СОН по условному уровню Б при шероховатости не хуже $R_z 40$.

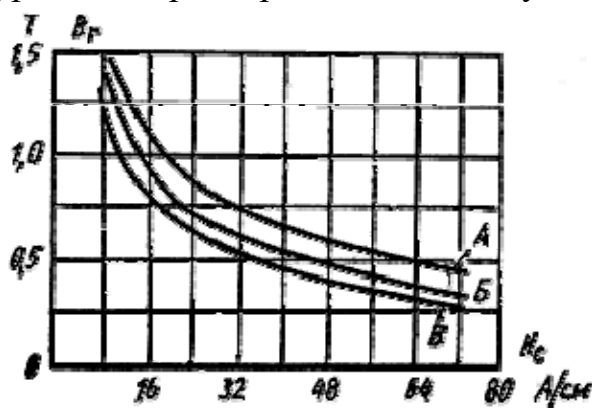


Рис. 3.18. Определение условного уровня чувствительности при контроле способом остаточной намагниченности

Контроль магнитомягких материалов, коэрцитивная сила которых $H_c < 10$ А/см, проводится только способом СПП. При этом способе намагничивание детали и нанесение магнитного индикатора производится одновременно. Для контроля материалов, коэрцитивная сила которых $H_c > 10$ А/см и остаточная индукция $B_r > 0,5$ Тл, могут применяться

ся оба способа. При контроле СПП напряженность магнитного поля, необходимая для обеспечения требуемого уровня чувствительности, определяется исходя из коэрцитивной силы H_c материала объекта контроля (табл. 3.3)

Таблица 3.3

Условный уровень чувствительности	Формула
А	$42 + 1,1H_c$ (3.28)
Б	$20 + 1,1H_c$ (3.29)
В	$15 + 1,1H_c$ (3.30)

При выборе условного уровня чувствительности необходимо помнить, что этот уровень определяется, прежде всего, состоянием поверхности детали и уже во вторую очередь – ее магнитными свойствами. После того как выбран требуемый уровень условной чувствительности, для объекта контроля по его магнитным характеристикам определяют способ контроля: СОН или СПП.

На практике СОН редко применяется из-за более низкой чувствительности по сравнению с СПП, т. к. при СОН чувствительность определяется остаточной индукцией материала, а это величина нерегулируемая.

Для расчета режима контроля при СПП определяют требуемое значение намагничивающего приложенного поля H_{np} по известному значению коэрцитивной силы H_c . Затем для выбранного способа намагничивания и формы объекта контроля рассчитывают ток намагничивания.

При циркулярном намагничивании, максимальное значение намагничивающего тока для получения заданной напряженности магнитного поля H_{np} в А/см определяется по формулам (3.31–3.34):

- для объектов цилиндрической формы с круглым сечением

$$I_y = \pi \cdot H_{np} \cdot D, \quad (3.31)$$

где D – диаметр круглого сечения, см. При циркулярном намагничивании отверстий при помощи кабеля или металлического стержня в этой формуле D – диаметр отверстия;

- для объектов с прямоугольным сечением

$$I_y = 2H_{np} \cdot a \text{ при } a/b > 10, \quad (3.32)$$

$$I_y = 2H_{np} \cdot (a + b) \text{ при } a/b < 10, \quad (3.33)$$

где a и b – длина и ширина прямоугольного сечения, см;

- для участков крупногабаритных объектов

$$I_y = KH_{np} \sqrt{L^2 + C^2}, \quad (3.34)$$

где L – расстояние между электроконтактами или длина контролируемого участка, см; C – ширина контролируемого участка, см; K – коэф-

коэффициент, учитывающий род тока и расстояние между электроконтактами. Для действующего значения переменного тока $K = 2,1$ а при использовании выпрямленного тока – $K = 1,7$. С целью упрощения и удобства пользования этой формулой расчета тока циркулярного намагничивания участков крупногабаритных изделий можно использовать условие, когда $C = 0,6L$. Тогда формула (3.34) примет вид:

- для переменного тока

$$I_{\text{ц}} = 2,1H_{\text{нр}}L_{\text{к}}; \quad (3.35)$$

- для выпрямленного тока

$$I_{\text{ц}} = 1,7H_{\text{нр}}L_{\text{к}}. \quad (3.36)$$

На практике расстояние между электроконтактами $L_{\text{к}}$ выбирают в диапазоне от 75 мм до 250 мм.

При циркулярном намагничивании изделий кольцевой (тороидальной) формы с помощью гибкого кабеля, навитого на деталь с числом витков W , намагничивающий ток через маловитковую обмотку, необходимый для достижения заданной напряженности поля $H_{\text{нр}}$, рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{ц}} = \pi DH_{\text{нр}}/W, \quad (3.37)$$

где D – средний диаметр объекта контроля, см; $H_{\text{нр}}$ – приложенное поле.

Для продольного намагничивания трубчатых изделий разомкнутой формы, с помощью гибкого токового кабеля навитого на изделие, намагничивающий ток, пропускаемый по обмотке (не более 10 витков), рассчитывается по формуле:

$$I = L(H_{\text{нр}} + NJ)/W, \quad (3.38)$$

где L – длина участка изделия (трубы), занятого обмоткой, между секциями обмоток и по обе стороны от краёв обмотки или секций соленоида (общая длина участка не должна превышать 50 см; длина участка между двумя секциями обмоток (3 + 3 витка) берется не более 20 см); N – размагничивающий фактор, зависящий от отношения длины изделия к его диаметру или к корню квадратному из сечения трубы; J – намагниченность материала изделия, равная ориентировочно для магнитомягких сталей 1000 А/см, при поле $H_{\text{нр}}$ и индукции в материале 1,2 Тл, но не менее 0,8 Тл; $NJ = H_{\text{р}}$ – размагничивающее поле полюсов контролируемого изделия. Это поле направлено навстречу внешнему полю источника поля. Значение размагничивающего фактора N для разных отношений L/D приведены выше в табл. 3.1

Намагниченность материала изделия рассчитывается по формуле:

$$J = (B - H_{\text{нр}})/4\pi, \quad (3.39)$$

где B – индукция материала, необходимая для обеспечения заданной чувствительности контроля.

Зная размеры объекта контроля, определяем размагничивающий фактор N . После этого находим размагничивающее поле полюсов $H_p = JN$. Суммарное поле источника поля (соленоида), необходимое для эффективного намагничивания и контроля данного изделия с учетом размагничивающего фактора, определится так: $H = H_{np} + H_p$. После того как рассчитан ток намагничивания, производится собственно намагничивание объекта контроля.

Если необходимо продольно намагнитить короткую деталь, обладающую большим размагничивающим фактором, то на практике возможно использование следующих приемов. Если короткая деталь имеет ровные торцы, то необходимо плотно прижать торцами друг к другу несколько деталей (так, чтобы отношение длины к диаметру всей конструкции было более 10) и затем намагнитить все детали вместе. Если деталь имеет сложную форму, то для намагничивания изготавливают специальные удлиняющие наконечники из магнитомягкой стали, которые также увеличивают соотношение длины к диаметру в момент намагничивания.

В целом логика всех расчетов в магнитопорошковой дефектоскопии такова: формулы (3.28)...(3.30) дают минимальное значение напряженности поля на поверхности детали (СПП), необходимое для достижения соответствующей чувствительности контроля. Затем необходимо выбрать намагничивающее устройство (электромагнит или соленоид), который обеспечивает такое значение напряженности поля (а на практике, как правило, эта напряженность в 2...5 раз выше). Либо необходимо рассчитать ток циркулярного намагничивания, который обеспечит необходимую напряженность и затем выбрать дефектоскоп, который гарантирует такое или большее значение тока.

При контроле по СОН необходимо, чтобы намагничивающее устройство хотя бы кратковременно (десятки миллисекунд) обеспечило на поверхности детали напряженность поля технического насыщения для данной марки стали (эти значения лежат в диапазоне 50...200 А/см для большинства марок сталей). Затем намагничивание можно прекратить и приступить к нанесению магнитного индикатора, а также и к расшифровке изображения. Недостаток способа СОН заключается в том, что реальные значения остаточной индукции и коэрцитивной силы для данной марки стали могут значительно отличаться от приведенных в справочнике, т. к. на эти параметры сильно влияет режим термообработки. В результате, если для справочных данных (сталь в состоянии поставки) способ СОН применим, то на изделии из этой стали, прошедшей термообработку, при контроле поле рассеяния дефекта может оказаться недостаточным для обнаружения дефектов с заданным условным уровнем чувствительности.

3.3.1.3. Нанесение магнитного индикатора

Когда объект контроля будет намагничен, на его поверхность наносят магнитный индикатор сухим или мокрым способом в виде порошка или суспензии. При сухом способе магнитный порошок напыляется на контролируемую поверхность с одновременным удалением его с бездефектной поверхности слабым потоком воздуха или другим способом. Сухой способ в ряде случаев обладает более высокой чувствительностью – отложения порошка возникают даже над подповерхностными дефектами (картина отложения порошка при этом отличается меньшей контрастностью и более размытыми границами по сравнению с индикацией поверхностного дефекта). Недостатком сухого способа является то, что по санитарным нормам при таком способе распыления работа должна проводиться в респираторе, защищающем органы дыхания. При мокром способе магнитная суспензия наносится на контролируемую поверхность путем погружения в ванну, распыления или полива слабой струей, не смывающей осевший порошок над несплошностью, с обязательным стеканием её с поверхности. Наиболее часто применяется простая водная суспензия – (25 ± 5) г магнитного порошка на литр воды. Использование слишком жесткой воды может привести к коагуляции суспензии на поверхности детали, что затрудняет расшифровку результатов контроля. Для смягчения воды в нее добавляют поверхностно-активные вещества, снижающие поверхностное натяжение воды (это может быть простой стиральный порошок или хозяйственное мыло). Кроме того, в рецептуру суспензии могут входить антикоррозионные и антивспенивающие присадки. Количество сухого порошка на 1 л воды определяет фирма-производитель. Это значение может находиться в диапазоне от 5 до 50 г и должно указываться производителем в сертификате.

Основной недостаток водной суспензии – она непригодна для работы при отрицательных температурах. Поэтому используют также суспензии керосиновые, масляные и керосино-масляные. Достоинством керосиновых суспензий является то, что керосин обладает очень хорошей смачиваемостью и проникающей способностью (что используется, например, для контроля герметичности сосудов). Поскольку керосин является горючим материалом, то при использовании его в качестве суспензии запрещается циркулярное намагничивание электроконтактами – во избежание загорания суспензии при искрении в зоне электроконтакта. Применение масляной суспензии, конечно, удорожает процесс контроля, но за счет более высокой вязкости масляная суспензия более медленно стекает с поверхности объекта контроля, что при прочих равных условиях может дать отложение порошка на более мелких дефектах. В настоящее время масляные суспензии изготавливают-

ся многими фирмами в виде аэрозольных баллонов, готовых к употреблению. Среди известных производителей можно отметить *Magnaflox* и *ELY* (Великобритания)

При контроле изделий с темной поверхностью применяется технология магнитолюминесцентного контроля. Она основана на применении специального магнитолюминесцентного порошка, состоящего из смеси магнитного порошка и порошка – люминофора. Намагничивание детали ничем не отличается от описанного выше. Затем на поверхность детали наносят магнитолюминесцентный порошок или суспензию (также выпускается в готовом виде в аэрозольных баллонах). Осмотр поверхности детали производят в затемненном помещении, где поверхность освещается специальной лампой, в спектре излучения которой имеется ультрафиолетовая компонента. Под действием ультрафиолетового излучения люминофор светится, поскольку люминофор перемешан с магнитным порошком. Эта индикация указывает место отложения магнитного порошка на поверхности детали.

3.3.1.4. Осмотр и расшифровка результатов контроля

Очень важным этапом магнитопорошковой дефектоскопии является оценка результатов контроля. Результаты контроля оцениваются по наличию на поверхности индикаторного следа в виде чёткого плотного валика магнитного порошка, видимого невооруженным глазом или с использованием лупы до 6-кратного увеличения. Длина индикаторного следа линейной несплошности равна протяженности выявленного дефекта. Каждая выявленная несплошность должна быть отмечена краской или другим способом. Освещенность поверхности объекта контроля должна быть не менее 1000 люкс, количество источников света не нормируется. Необходимо также помнить, что порошок может залегать в таких местах, где на самом деле дефектов нет. Ниже перечислены примеры ложных отложений:

- индикации, вызванные контактом с другим ферромагнетиком или магнитом (так называемая магнитная запись), исчезающие после размагничивания;
- индикации, вызванные наличием внутренних механических напряжений;
- индикации, вызванные наличием вкраплений немагнитного материала;
- размытые нечеткие индикации, вызванные резким переходом сечения изделия;

- размытые нечеткие индикации, вызванные местными изменениями магнитных свойств металла (например, по границам сварных швов);
- индикации в виде широких групп мелких и параллельных осаждений порошка, вызванные избыточным намагничивающим полем.

3.3.1.5. Заключение по результатам контроля

Заключительным этапом контроля является размагничивание и составление отчетной документации.

Необходимость размагничивания, проверка степени размагничивания, а также допустимая норма остаточной намагниченности объекта контроля устанавливаются производственно-технологической документацией. Размагничивание осуществляется путем воздействия на деталь знакопеременного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой. Напряженность начального магнитного поля должна быть не менее величины намагничивающего поля, а в случае отсутствия данных о начальном значении поля – не менее пяти значений коэрцитивной силы материала изделия. Степень размагничивания определяется с помощью измерителей или градиентометров магнитных полей.

Собственно заключение принимается на основании результатов осмотра детали с учетом **браковочных признаков** – типы и размеры недопустимых дефектов приводятся в нормативной отраслевой документации на соответствующие группы изделий. Как правило, поверхностные усталостные трещины являются обязательным браковочным признаком, поскольку усталостные трещины обладают способностью к развитию.

3.3.2. Технология контроля сварных соединений

3.3.2.1. Магнитопорошковая дефектоскопия сварных соединений

Магнитопорошковая дефектоскопия сварных соединений проводится после 100 % визуально-измерительного контроля. МПД не подвергаются сварные соединения, выполненные из аустенитных материалов или с применением аустенитных электродов. Сварные соединения со снятым усилением следует контролировать, как и целые участки аналогичной формы из тех же материалов. Сварные соединения с усилением, выполненные автоматической дуговой сваркой, следует контролировать с чувствительностью, соответствующей условным уровням B и B , а выполненные ручной сваркой – только по условному уровню B [10].

Поверхность, подлежащая контролю, очищается от грязи, окалины и инородных частей. Ширина контролируемой зоны сварных соединений принимается ± 20 мм от оси шва [11]. Выявленные при визуальном осмотре дефекты должны быть устранены до проведения магнитопорошкового контроля. Для случая визуального обнаружения дефектов в виде сферических или цилиндрических язв, трещин, свищей, пробоин, вмятин, гофр, рисок, царапин браковочные признаки приведены в [12]. Там же приведены и возможные способы восстановления поверхности – шлифовка, наплавка, приварка заплат и муфт. Шероховатость контролируемой поверхности должна быть не более $R_z 40$, мкм.

Зачистку следует производить с помощью зубил, абразивных (наждачных) кругов и наждачной шкурки до шероховатости поверхности, соответствующей требованиям [12]. Применение вращающихся металлических щеток и скребков для зачистки поверхности шва и околошовной зоны не допускается [10].

Деформация контролируемой поверхности при зачистке не допускается. Поверхность, имеющая следы масла или жиросодержащих суспензий, обезжиривается. При применении водной суспензии поверхность изделия обезжиривается ацетоном. При применении масляной суспензии поверхность должна быть обезжирена водно-мыльным раствором или бензином.

При контроле изделий с темной или серой поверхностью для обнаружения и анализа распределения индикаторного порошка необходимо предварительно поверхность изделий покрыть тонким полупрозрачным слоем белой матовой краски толщиной не более 20 мкм. Перед проведением операции циркулярного намагничивания пропусканием тока через изделие, неэлектропроводящие покрытия необходимо удалить. Места установки электроконтактов зачищаются до металлического блеска.

3.3.2.2. Выбор способа и режима контроля

Выбор способа и режима МПД проводится в зависимости от магнитных свойств контролируемого материала и требуемой чувствительности. МПД осуществляется способом остаточной намагниченности (СОН) или способом приложенного поля (СПП). Для магнитомягких сталей (ВстЗсп, Ст10, Ст10Г2, Ст15, Ст20) в состоянии поставки основной технологией контроля является СПП. Для термообработанных сталей применимость СОН определяется параметрами коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_r после термообработки. В случае затруднения с определением параметров H_c и B_r после термообработки необходимо применять технологию СПП.

3.3.2.3. Намагничивание объекта контроля

Изделия должны быть намагничены до технического насыщения для обеспечения максимальной возможной чувствительности при контроле способом остаточного намагничивания. Такой способ применим для магнитотвердых сталей, обладающих коэрцитивной силой H_c не менее 10 А/см и остаточной индукцией $B_r \geq 0,5$ Тл.

При контроле СПП операции намагничивания изделия и нанесения магнитной суспензии выполняются одновременно. При этом индикаторные рисунки выявляемых дефектов образуются в процессе намагничивания. Намагничивание прекращают после стекания с контролируемой поверхности основной массы суспензии.

Контроль сварных швов СПП следует применять, когда:

- изделие выполнено из магнитомягкого материала ($H_c < 10$ А/см, например, сталь 3, 5, 10, 15, 20, 45 незакаленная);
- мощности дефектоскопа недостаточно, чтобы намагнитить всю деталь вследствие ее больших размеров;
- проводят контроль с целью обнаружения подповерхностных дефектов на глубине более 0,1 мм;
- неизвестны магнитные характеристики материала детали.

Если равномерное намагничивание изделий выполнить невозможно, намагничивание с последующим контролем следует проводить по отдельным участкам. При этом возможно использовать выносные электроконтакты, приставные электромагниты, витки гибкого кабеля, накладываемые на намагничиваемые участки изделия, разъемные соленоиды и другие средства.

Размер шага перемещения устройства намагничивания должен составлять:

- при циркулярном намагничивании – не более половины расстояния между электродами;
- при продольном намагничивании – не более половины межполюсного расстояния электромагнита.

Для обнаружения дефектов любых ориентации необходимо проводить контроль в две стадии, используя намагничивание в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

При использовании СПП обработка деталей суспензией должна проводиться во время действия магнитного поля на контролируемое изделие. Осмотр изделия следует проводить при выключенном магнитном поле.

Для предупреждения прижогов поверхности при контроле деталей большого сечения применяют прерывистый режим прохождения электрического тока, при этом протекание электрического тока в течении

0,1...0,5 сек. чередуется с его отсутствием в течении 1...2 сек. Для сохранения заданного уровня чувствительности сила электрического тока при прерывистом намагничивании должна быть повышена на 10...15 % по сравнению с непрерывным режимом.

Если изделия имеют участки, отличающиеся друг от друга по сечению, то контроль необходимо проводить за два или более приемов, подбирая в каждом случае ток циркулярного намагничивания, соответствующий разным размерам (диаметрам) проверяемых зон деталей от меньших значений к бóльшим.

3.3.2.4. Нанесение индикаторных материалов

Нанесение индикаторных материалов производится двумя способами: сухим и мокрым. В первом случае для обнаружения дефектов применяют сухой магнитный порошок, во втором – магнитную суспензию – взвесь магнитного порошка в дисперсионной среде. Для контроля используется черный магнитный порошок по МРТУ 6.14-1009-79, масляная суспензия в аэрозольных баллонах, магнитолюминесцентный порошок ЛЮМАГПОР-1 по ТУ 6.14-295-82, ЛЮМАГПОР-3Б по ТУ 6.14-5020-82. Можно воспользоваться готовыми рецептурами магнитных суспензий [13]. Перед применением магнитной суспензии ее проверяют на контрольном образце сварного соединения с дефектами, удовлетворяющими принятому уровню чувствительности контроля.

Для МПД деталей малых габаритов следует применять «сухой» способ нанесения индикаторного порошка. При «сухом» способе порошок необходимо наносить равномерно на проверяемую поверхность с помощью различных распылителей. Разновидностью «сухого» способа является способ воздушной взвеси. При этом используется специальный мелкодисперсный порошок с размерами частиц 0,1...10 мкм. Способ воздушной взвеси применяют для обнаружения подповерхностных дефектов и дефектов под слоем немагнитного покрытия (хром, краска и т. п.) толщиной до 150 мкм.

При применении «сухого» способа порошок наносят на контролируемую поверхность равномерно и без образования более темных (обогашенных порошком) мест.

3.3.2.5. Оценка результатов контроля

Осаждение магнитного порошка на дефектах типа нарушений сплошности имеет следующие характерные особенности:

- трещины закалочные, ковочные, штамповочные, сварочные и усталостные выявляются в виде ломаных линий различного направления с резким плотным осаждением магнитного порошка;

- флокены выявляются в виде отдельных искривленных или прямолинейных черточек, расположенных в одиночку или группами с резким осаждением магнитного порошка;
- волосовины выявляются в виде прямых или слегка изогнутых по волокну тонких черточек с различной интенсивностью осаждения порошка, зависящей от глубины волосовин и расположения их относительно поверхности;
- подповерхностные дефекты выявляются в виде широких и нечетких осадений порошка на проверяемой поверхности. Широкие поверхностные дефекты, у которых глубина равна ширине или меньше ее, не имеют соответствующего осаждения магнитного порошка и потому не выявляются. Возможны случаи осаждения магнитного порошка в местах магнитной неоднородности, связанной со следующими факторами:
 - местное намагничивание, вызванное прикосновением намагниченных ферромагнитных тел (инструментов, тросов, неразмагниченных деталей и т. п.);
 - зоны структурной неоднородности (карбидная, аустенитная или ферритная полосчатость). Полосчатость обычно направлена по волокну металла, и картина осаждения порошка получается почти такая же, как и при скоплении волосовин. В местах структурной неоднородности порошок осаждается и при повторном намагничивании;
 - места резкого изменения поперечного сечения детали;
 - места сварки быстрорежущей и малоуглеродистой стали;
 - граница ферромагнитного металла и аустенитного шва;
 - граница зон термического влияния сварки.

По результатам исследований принимается решение о годности деталей с аналогичным осаждением порошка.

При значительном осаждении порошка над магнитными неоднородностями МПД следует заменить другими методами НК:

- капиллярным методом;
- рентгенографическим методом;
- вихретоковым методом.

3.4. Магнитопорошковые дефектоскопы

Магнитопорошковый дефектоскоп (Crack Tester) – устройство для выявления нарушений сплошности в изделиях с использованием в качестве индикаторов магнитных порошков. Основные узлы дефектоскопа:

- источники намагничивающего тока;
- устройства для подвода тока к детали;
- устройства полюсного намагничивания (соленоиды, электромагниты);
- устройства для нанесения на деталь порошка или суспензии;
- осветительные устройства;
- измерители тока или напряженности магнитного поля;
- контрольный образец с магнитограммой.

В зависимости от назначения в дефектоскопе могут быть не все из перечисленных узлов (например, в магнитопорошковом дефектоскопе на постоянных магнитах – рис. 3.19 и 3.20), но могут быть и дополнительные узлы (например, устройства комбинированного намагничивания, дефектоотметчики).

Конструктивно дефектоскопы оформляются в трех вариантах: стационарные универсальные; передвижные и переносные; специализированные.



Рис. 3.19. Портативный дефектоскоп на постоянных магнитах МД-4П (МД-4К) для магнитопорошковой дефектоскопии

Стационарные универсальные дефектоскопы получили широкое распространение на предприятиях крупносерийного производства разнотипных деталей, с производительностью контроля от десятков до сотен деталей в час.



Рис.3.20. Намагничивающее устройство – ручное электромагнитное ярмо компании «Виматек» (www.vimatec.ru)

Известны десятки типов стационарных универсальных дефектоскопов. В России можно отметить популярные модели МД-10П (при использовании импульсного тока до 20 КА напряженность поля при полюсном намагничивании может достигать 350 А/см) и МДС-5 (при токе до 7,5 КА напряженность не менее 80 А/см). Дефектоскопы такого типа обладают значительным весом (до 1 тонны) и стационарно монтируются в цеховых условиях (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Специализированная линия магнитопорошковой дефектоскопии фирмы «Виматек» (www.vimatec.ru)

Передвижные и переносные дефектоскопы предназначены для намагничивания и контроля деталей в условиях, когда невозможно использовать стационарные дефектоскопы, например, при намагничивании крупногабаритных деталей по частям или в случае работы в полевых условиях. Как правило, такие дефектоскопы снабжаются комплектом материалов для контроля (сухие порошки и устройства для их напыления, сосуды с суспензией и т. д.). Дефектоскопы этого типа позволяют производить циркулярное намагничивание с помощью токовых контактов, помещаемых на участке детали, продольное намагничивание с помощью кабеля, навиваемого на деталь, или иногда с помощью электромагнита. Среди наиболее популярных моделей можно отметить дефектоскоп МД-50П (импульсный ток до 5 кА создает напряженность поля при полюсном намагничивании до 160 А/см) и ПМД-70 (импульсный ток до 1,5 кА создает напряженность поля до 80 А/см). Вес дефектоскопов находится в диапазоне 20-200 кг, что позволяет либо транспортировать их по цеху, либо использовать в полевых условиях.

Известно большое количество типов специализированных дефектоскопов. Как правило, это автоматизированные установки, в которых все операции, кроме осмотра, автоматизированы. Они предназначены для контроля деталей одного типа при крупносерийном производстве. Значительное число таких дефектоскопов разработано для нужд подшипниковой промышленности, где необходимо контролировать большое число однотипных стальных деталей – роликов, внутренних и наружных колец подшипников.

В России на сегодняшний день находятся в эксплуатации и выпускаются более 20 типов магнитопорошковых дефектоскопов хорошего качества, что практически полностью закрывает потребности внутреннего рынка. За рубежом подобное оборудование выпускают практически все развитые страны. В последнее время появляется много оборудования производства Китая и Индии.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Какова напряженность поля на торце длинного соленоида?
 - а) В три раза меньше, чем в центре.
 - б) Такая же, как в центре.
 - в) В два раза меньше, чем в центре.
 - г) На 30 % меньше, чем в центре.

2. Как изменяется глубина проникновения электромагнитного поля вглубь ферромагнетика при уменьшении электропроводности материала?
 - а) Увеличивается.
 - б) Уменьшается.
 - в) Не зависит от электропроводности.
3. От каких параметров зависит значение размагничивающего фактора?
 - а) Размагничивающий фактор N зависит только от формы тела и его положения в магнитном поле.
 - б) Размагничивающий фактор N зависит только от собственных магнитных характеристик материала.
 - в) Размагничивающий фактор N зависит в большей степени от формы тела и его положения в магнитном поле и менее зависит от собственных магнитных характеристик материала, из которого изготовлена деталь.
4. Как изменяются амплитуды составляющих поля дефекта и амплитуды пространственных производных при увеличении ширины дефекта?
 - а) При возрастании ширины дефекта падают амплитуды составляющих поля дефекта, а амплитуды пространственных производных растут.
 - б) При возрастании ширины дефекта амплитуды составляющих поля дефекта и амплитуды пространственных производных растут.
 - в) При возрастании ширины дефекта растут амплитуды составляющих поля дефекта, а амплитуды пространственных производных падают.
5. Как зависит напряженность поля рассеяния дефекта от магнитных характеристик материала?
 - а) Чем выше остаточная индукция B_r и меньше дифференциальная магнитная проницаемость μ_d материала, тем больше напряженность поля рассеяния дефекта при прочих равных условиях.
 - б) Чем ниже остаточная индукция B_r и больше дифференциальная магнитная проницаемость μ_d материала, тем больше напряженность поля рассеяния дефекта при прочих равных условиях.
 - в) Чем выше остаточная индукция B_r и дифференциальная магнитная проницаемость μ_d материала, тем больше напряженность поля рассеяния дефекта при прочих равных условиях.

6. Какое соотношение нормальной и тангенциальной составляющей намагничивающего поля должно выполняться при продольном намагничивании?
- а) При $H_n/H_t > 5$ дефекты не выявляются или выявляются неудовлетворительно.
 - б) При $H_n/H_t > 3$ дефекты не выявляются или выявляются неудовлетворительно.
 - в) При $H_n/H_t > 2$ дефекты не выявляются или выявляются неудовлетворительно.
7. К какому типу относиться намагничивание изделия типа кольца с помощью тороидальной обмотки?
- а) Продольное полюсное.
 - б) Циркулярное.
 - в) Комбинированное.
8. При циркулярном намагничивании цилиндрической детали путем пропускания тока через торцы величина необходимого тока зависит:
- а) От длины детали и необходимой напряженности поля;
 - б) От длины детали, диаметра детали и необходимой напряженности поля;
 - в) От диаметра детали и необходимой напряженности поля.
9. Для каких деталей применяют размагничивание переменным током?
- а) Для тонкостенных деталей.
 - б) Для деталей с резким изменением сечения.
 - в) Для удлиненных деталей.
 - г) Для массивных деталей.
10. Сталь 5 в состоянии поставки имеет значение коэрцитивной силы $H_c = 4,8$ А/см, остаточной индукции $B_r = 1,1$ Тл. Какова технология контроля деталей, изготовленных из этой стали?
- а) СПП.
 - б) СОН или СПП.
 - в) СОН.
11. При контроле участка детали из стали 12Х13 ($H_c = 10,0$ А/см, $B_r = 0,6$ Тл, шероховатость R_z 40) способом циркулярного намагничивания выбраны следующие параметры контроля: способ СОН по условному уровню чувствительности А, расстояние между электроконтактами – 220 мм. Укажите ошибки в технологии контроля.
- а) Неправильно определен способ контроля и расстояние между электроконтактами.
 - б) Неправильно определена чувствительность контроля и расстояние между электроконтактами.
 - в) Неправильно определен способ контроля и условный уровень чувствительности

12. Необходимо провести контроль детали из стали, у которой напряженность поля насыщения составляет $B_s = 160$ А/см, коэрцитивная сила $H_c = 24$ А/см. В распоряжении имеется намагничивающее устройство на постоянных магнитах, обеспечивающее напряженность поля 100 А/см. Возможно ли провести контроль на данном оборудовании?
- а) Контроль невозможен.
 - б) Возможен контроль по СОН по условному уровню чувствительности В.
 - в) Возможен контроль по СПП, уровень чувствительности определяется состоянием поверхности.
13. Для каких целей применяется технология магнитолюминесцентного контроля?
- а) Для повышения чувствительности контроля.
 - б) Для снижения расхода магнитного порошка.
 - в) Для контроля деталей с темной поверхностью.
 - г) Для контроля деталей из магнитомягких сталей.
14. По какому условному уровню чувствительности следует проводить контроль сварных соединений с усилением, выполненных автоматической дуговой сваркой?
- а) Сварные соединения с усилением, выполненные автоматической дуговой сваркой следует контролировать с чувствительностью, соответствующей условным уровням *Б* и *В*.
 - б) Сварные соединения с усилением, выполненные автоматической дуговой сваркой следует контролировать с чувствительностью, соответствующей условному уровню *Б*.
 - в) Сварные соединения с усилением, выполненные автоматической дуговой сваркой следует контролировать с чувствительностью, соответствующей условному уровню *В*.
15. Какую технологию контроля сварных соединений необходимо применять в случае затруднения с определением параметров H_c и B_r после термообработки?
- а) В случае затруднения с определением параметров H_c и B_r после термообработки необходимо применять технологию СПП.
 - б) В случае затруднения с определением параметров H_c и B_r после термообработки необходимо применять технологию СОН.

Глава 4

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

4.1. Общие сведения

При проведении поверки магнитопорошковых дефектоскопов помимо проверки комплектности, внешнего осмотра и опробования, следует определять те параметры дефектоскопов, от которых зависят результаты контроля. Следует помнить, что магнитопорошковый дефектоскоп не является измерительным прибором, т. к. ему не присущи такие параметры как измерительная шкала, цена деления шкалы, погрешность измерения. Функции измерения могут появиться только в том случае, если в дефектоскопе предусмотрено, например, измерение глубины трещины. Прибор в этом случае называется дефектоскоп-дефектометр и в технических характеристиках приводятся значение диапазона измеряемой величины и погрешности измерения. В случае решения задач дефектоскопии речь может идти только о достоверности контроля, т. е. о том, с какой доверительной вероятностью прибор обнаруживает дефект заданного минимального размера.

Достоверность магнитопорошковой дефектоскопии обеспечивают технические устройства и принадлежности, которые для удобства анализа можно разбить на несколько групп: намагничивающие устройства; магнитный порошок и магнитная суспензия; осветительные устройства и метрологическое обеспечение (обычно это контрольный образец или стандартный образец предприятия в комплекте дефектоскопа). Отсюда следует, что обнаружение дефектов с заданной достоверностью, то есть обнаружение всех дефектов, недопустимых для данного вида изделий, зависит от параметров и технического состояния всех перечисленных групп оборудования. Поэтому необходимо рассмотреть отдельно требования, предъявляемые к этим группам оборудования, способы контроля качества и параметров этого оборудования:

- контроль качества магнитных порошков и суспензий;
- контроль параметров намагничивающих устройств;
- контроль параметров осветительных устройств;
- метрологическое обеспечение магнитопорошковых дефектоскопов.

Техническое описание дефектоскопа, как правило, содержит описание процедуры проверки работоспособности дефектоскопа при помощи контрольного образца, входящего в комплект дефектоскопа. Суть этой процедуры обычно заключается в намагничивании контрольного

образца, нанесении магнитного индикатора и сравнении полученной картины отложения магнитного порошка с дефектограммой (или фотографией) отложения порошка, которая прилагается к контрольному образцу и считается эталонной картиной отложения. Если результат проверки дает картину отложения, совпадающую с дефектограммой, то все технические средства, обеспечивающие контроль, имеют нормальные параметры и свойства и можно приступить к контролю. Если же индикация на контрольном образце не соответствует дефектограмме, то отклонение параметров может быть в любой из вышеперечисленных групп и общая задача проверки работоспособности оборудования распадается на четыре отдельных задачи, приведенных выше.

4.2. Контроль качества магнитных порошков и суспензий

Магнитный порошок, используемый в процедуре контроля, должен обладать определенными механическими и магнитными свойствами. С магнитной точки зрения материал порошка должен обладать достаточной магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой и остаточной индукцией, т. е. обладать свойствами магнитомягкого материала. Механические свойства порошка связаны с его дисперсностью и определяют подвижность частиц порошка как при сухом, так и при мокром способе контроля. Чем больше размер частиц порошка, тем большая часть порошка будет оседать на поверхности детали в виде фоновое покрытие, не участвуя в процедуре контроля. В нормативной документации имеется следующая рекомендация: максимальный размер частиц порошка не должен превышать 50 мкм для мокрого и 150 мкм для сухого способа контроля [13]. На практике магнитные порошки промышленного производства имеют размеры частиц порошка, не превышающие 10 мкм. Для проверки механических свойств порошка можно использовать простую методику, которая получила название метод отстоя (ГОСТ 17299–78). В стеклянную колбу с внутренним диаметром 10 мм и с длиной рабочей части 400 мм наливают технический спирт и засыпают 3 грамма порошка. Содержимое колбы взбалтывают и затем колбу ставят в вертикальное положение для отстоя. Частицы порошка постепенно начинают оседать, образуя четкую границу раздела (светлая и темная часть). Ровно через 3 минуты необходимо измерить высоту нижней (неотстойной) части. По техническим условиям ТУ 6-14-1009-93 порошок считается пригодным, если высота этой части превышает 180 мм. Это означает, что дисперсность порошка в норме. Если же этот размер менее 180 мм, значит механические свойства порошка неудовлетворительны. Контроль порошка методом от-

стоя в спирте необходимо проводить 3 раза, каждый раз с новой порцией порошка. Качество порошка определяется по среднему значению. Приведенный метод оценки дисперсности порошка самый простой и популярный. Кроме него можно применять способ просеивания порошка через сито № 0053 (ГОСТ 6613–73) и метод магнитно-весовой пробы [14]. Магнитно-весовой пробой называется количество магнитного порошка (в граммах), притянутого к специальному электромагниту.

Качество магнитной суспензии определяется концентрацией магнитного порошка в суспензии. В случае применения черного магнитного порошка по ТУ 6-14-1009-93 для водных суспензий рекомендуется (25 ± 5) г/л. В иных случаях необходимо учитывать рекомендации производителей. Так, например, для порошка магнитного черного ВР-42 фирмы Sherwin Babb Co, рекомендован норматив $(6...9)$ г/л. Для магнитолюминесцентных суспензий, в случае применения люминесцентного магнитного порошка Люмагпор–3Б по ТУ 6-09-26-262-77, рекомендована норма (4 ± 1) г/л. Кроме того, качество магнитной суспензии определяется физическими свойствами основы (вода, масло, керосин) и, собственно, магнитными свойствами порошка.

На выявляющие свойства магнитной суспензии на водной основе большое влияние оказывает жесткость воды. Для смягчения воды её можно кипятить или добавлять специальные присадки [13]. Для приготовления масляной суспензии вязкость дисперсионной среды по ГОСТ 21105–87 не должна превышать $36 \cdot 10^6$ м²/с (36 сантистокс).

Существуют специальные приборы для количественной оценки качества магнитных индикаторов (как порошков, так и суспензий). В основу принципа действия прибора положено использование модели магнитного поля рассеяния, равномерно убывающего по длине искусственного дефекта в контрольном образце. Образец содержит две ферромагнитные пластины клинообразного сечения, прижатые друг к другу через тонкую диэлектрическую прокладку (толщина около 50 мкм), в результате чего на стыке образуется искусственный прямолинейный дефект. Образец намагничивается при помощи проводника с током расположенного параллельно нижней грани пластины таким образом, что напряженность поля на поверхности дефекта линейно падает от одного края к другому. При нанесении суспензии или порошка над дефектом образуется валик, длина которого принимается за условную чувствительность суспензии или порошка. На таком принципе основано действие прибора МФ-10СП, в котором полная длина искусственного дефекта составляет 140 мм, а большинство порошков и суспензий хорошего качества дают длину отложения порошка 80...100 мм. Известны

также приборы, в которых колба с суспензией помещается в катушку индуктивности, включенную в контур автогенератора. В зависимости от магнитных свойств порошка и концентрации порошка в суспензии меняется амплитуда и частота генератора. Так, прибор АКС-1М, работающий по этому принципу, имеет стрелочный прибор, отградуированный в концентрации содержания порошка в суспензии (до 50 г/л). Прибор калибруется при помощи контрольного образца, имитирующего концентрацию порошка 30 г/л, и снабжен проходной выносной катушкой для измерения концентрации порошка при автоматизированной подаче суспензии в зону контроля. Таким образом, с помощью подобных приборов можно сравнивать качество магнитного порошка разных фирм-производителей, сравнивать различные рецептуры суспензий либо вести контроль качества суспензии непосредственно во время процесса контроля – во избежание обеднения суспензии с последующим снижением чувствительности.

4.3. Контроль параметров намагничивающих устройств

4.3.1. Измерение напряженности магнитного поля

Технические характеристики намагничивающих устройств на постоянных магнитах, электромагнитов, катушек и соленоидов обязательно должны приводить значение напряженности магнитного поля, создаваемого этими устройствами. Так, например, для соленоида приводится значение напряженности поля в центре на оси соленоида без объекта контроля при номинальном значении тока в обмотке. При проверке работоспособности и калибровке этих устройств необходимо измерять напряженность магнитного поля в заданных точках намагничивающих устройств. Для измерения напряженности магнитного поля промышленность выпускает большое количество измерителей магнитного поля – магнитометров. В качестве измерительного преобразователя в них обычно применяют феррозонд или датчик Холла. Современные магнитометры измеряют напряженности постоянных и переменных магнитных полей в диапазоне от десятых долей до десятков тысяч А/см, снабжены миниатюрными датчиками, что позволяет проводить измерение с высокой локальностью. На рис. 4.1 показан феррозондовый магнитометр МФ-24МФ для измерения остаточной намагниченности ферромагнитных объектов. Диапазон измерения 5...2000 мкТл. Прибор снабжен феррозондовым преобразователем градиентометрического типа, что позволяет измерять остаточную напряженность деталей после размагничивания.



Рис. 4.1. Феррозондовый магнитометр МФ-24МФ (www.aka-control.ru)



Рис. 4.2. Измеритель напряженности магнитного поля ИМП-6 (www.labcentr.ru)

Измеритель напряженности магнитного поля ИМП-6 (рис. 4.2) предназначен для определения степени размагничивания деталей, изделий и полуфабрикатов из ферромагнитных материалов путем измерения нормальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи поверхности контролируемого изделия. Может также использоваться для прямого измерения напряженности постоянного магнитного поля в диапазоне до 200 А/см. Для контроля малогабаритных слабо намагниченных изделий предусмотрен режим компенсации однородных магнитных полей (например, поля Земли). Аналогичные приборы выпускаются многими зарубежными фирмами.

4.3.2. Измерение тока циркулярного намагничивания

Если дефектоскоп имеет устройство циркулярного намагничивания, в технических характеристиках указывается вид тока (постоянный, переменный, импульсный) и максимальное значение циркулярного тока намагничивания. При использовании циркулярного намагничивания обычно измеряется значение тока в гибком кабеле или между замкнутыми электроконтактами с помощью токового шунта. При измерении тока в электроконтактах важное значение имеет величина контактного сопротивления, поэтому в документации должно быть указано значение силы прижима электроконтакта в процессе измерения. Для измерения силы тока рекомендуется [15] токовый шунт 75-ШС-1500А (или аналогичный, в зависимости от силы тока). Полученные результаты измерения сравниваются с паспортными значениями и в случае, если они ниже, причиной может быть неисправность в намагничивающих устройствах или высокое контактное сопротивление.

4.4. Контроль параметров осветительных устройств

В соответствии с ГОСТ 21105–87 освещенность поверхности детали при осмотре должна составлять не менее 1000 люкс. Необходимо отметить, что ГОСТ не устанавливает количество источников освещения и схему их расстановки. При работе в цеховых условиях на участке магнитной дефектоскопии применяют как общее цеховое освещение, так и обязательно применяют дополнительные источники освещения. Предпочтение следует отдавать источникам освещения, дающим мягкий рассеянный свет – люминесцентные лампы или ряд ламп накаливания. Для измерения освещенности на поверхности детали применяют люксметры (Ю-16, Ю-116 или аналогичные).

Осмотр изделий, обработанных люминесцентной магнитной суспензией, следует проводить в ультрафиолетовом свете от источников ультрафиолетового излучения с длиной волны 3 150 400 нм. При этом ультрафиолетовая облученность контролируемой поверхности должна быть не менее 2000 мкВт/см² (200 относительных единиц по ГОСТ 18442–80). Методика измерения УФ-облученности приведена в [15]. При осмотре поверхности детали с применением УФ-осветителя засветка поверхности обычным светом не должна превышать 10 лк. Для защиты глаз и кожных покровов от ультрафиолетового излучения дефектоскопист при работе с УФ-осветителем должен работать в закрытой спецодежде и в защитных очках.

4.5. Метрологическое обеспечение магнитопорошковых дефектоскопов

В комплект дефектоскопа обязательно должен входить поверенный контрольный образец (КО) или стандартный образец предприятия (СОП). Отсутствие этих образцов не позволяет подготовить прибор к работе и убедиться в работоспособности оборудования в целом. Нормативной документацией разрешается использовать КО двух типов:

- детали с реальными дефектами, выбранные из технологического потока или из числа деталей, бывших в эксплуатации;
- специально изготовленные образцы с искусственными дефектами.

В любом из вариантов КО должен быть аттестован, т. е. должен иметь паспорт с указанием марки стали, магнитных свойств стали, количества и размеров дефектов, их расположения на образце. Кроме того, к нему должна прилагаться дефектограмма, фотография или эскиз расположения индикаций. Контрольные образцы в магнитной дефектоскопии должны поверяться организацией, которая имеет лицензию на данный вид деятельности. Периодичность поверки определяется нормативными документами и обычно составляет три года.

Если в качестве КО выбирается деталь с дефектом, то для оценки размеров дефекта используют специальные инструментальные микроскопы, причем объективно можно измерить только длину и раскрытие дефекта. Информация о глубине дефекта в этом случае не указывается (основной недостаток КО данного типа).

В настоящее время существует большое количество конструкций контрольных образцов. В ГОСТ 21105–87 описаны 4 варианта технологии изготовления контрольных образцов, основанных на предварительном азотировании поверхностного слоя металла на глубину 0,2...0,3 мм с последующей механической деформацией вплоть до появления поверхностных трещин на глубину азотированного слоя. Такие контрольные образцы весьма популярны, например, ЦНИИТМАШ (г. Москва) выпускает комплекты образцов в виде стальных пластин с искусственными трещинами в азотированном слое по условным уровням *A*, *B* и *B*. Достоинством этих контрольных образцов является то, что известны все три размера искусственной трещины, но точность задания глубины трещины невысока и в паспорте контрольного образца размер глубины указывается без допусков. Также весьма популярны контрольные образцы с сеткой закалочных трещин, в частности, такими образцами комплектуются магнитопорошковые дефектоскопы ПМД-70.

Дефекты в контрольных образцах выполняют различными способами:

- фрезеровкой либо посадкой вкладышей (рис. 4.3) – физические свойства таких трещин существенно отличаются от реальных трещин;
- под действием циклической нагрузки, то есть искусственные усталостные трещины – такую технологию отличает трудоемкость и сложность задания необходимых геометрических размеров;
- электроэрозионным методом с помощью электрического разряда – по этой технологии сложно задавать малые размеры раскрытия дефекта;
- контрольный образец может подвергаться деформациям до образования трещины на азотированной поверхности – невысокая точность задания глубины дефекта.

В случае изготовления КО с искусственными трещинами существует технология, позволяющая задавать у трещин определенную глубину. Например, стальную пластину подвергают односторонней азотации (выдерживают в атмосфере азота при повышенном давлении и температуре в течение суток). При этом расчетная глубина азотации пластины известна, причем металл в азотированном слое более твердый и более хрупкий. Затем пластину изгибают, в результате чего в ней образуется трещина, причем глубина трещины ограничена толщиной азотированного слоя. Раскрытие трещины определяют при помощи микроскопа. По этому принципу изготавливают КО для оценки выявляющей способности магнитных индикаторов по условному уровню чувствительности *A*, *B* и *B* с трещинами, раскрытие которых составляет соответственно 2, 10 и 25 мкм (не строго указанные значения, но близко к ним), длина трещины 20 мм, а глубина 0,3 мм (т. е. считается равной глубине азотации).

Описанная технология производства КО – далеко не единственная. Можно упомянуть получившие распространение в европейских странах КО с постоянным магнитом с линейным протяженным дефектом (фирма *Karl Deutsch*), тест-образец Бертольда или американский кольцевой образец (по стандарту *ASME*).

Для изготовления дефектограмм в последние годы, кроме фотографирования, чаще всего применяют технологию с использованием прозрачной липкой ленты (скотч):

- образец намагничивают и выявляют трещины, используя обычную суспензию;
- поверхность тщательно высушивают и на область отложений порошка накладывают липкую ленту, плотно прижимая ее к поверхности детали;
- снимают ленту с образца вместе с прилипшими частицами порошка;

- дефектограмму размещают между пластинами из оргстекла или другого прозрачного материала, для большей контрастности изображения между пластинами необходимо проложить листок белой бумаги.

Как правило, на дефектограмме выделяют участок с наиболее четкими и характерными индикациями, по которому и необходимо проводить сравнение.

На рис. 4.3 показана конструкция контрольного образца, состоящего из цилиндрической вставки (1), размещенной в корпусе (2). Вставка образует поверхностный дефект (3) типа трещина, на образце возможно наличие немагнитного покрытия (4), на практике чаще используют вариант без защитного покрытия.

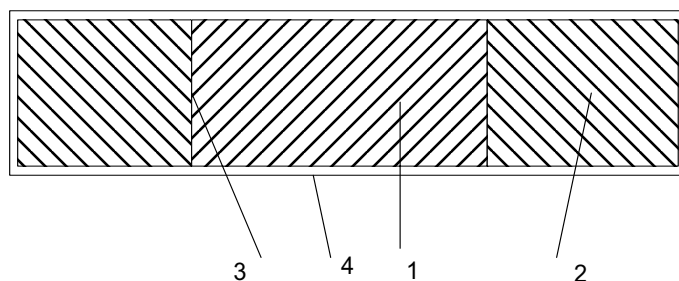


Рис. 4.3. Контрольный образец с поверхностным дефектом

Контрольный образец на рис. 4.4 предназначен для контроля качества двусторонних сварных швов [16] и содержит искусственный дефект (4) в виде фрезерованного паза и ферромагнитный сегмент (5), смещение которого позволяет задавать различные радиусы кривизны верхнего шва, а одна из шкал отградуирована в значениях радиуса кривизны.

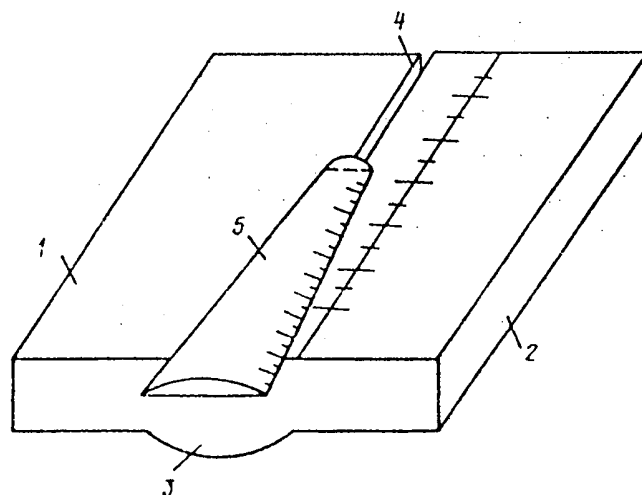


Рис. 4.4. Контрольный образец для магнитного контроля качества двусторонних сварных швов

Контрольный образец на рис. 4.5 содержит имитатор сварного соединения [17] в виде пластинок (1) и (2), взаимное перемещение которых позволяет изменять размер дефекта (3) и оценивать этот размер по шкале (4). В случае, если пластины выполнены клиновидной формы (рис. 4.6), перемещение пластин позволяет задавать различную глубину залегания дефекта, которую можно оценить по шкале (5).

При настройке магнитных дефектоскопов для контроля отверстий при возможном наличии радиально расходящихся трещин контрольный образец предлагается изготавливать [18] из пластины, азотированной на заданную глубину, с отверстием в центре пластины. При изгибе пластины на матрице с помощью пуансона вокруг отверстия образуются радиально направленные поверхностные микротрещины.

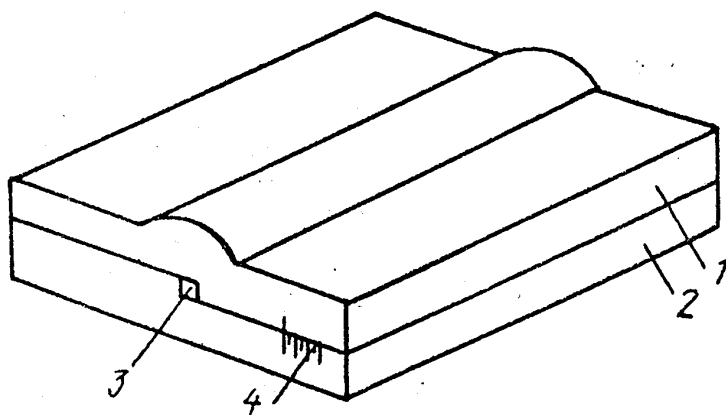


Рис.4.5. Контрольный образец – имитатор сварного соединения

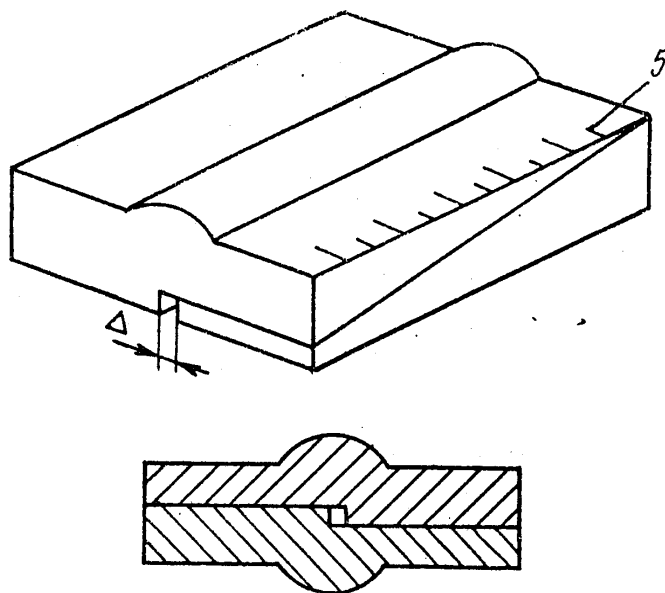


Рис. 4.6. Контрольный образец – имитатор сварного соединения с пластинами клиновидной формы

На рис. 4.7 представлен контрольный образец [19], состоящий из двух треугольных призм (1) и (2), на внутренних поверхностях которых изготовлены искусственные дефекты (3) в виде пазов с разной глубиной залегания. Такой контрольный образец позволяет определить чувствительность магнитного индикатора к подповерхностным дефектам, однако геометрия дефектов далека от дефектов металлургического происхождения.

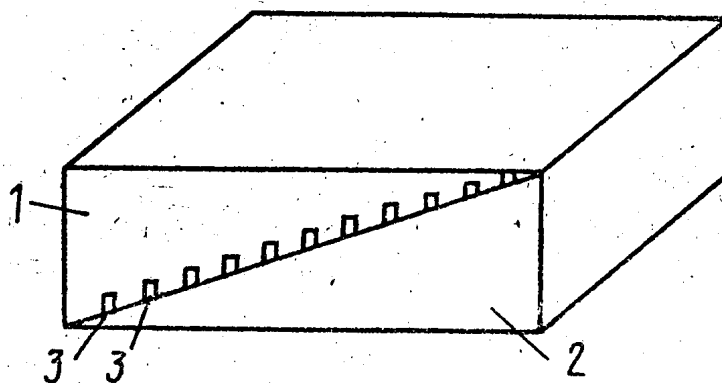


Рис. 4.7. Контрольный образец с рядом дефектов с убывающей глубиной залегания

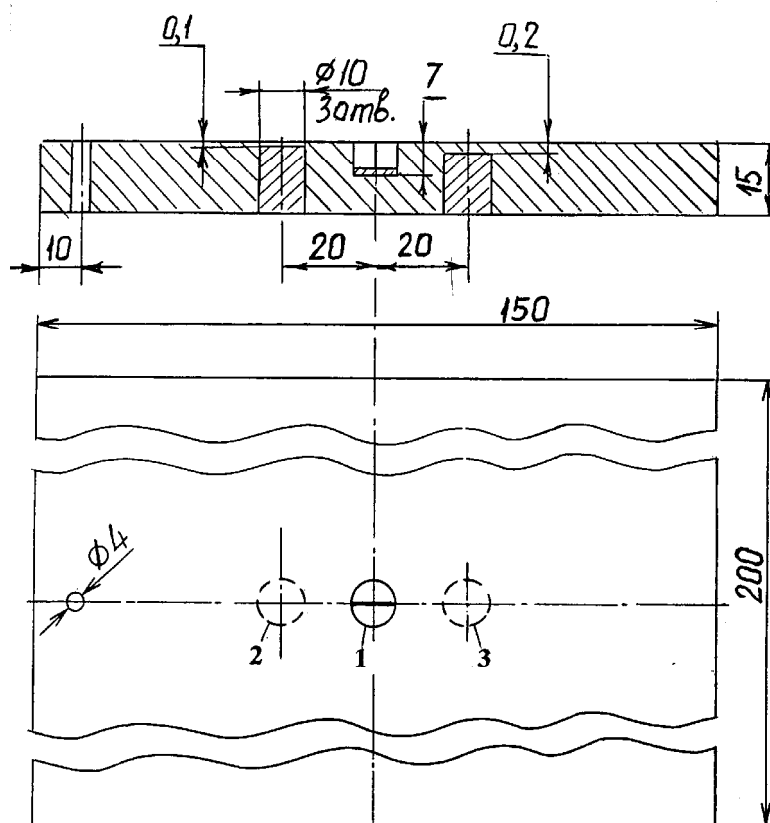


Рис. 4.8. Контрольный образец МО-1 Г.С. Шелихова

На рис. 4.8 представлен контрольный образец МО-1 Г.С. Шелихова [20], в котором подповерхностные дефекты (2) и (3) имитируются за счет ферромагнитных цилиндрических вкладышей, которые отделены от верхней рабочей поверхности перемычками размером 0,1 и 0,2 мм соответственно. Дефекты подобного типа можно принять близкими к внутреннему расслоению металла. Конструкция в целом сложна в изготовлении, а точность задания глубины залегания дефекта при этом невысока.

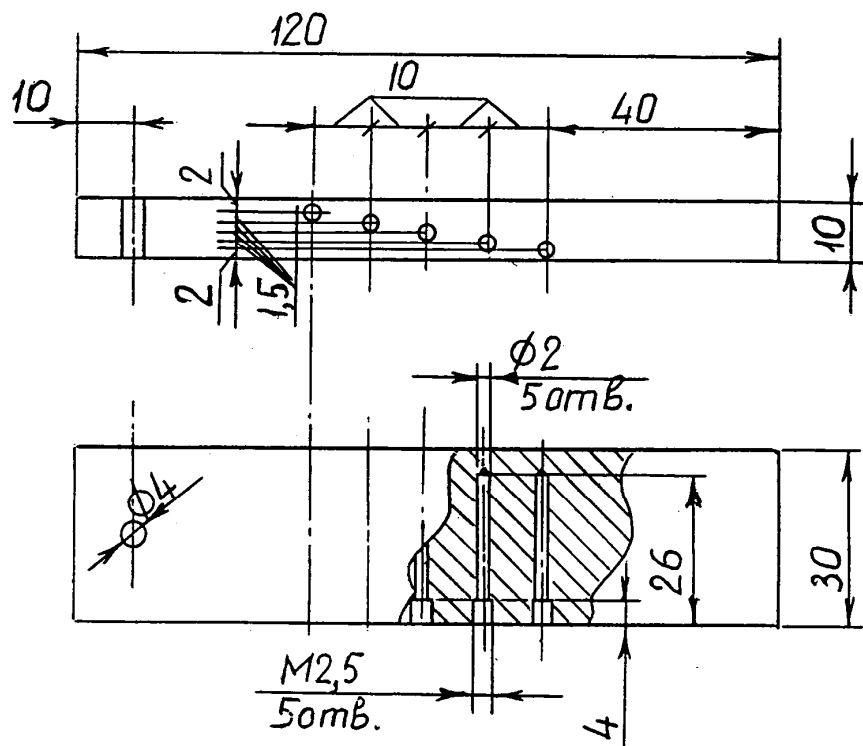


Рис. 4.9. Контрольный образец МО-3 Г.С. Шелихова

На рис. 4.9 представлен контрольный образец МО-3 Г.С. Шелихова с рядом подповерхностных дефектов с глубиной залегания от 2 до 8 мм. Дефекты представляют собой отверстия диаметром 2 мм и длиной 26 мм. Геометрия и магнитные свойства таких дефектов далеки от реальных, поэтому областью применения таких контрольных образцов является оценка выявляющей способности магнитных индикаторов (порошков и суспензий).

Контрольный образец МО-4 Г.С. Шелихова (рис. 4.10) является аналогом образца ASME, применяемого в США. Образец имеет тороидальную форму, намагничивание производится циркулярным способом путем пропускания тока по проводнику, продетому через центральное отверстие. Образец имеет 9 сквозных отверстий малого диаметра с раз-

личными расстояниями от оси отверстия до образующей тороида, которые имитируют подповерхностные дефекты и также рекомендован для оценки выявляющей способности магнитных индикаторов, т. к. параметры дефектов в виде сквозных отверстий далеки от свойств реальных дефектов. По сравнению со стандартом ASME образец дополнен поверхностными дефектами (1) и (2) с различной ориентацией, что расширяет его функциональные возможности при оценке выявляющей способности магнитных порошков и суспензий к поверхностным и подповерхностным дефектам.

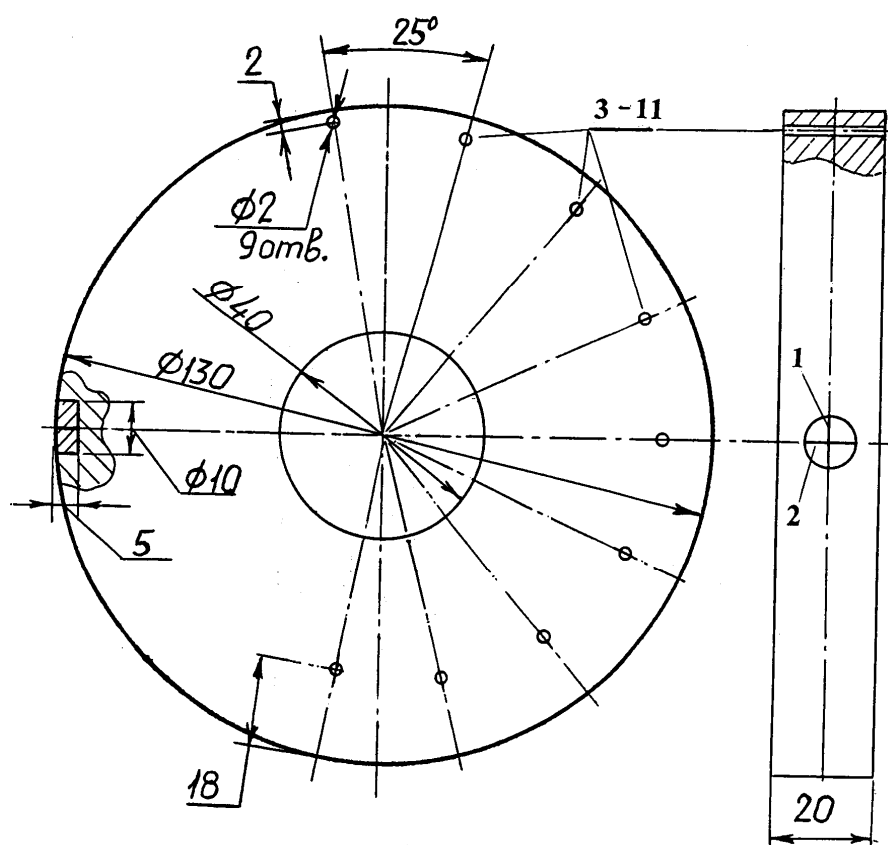


Рис.4.10. Контрольный образец МО-4 Г.С. Шелихова

Краткий обзор, проделанный выше, позволяет сделать ряд выводов.

- Несмотря на большое количество конструкций контрольных образцов, защищенных патентами и авторскими свидетельствами, в практической деятельности используется ограниченное количество конструкций. Это связано с тем, что ряд конструкций обладает сложной технологией воспроизводства заявленных метрологических характеристик, а некоторые конструкции не обладают необходимой универсальностью и решают узкий круг задач.

- Большинство конструкций контрольных образцов воспроизводят поверхностные дефекты. Образцы с подповерхностными дефектами зачастую воспроизводят конфигурацию, далекую от реальных дефектов, например металлургического происхождения [2, 3].
- Практически отсутствуют конструкции контрольных образцов, которые бы позволили одновременно провести настройку и определить чувствительность магнитного дефектоскопа к поверхностным и подповерхностным дефектам.

Для решения этой проблемы автором предложено две конструкции контрольных образцов. На рис. 4.11 представлен контрольный образец для магнитной дефектоскопии [21] в виде ферромагнитной пластины (1) с цилиндрической вставкой (2), в которой выполнено сквозное отверстие (3) (оно может быть наклонным), имитирующее подповерхностный дефект, залегающий на известной глубине.

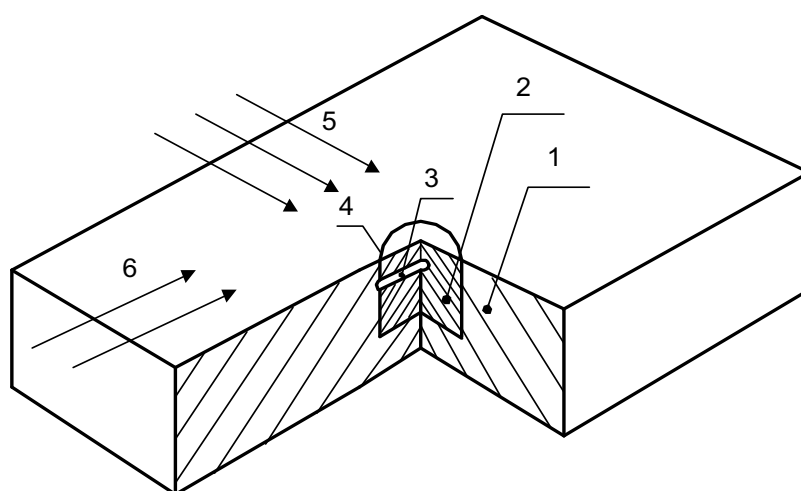


Рис. 4.11. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии

При намагничивании в направлении 6 возникает поле рассеяния дефекта по линии сопряжения пластины (1) и вставки (2), т. е. происходит оценка чувствительности только к поверхностным дефектам. При намагничивании в направлении 5 поле рассеяния возникает по линии сопряжения пластины (1) и вставки (2), а также над подповерхностным дефектом в виде отверстия (3). Следовательно, в этом варианте намагничивания возможно одновременное определение чувствительности оборудования к поверхностным и подповерхностным дефектам.

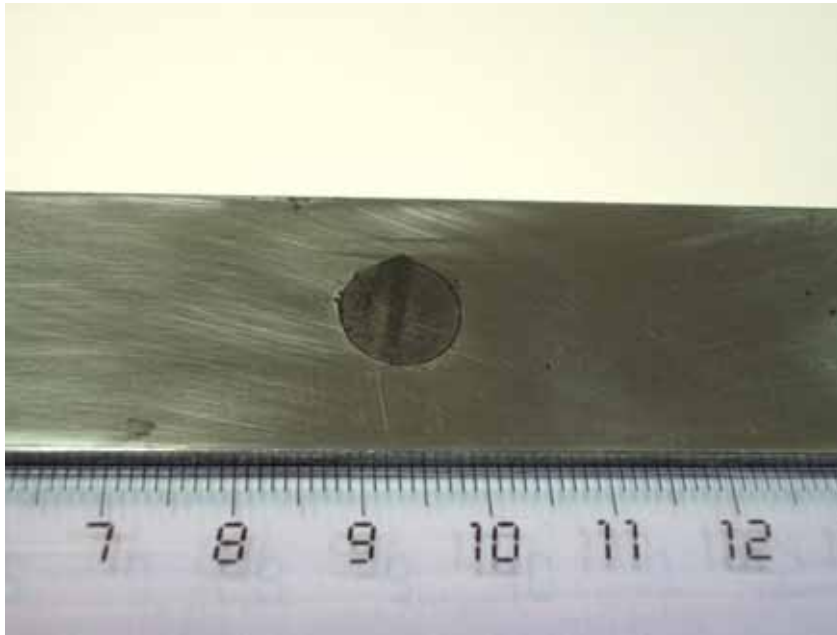
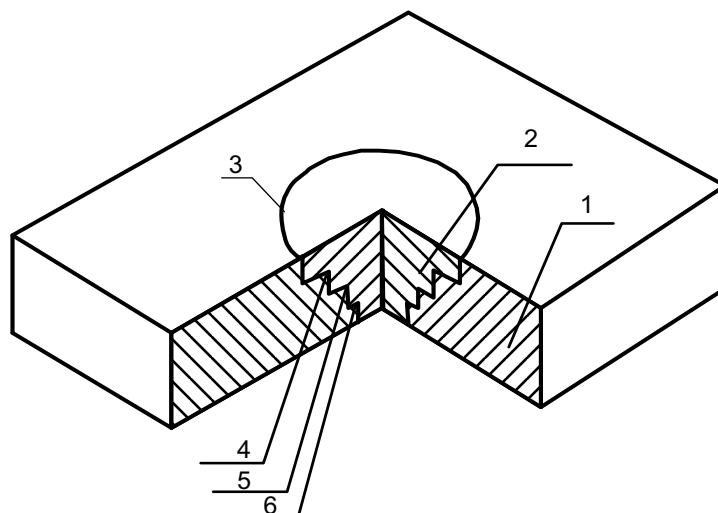


Рис. 4.12. Фотография отложения магнитного порошка в зоне подповерхностного дефекта

На рис. 4.12 представлена фотография отложения магнитного порошка в зоне подповерхностного дефекта, полученная при продольном намагничивании приставным электромагнитом дефектоскопа ПМД-70 (намагничивающий ток 0,5 А) в режиме приложенного поля. Широкая полоса магнитного порошка соответствует подповерхностному дефекту.

Поскольку параметры подповерхностного дефекта в этой конструкции также далеки от свойств реальных дефектов, была предложена улучшенная конструкция [22].



*Рис. 4.13. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии
1 – корпус; 2 – вкладыш; 3 – поверхностный дефект;
4, 5, 6 – подповерхностные дефекты*

Данный контрольный образец может быть выполнен как из ферромагнитного, так и из немагнитного электропроводного материала для настройки как магнитных, так и вихретоковых дефектоскопов. Он позволит определить чувствительность дефектоскопов к подповерхностным дефектам, залегающим на разной глубине. Физические свойства искусственных подповерхностных дефектов предлагаемого контрольного образца, недалеко от физических свойств реальных подповерхностных дефектов, возникающих в результате реальных металлургических либо усталостных процессов (например, флокены – внутренние дугообразные надрывы металла), что также позволит повысить точность и надёжность контроля.

Данная модель контрольного образца является технологичной в изготовлении. В ней просто задается размер глубины залегания подповерхностных дефектов, а за счет выбора типа посадки вкладыша (2) можно обеспечить поверхностные дефекты, соответствующие условным уровням чувствительности *A*, *B* или *B* при магнитопорошковой дефектоскопии.

На рис. 4.14 показана картина отложения магнитного порошка на контрольном образце с поверхностным и подповерхностным дефектом с глубиной залегания 1 мм. Продольное намагничивание проводилось способом приложенного поля приставным электромагнитом дефектоскопа ПМД-70 (намагничивающий ток 0,5 А). Во внутренней области наблюдаются четкие дугообразные отложения порошка, соответствующие подповерхностному дефекту.



Рис. 4.14. Картина отложения магнитного порошка на контрольном образце для магнитной дефектоскопии с поверхностным и подповерхностным дефектом

Таким образом, предложенные технические решения позволят повысить достоверность магнитных методов контроля за счет возможности настройки дефектоскопического оборудования и определения чувствительности одновременно к поверхностным и подповерхностным дефектам.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Какие признаки измерительного прибора имеются у магнитопорошкового дефектоскопа?
 - а) Измерительная шкала и цена деления шкалы.
 - б) Погрешность обнаружения дефекта.
 - в) Магнитопорошковый дефектоскоп не является измерительным прибором.
2. Какой максимальный размер частиц магнитного порошка допустим при сухом способе контроля?
 - а) 150 мкм.
 - б) 50 мкм.
 - в) 20 мкм.
 - г) 10 мкм.
3. Какие свойства магнитного порошка определяются по методу отстоя?
 - а) Магнитные свойства порошка.
 - б) Механические свойства порошка.
 - в) Магнитные и механические свойства порошка одновременно.
 - г) Условный уровень чувствительности.
4. Какие свойства магнитного порошка определяется по методу магнитно-весовой пробы?
 - а) Магнитные свойства порошка.
 - б) Механические свойства порошка.
 - в) Магнитные и механические свойства порошка одновременно.
 - г) Условный уровень чувствительности.
5. Какое количество источников освещения необходимо применять при осмотре поверхности детали согласно ГОСТ 21105–87?
 - а) Не менее двух.
 - б) Не менее трех источников освещения.
 - в) ГОСТ не устанавливает количество источников света.

6. Допустимо ли изготавливать контрольные образцы из числа бракованных деталей, бывших в эксплуатации?
- а) Допустимо, если образец прошел процедуру аттестации и в паспорте указаны его метрологические характеристики и параметры материала.
 - б) Недопустимо, т. к. контрольные образцы изготавливают только с искусственными дефектами.
7. Какие сведения должен содержать паспорт контрольного образца для настройки уровня чувствительности магнитопорошкового дефектоскопа?
- а) Магнитные свойства стали, количество дефектов и их расположение на образце, к нему должна прилагаться дефектограмма, фотография или эскиз расположения индикаций.
 - б) Марка стали, магнитные свойства стали, количество дефектов и их расположение на образце, размеры дефектов.
 - в) Марка стали, магнитные свойства стали, количество дефектов и их расположение на образце, условный уровень чувствительности и дефектограмма, фотография или эскиз расположения индикаций.
 - г) Марка стали, магнитные свойства стали, количество дефектов и их расположение на образце, дефектограмма, фотография или эскиз расположения индикаций.
8. Для чего служат контрольные образцы с азотированным поверхностным слоем?
- а) Для оценки чувствительности магнитопорошкового контроля к подповерхностным дефектам.
 - б) Для оценки чувствительности магнитопорошкового контроля к поверхностным дефектам.
 - в) Для оценки чувствительности магнитопорошкового контроля к поверхностным и подповерхностным дефектам.
 - г) Для оценки чувствительности магнитопорошкового контроля к внутренним дефектам.
9. Какова должна быть освещенность поверхности ультрафиолетовым облучателем при магнитолюминесцентном контроле?
- а) 1000 относительных единиц.
 - б) 100 относительных единиц.
 - в) 50 относительных единиц.
 - г) 200 относительных единиц.

10. Какое количество сухого магнитного порошка содержит водная магнитная суспензия?
- а) 25 ± 5 г/л.
 - б) 4 ± 1 г/л.
 - в) Норма указывается производителем порошка в паспортных данных.
11. Каков основной недостаток контрольных образцов, в которых искусственные трещины изготавливают путем фрезеровки металла?
- а) Сложно изготавливать наклонные трещины.
 - б) Физические свойства таких трещин существенно отличаются от трещин естественного происхождения.
 - в) Сложно изготавливать трещины в твердых сплавах.
12. Для каких целей применяется стандартный образец МО-4 (аналог стандартного образца ASME)?
- а) Оценка выявляющей способности магнитного индикатора.
 - б) Определение условного уровня чувствительности контроля.
 - в) Определение дисперсности магнитного порошка.

Глава 5

АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПО РОССИЙСКИМ И МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ

5.1. Общие положения. Понятие об опасном производственном объекте

Прежде чем обсуждать системы аттестации специалистов в области неразрушающего контроля по российским и международным стандартам, необходимо напомнить, что аттестация специалистов является лишь частью большой системы мероприятий, главными целями которой являются:

- обеспечение безопасности производства;
- обеспечение выпуска конкурентоспособной продукции высокого качества.

Обе указанные цели являются взаимодополняющими и не могут достигаться отдельно или одна за счет другой. Поэтому в любой промышленно развитой стране осуществляется система мероприятий, позволяющих реализовывать эти цели. Поскольку сама структура промышленности очень разнообразна, носит отраслевой характер, то невозможно определить общие правила, например, при производстве подводных лодок и при транспортировке газа по магистральным газопроводам. При этом почти все современные производства объединяет общий признак – в этих производствах имеются опасные производственные объекты. Поэтому в России в основе системы обеспечения безопасности и качества производства лежит Федеральный Закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [23]. В этом законе определены следующие важнейшие понятия:

- **Промышленная безопасность (Industrial safety) опасных производственных объектов** – состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий.
- **Авария (Failure)** – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ.
- **Инцидент (Incident)** – отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса, нарушение положений настоящего Федерального закона, других федеральных

законов и иных нормативных правовых актов Российской Федерации, а также нормативных технических документов, устанавливающих правила ведения работ на опасном производственном объекте.

В соответствии с Федеральным законом к категории опасных производственных объектов относятся объекты, на которых:

- 1) получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются следующие опасные вещества:
 - а) воспламеняющиеся вещества;
 - б) окисляющие вещества;
 - в) горючие вещества;
 - г) взрывчатые вещества;
 - д) токсичные вещества;
 - е) высокотоксичные вещества;
 - ж) вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды;
- 2) используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С;
- 3) используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры;
- 4) получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов;
- 5) ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

Производственную деятельность всех предприятий, которые подпадают под приведенный перечень, регламентирует специальный орган – **Российский технический надзор (Ростехнадзор)**. Для обеспечения технической политики в области безопасности производства и обеспечения качества технологического оборудования и выпускаемой продукции Ростехнадзор разработал Систему неразрушающего контроля [24]. Управление Системой НК основано на аттестации:

- 1) персонала в области неразрушающего контроля по квалификации, полноте и качеству выполнения контрольных работ;
- 2) лабораторий неразрушающего контроля;
- 3) методической документации по неразрушающему контролю, экспертизе полноты и достаточности методик неразрушающего контроля;
- 4) средств неразрушающего контроля.

Концепция управления системой НК нацелена на решение следующих задач:

- 1) создание организационных структур по проведению аттестации;
- 2) разработка и утверждение нормативных документов по проведению аттестации;
- 3) проведение организационных мероприятий по внедрению процедуры аттестации.

Основные организационно-технические принципы проведения аттестации должны быть изложены в обязательных, единообразных и однозначных для всех видов промышленного надзора и организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты и осуществляющих деятельность в области неразрушающего контроля, документах:

- 1) Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля;
- 2) Правила аттестации лабораторий неразрушающего контроля;
- 3) Правила аттестации методических документов по неразрушающему контролю;
- 4) Правила аттестации средств неразрушающего контроля.

В соответствии с изложенной концепцией в области процедуры аттестации Ростехнадзор разработал правила аттестации специалистов в области неразрушающего контроля.

5.2. Аттестация специалистов в области неразрушающего контроля по правилам Ростехнадзора (ПБ 03-440-02) [25]

В соответствии с этими Правилами аттестация персонала в области НК проводится в целях подтверждения достаточности теоретической и практической подготовки, опыта, компетентности специалиста, т. е. его профессиональных знаний, навыков, мастерства и предоставления права на выполнение работ по одному или нескольким видам (методам) НК. Специалисты НК, в зависимости от их подготовки и производственного опыта, аттестуются по трем уровням профессиональной квалификации – I, II, III.

Аттестации подлежит персонал, проводящий контроль объектов с применением следующих видов (методов) неразрушающего контроля:

- Ультразвуковой (УК) – Ultrasonic Testing (UT);
- Акустико-эмиссионный (АЭ) – Acoustic Emission Testing (AET);
- Радиационный (РК) – Radiography Testing (RT);
- Магнитный (МК) – Magnetic Testing (MT);
- Вихретоковый (ВК) – Eddy Current Testing (ET);

- Проникающими веществами: капиллярный (ПВК) – Liquid Penetrant Testing (LPT), течеискание (ПВТ) – Leak Testing (LT);
- Визуальный и измерительный (ВИК) – Visual Measuring Testing (VMT);
- Вибродиагностический (ВД) – Vibrodiagnostic Testing;
- Электрический (ЭК) – Electrical Testing;
- Тепловой (ТК) – Infrared and Thermal Testing (IR);
- Оптический (ОК) – Optical Testing (OT).

Правила могут быть применены и к другим методам НК при наличии соответствующей документации и квалификационных требований.

Кандидат, претендующий на прохождение аттестации на один из трех уровней квалификации, аттестуется по конкретным (одному или более) методам НК.

Областью аттестации каждого кандидата является сфера его деятельности по контролю конкретных объектов, перечень которых приведен в настоящих Правилах. Затем этот перечень расширялся, и в настоящее время в него включены следующие объекты.

Примерный перечень объектов контроля: технических устройств, зданий и сооружений, для оценки соответствия которых требованиям промышленной безопасности целесообразно применение неразрушающего контроля.

1. Объекты котлонадзора.
2. Системы газоснабжения (газораспределения).
3. Подъемные сооружения.
4. Объекты горнорудной промышленности.
5. Объекты угольной промышленности.
6. Оборудование нефтяной и газовой промышленности.
7. Оборудование металлургической промышленности.
8. Оборудование взрывопожароопасных и химически опасных производств.
9. Объекты железнодорожного транспорта.
10. Объекты хранения и переработки зерна.
11. Здания и сооружения (строительные объекты).
12. Оборудование электроэнергетики.

Каждый из перечисленных пунктов, в свою очередь, разбит на подпункты, включающие в себя различное оборудование, объединенное по функциональному назначению. Например, трубопроводы пара и горячей воды включены в разделы 1 и 8, а газопроводы включены в раздел 2, 6 и 8.

Специалисты, аттестованные в соответствии с настоящими Правилами, могут выполнять НК в соответствии с квалификационными уровнями теми методами и тех объектах, которые указаны в их удостоверениях.

Аттестацию персонала проводят Независимые органы по аттестации персонала системы НК. Независимый орган – организация, осуществляющая:

- прием и анализ документов кандидатов на аттестацию;
- проведение экзаменов (общего, специального, практического и по проверке знаний правил безопасности);
- оценку квалификационного уровня кандидатов и выдачу документов об аттестации (удостоверений);
- создание в своей структуре экзаменационных центров, укомплектованных квалифицированным персоналом и оснащенных соответствующими средствами НК;
- ведение перечня аттестованного персонала в области неразрушающего контроля;
- хранение документов, относящихся к аттестации персонала не менее периода аттестации, включая продление удостоверения (6 лет для I и II уровней, 10 лет для III уровня);
- участие в разработке проектов организационных, методических и других документов по аттестации персонала с целью обеспечения единых подходов, процедур, содержания и оценки квалификационных экзаменов и аттестации персонала.

Экзаменационные центры осуществляют:

- прием и анализ документов у кандидатов на аттестацию;
- подготовку необходимых средств НК для проведения экзаменов;
- проведение экзаменов (общего, специального, практического и по проверке знаний правил безопасности) на I и II уровнях с оформлением соответствующих протоколов.

Решение об аттестации, на основании представленных экзаменационным центром документов, принимает Независимый орган, при котором он организован. Удостоверение оформляется Независимым органом.

5.2.1. Требования к общей и специальной подготовке персонала в области неразрушающего контроля

Кандидат, претендующий на присвоение квалификационного уровня, должен иметь соответствующее общее образование (в соответствии с приложением к Правилам достаточно среднего образования), теоретическую подготовку и опыт практической работы по НК.

Для допуска к экзаменам на соответствующий уровень кандидат должен пройти подготовку по определенному методу НК. Минимальные подтверждаемые сроки подготовки кандидатов на I и II уровни квалификации по магнитному контролю составляют 40 часов (рекомендовано 20 часов теоретических занятий и 20 часов практики).

Подготовка кандидатов на III уровень квалификации может проводиться различными способами: курсы повышения квалификации, самостоятельная подготовка (изучение учебных пособий, нормативно-методических документов, публикаций, периодических изданий, специализированных материалов, журналов и другой профессиональной литературы, подготовка публикаций, выступления на конференциях и семинарах).

Программа подготовки должна отражать требуемый объем знаний и навыков специалиста по каждому методу НК, уровню квалификации и состоять из общего курса и специальных курсов по каждому производственному сектору.

Требования по минимальному производственному опыту работы в области НК для кандидатов I и II уровней при аттестации по магнитному контролю составляют:

- 3 месяца для специалиста I уровня;
- 9 месяцев для специалиста II уровня (при наличии I уровня);
- 12 месяцев для специалиста II уровня (для специалиста, не имеющего I уровня).

Кандидат должен также представить медицинское заключение по установленной форме.

5.2.2. Квалификационные требования к персоналу в области неразрушающего контроля

5.2.2.1. Требования к квалификации специалиста I уровня

Специалист I уровня квалификации имеет право проводить НК тем методом, на который он аттестован, в строгом соответствии с методиками, технологическими инструкциями и под наблюдением персонала II или III уровня.

Специалист I уровня должен знать:

- общие закономерности по физике, электротехнике, электронике, механике, технологии материалов и материаловедению;
- типы дефектов, вероятные зоны и основные причины их образования в конкретных объектах;

- принципы, основные физические процессы, на которых базируется метод контроля, назначение и область его применения;
- принципы устройства и работы, органы управления и порядок настройки аппаратуры;
- правила электробезопасности и пожарной безопасности, правила устройства и безопасной эксплуатации поднадзорных Госгортехнадзору России объектов, контроль которых он проводит.

Специалист I уровня должен уметь:

- подготавливать объект к контролю;
- производить настройку и регулировку аппаратуры;
- рационально организовывать свое рабочее место;
- осуществлять контроль, выполнять операции по поиску дефектов;
- регистрировать и классифицировать результаты контроля в соответствии с нормами и критериями, установленными в документах, фиксировать на объекте и в соответствующей документации зоны, в которых предполагается наличие дефекта;
- предоставлять отчет по результатам контроля;
- выполнять необходимые операции с объектом по завершении контроля.

Специалист I уровня **не осуществляет** самостоятельно выбор метода НК, оборудования, технологии и режимов контроля, не проводит оценку результатов контроля.

5.2.2.2. Требования к квалификации специалиста II уровня

Специалист II уровня квалификации имеет право самостоятельно осуществлять НК и выдавать заключение о качестве проверенных объектов по результатам контроля, вести подготовку и руководство персоналом I и II уровней, разрабатывать письменные инструкции (технологические карты) по НК.

Специалист II уровня квалификации должен быть компетентным:

- в оценке качества изделия по результатам НК, классификации и области применения видов (методов) контроля;
- конструктивных особенностях, технологии изготовления, эксплуатации и ремонта объекта контроля, типах дефектов, их классификации, потенциальной опасности и вероятных зонах образования с учетом действующих нагрузок;
- физических принципах, закономерностях метода, определении ограничений применения метода, по которому присваивается квалификация;

- устройстве и функциональных схемах аппаратуры для данного метода контроля, включая правила отбора и проверки качества применяемых расходных материалов;
- основных параметрах метода и аппаратуры, определяющих достоверность результатов контроля, системах расчета параметров контроля, способах их измерения и метрологического обеспечения;
- измеряемых характеристиках и признаках выявленных дефектов, методах оценки чувствительности;
- технологии контроля конкретных объектов данным методом (подготовке объекта, выборе основных параметров, настройке аппаратуры, проведении контроля, возможных причинах ложного бракования);
- порядке оформления результатов контроля и хранения документации, основах применения компьютерной обработки;
- документах по НК (стандарты, методики и т. д.);
- знать сведения о других методах НК, правила выбора и рационального использования;
- порядке организации участков и рабочих мест при контроле конкретных объектов;
- основных неисправностях дефектоскопической аппаратуры и возможных способах их устранения в условиях предприятия, на котором осуществляется контроль;
- рациональной организации рабочего места, правилах электробезопасности и пожарной безопасности, правила устройства и безопасной эксплуатации поднадзорных Госгортехнадзору России объектов, контроль которых он проводит.

Специалист II уровня квалификации должен уметь:

- осуществлять все операции, перечисленные для I уровня;
- выбирать схему контроля для применяемого метода;
- проверять работоспособность аппаратуры и настраивать ее на заданные параметры, осуществлять полный комплекс работ по НК;
- правильно документировать, толковать и оценивать результаты в соответствии с применяемыми стандартами, нормами, руководящими документами. Оформлять результаты контроля с выдачей соответствующего заключения;
- составлять (разрабатывать) технологические инструкции (технологические карты) контроля конкретных объектов с использованием стандартов и действующих нормативно-технических документов;
- проводить экспериментальные работы по определению оптимальных режимов контроля;

- давать заключение по результатам контроля объектов, проконтролированных персоналом I уровня квалификации, с проведением, при необходимости, инспекционного контроля.

5.2.2.3. Требования к квалификации специалиста III уровня квалификации

Специалист, аттестованный на III уровень, получает право проведения всех операций по определенному методу НК, производит выбор технологии контроля и аппаратуры.

Специалист III уровня должен знать:

- принципы, физические основы, техническое обеспечение методов НК;
- конструктивные особенности, технологию изготовления, эксплуатации и ремонта объекта контроля; типы и виды дефектов, вероятные зоны их образования с учетом действующих на объект нагрузок и других факторов;
- принципы построения, функциональные схемы и правила эксплуатации аппаратуры для данного метода контроля, включая правила отбора и проверки качества применяемых расходных дефектоскопических материалов; системы контроля, используемые для проверки объектов (продукции) определенного вида; метрологическое обеспечение данного метода (вида) контроля;
- измеряемые характеристики и идентификационные признаки для разделения дефектов по классам и видам; знать и иметь опыт применения элементов теории вероятности, математической статистики при обработке результатов контроля;
- технологию контроля различных объектов данным методом; стандарты (коды) и другие действующие нормативные документы и правила по методу (виду) контроля и на аппаратуру для его применения;
- вредные экологические факторы данного метода контроля и способы предотвращения их воздействия на окружающую среду и человека;
- принципы планирования и организации работы лабораторий НК; современное состояние и перспективы развития данного метода НК;
- рациональную организацию рабочего места; правила электробезопасности и пожарной безопасности; правила устройства и безопасной эксплуатации поднадзорных Госгортехнадзору России объектов, контроль которых он проводит.

Специалист III уровня квалификации должен уметь:

- определять конкретные методы, оборудование, технологии и методики, подлежащие использованию для конкретных видов объектов;
- иметь достаточные практические знания о применении материалов, производствах и технологиях для выбора способа и метода контроля и определения критериев приемки;
- выполнять операции контроля, давать оценку и идентифицировать результаты контроля, выдавать заключения о качестве контролируемых объектов;
- на основе анализа отечественных и зарубежных стандартов, руководящих документов, относящихся к практике его работы, разрабатывать методики, технологические инструкции (технологические карты) на проведение контроля в производственных условиях;
- организовывать, проводить и руководить экспериментальными работами по определению оптимальных параметров контроля;
- обеспечивать и контролировать работу специалистов I и II уровней; участвовать в подготовке их к квалификационным экзаменам;
- участвовать в приеме квалификационных экзаменов.

5.2.3. Основные требования к квалификационному экзамену

Кандидат, проходящий аттестацию, сдает квалификационный экзамен. Квалификационный экзамен на I и II уровни квалификации включает:

- общий экзамен по физическим основам и закономерностям конкретного метода НК;
- специальный экзамен по технологии НК данным методом объектов конкретного вида по действующим стандартам, нормативным и методическим документам;
- экзамен по проверке знаний правил безопасности;
- практический экзамен, подтверждающий производственные навыки кандидата и включающий разработку технологических карт или письменных инструкций для специалистов II уровня с итоговым собеседованием.

Квалификационный экзамен на III уровень квалификации включает:

- общий экзамен по основному методу НК;
- специальный экзамен по применению НК по соответствующему объекту контроля, включая используемые стандарты, нормативные и методические документы и технические условия;
- экзамен по проверке знаний правил безопасности;
- практический экзамен включает разработку письменной инструкции и ее защиту на собеседовании в экзаменационной комиссии из трех специалистов III уровня квалификации по тому же методу;

- базовый *A*, содержащий вопросы:
 - технологии изготовления материалов и сварных соединений, материаловедению, типам дефектов;
 - квалификации персонала и процедуры аттестации, знание настоящих Правил;
- базовый *B* – общие знания по четырем методам НК в соответствии с требованиями II уровня, кроме основного, на который кандидат аттестуется.

5.2.4. Анализ результатов экзаменов и принятие решения об аттестации

После окончания проверки документов и процедуры квалификационных экзаменов Независимый орган в срок, не превышающий семи дней, оформляет квалификационное удостоверение, удостоверение о проверке знаний правил безопасности, регистрирует аттестованного специалиста и вносит информацию о нем в перечень.

Срок действия удостоверений I и II уровней – 3 года, а III уровня – 5 лет с даты аттестации.

Если специалист в течение срока действия удостоверений пройдет аттестацию по другому методу контроля, других объектов контроля или на другой уровень квалификации, то в удостоверения вносятся соответствующие дополнительные сведения или они заменяются, при этом номер удостоверений сохраняется.

При прохождении специалистом аттестации в различных Независимых органах, данные предыдущих удостоверений вносятся в последующие с соответствующей отметкой.

В случае утери или порчи документов об аттестации, срок действия которых еще не истек, Независимый орган по аттестации по заявлению организации-работодателя или аттестованного специалиста может выдать дубликат документа с соответствующей отметкой.

5.2.5. Прекращение действия аттестации

Решение о прекращении действия аттестации и аннулировании аттестационных документов может быть принято Независимым органом в следующих случаях:

- специалист стал физически неспособным выполнять свои обязанности, что подтверждается медицинским заключением (справкой) в соответствии с п. 2.5 настоящих Правил;
- специалист грубо нарушил требования нормативных документов по неразрушающему контролю, что подтверждается подписанными им заключениями и установлено компетентной комиссией;

- специалист после окончания срока действия удостоверения не представил в срок документы на продление аттестации;
- установлен значительный перерыв в работе (более 1 года суммарно) по методу контроля, по которому специалист имеет удостоверение.

Решение об аннулировании удостоверения принимается Независимым органом, который направляет его в территориальные округа Госгортехнадзора России по месту нахождения организации-работодателя или аттестованного специалиста, если заявка на аттестацию исходила от частного лица.

5.3. Аттестация специалистов по международному стандарту EN473

Российская система аттестации специалистов в области неразрушающего контроля формировалась с учетом мирового опыта в этой области специального образования. Поэтому между европейской и российской системами нет принципиальных отличий, и речь может идти только об особенностях и специфике европейской системы аттестации.

Стандарт EN473 устанавливает систему квалификации и сертификации персонала, осуществляющего неразрушающий контроль промышленной продукции. Понятие «промышленный» означает исключение из применения в медицине.

Перечень методов контроля качества, по которым происходит аттестация по стандарту EN473, почти повторяет перечень из ПБ 03-440-02, но не включает вибродиагностический метод неразрушающего контроля. Принципиально отличается перечень объектов, по которым проводится аттестация персонала. Более правильно будет сказать, что в стандарте EN473 нет разделения по объектам, а есть понятие **сектор**, причем это понятие распространяется как на производство, так и на продукцию, т. е. областью аттестации могут быть как **производственные сектора**:

- металлопроизводство;
- контроль в процессе изготовления, эксплуатации, ремонта;

так и **сектора продукции**:

- с – отливки;
- f – поковки;
- t – трубы;
- w – сварные соединения;
- wr – прокат.

Процедура аттестации имеет много схожего, состоит в сдаче общего, специального и практического экзаменов. Специальный экзамен ориентирован на применение данного вида контроля в определенном промыш-

ленном секторе, а также на знание контролируемой продукции и применяемых стандартов, технических условий и критериев приемки. Точно так же, собственно, аттестации предшествует обучение, состоящее из теоретической и практической части. Минимальные сроки обучения нормированы. Максимальный срок действия аттестации составляет 5 лет.

Контрольные вопросы к главе 5

Вопросы на знание Федерального Закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и ПБ 03-440-02

1. Какая категория взрывов подпадает под определение аварии согласно Федеральному Закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»?
 - а) Любые категории взрывов;
 - б) Только неуправляемые взрывы.
2. Попадает ли под действия Федерального Закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» объект, на котором используется оборудование, работающее при температуре нагрева воды не более 100 °С?
 - а) Да;
 - б) Нет.
3. Попадает ли под действия Федерального Закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» объект, на котором получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов?
 - а) Да;
 - б) Нет.
4. Каков минимальный образовательный уровень кандидата, претендующего на присвоение квалификационного уровня в области неразрушающего контроля?
 - а) Необходимо среднее специальное или высшее образование;
 - б) Необходимо общее образование.
5. Каков должен быть минимальный производственный стаж при аттестации по магнитному контролю кандидата на II уровень, не имеющего I уровня?
 - а) 6 месяцев;
 - б) 9 месяцев;
 - в) 12 месяцев.
6. Кто имеет право самостоятельно выбирать метод неразрушающего контроля, оборудование, технологию и проводить оценку результатов контроля?

- а) Специалист, аттестованный в соответствии с правилами ПБ 03-440-02;
 - б) Только специалисты II и III уровня;
 - в) Только специалисты III уровня.
7. Кто имеет право участвовать в приемке квалификационных экзаменов при аттестации специалистов в области неразрушающего контроля?
- а) Специалисты II и III уровня;
 - б) Специалисты III уровня;
 - в) Специалисты III уровня, а также кандидаты и доктора наук в области неразрушающего контроля.

Вопросы на знание EN473

8. Базовыми уровнями компетентности специалистов НК являются:
- а) кандидат на аттестацию, уровень I, уровень II, уровень III;
 - б) ученик, уровень I, уровень II, уровень III;
 - в) уровень I, уровень II, уровень III;
 - г) ни одна из перечисленных выше категорий.
9. Кто несет ответственность за процедуру аттестации:
- а) работодатель;
 - б) специалист III уровня;
 - в) независимый аттестационный орган;
 - г) уполномоченный орган.
10. Работодатель не должен:
- а) представлять кандидата в независимый аттестационный или уполномоченный орган;
 - б) непосредственно вовлекаться в процедуру аттестации;
 - в) подтверждать документами данные об образовании кандидата.
11. Какие факторы следует учитывать при допуске к экзаменам на второй уровень?
- а) Практический опыт, подготовку.
 - б) Практический опыт, подготовку и предшествующую аттестацию.
 - в) Образование, практический опыт и подготовку.
 - г) Ни одно из вышеуказанных.
12. Какой из перечисленных разделов экзамена должен проводиться в письменной форме?
- а) Общий и специальный.

- б) Общий и практический.
 - в) Специальный и практический.
 - г) Только общий.
13. Письменные и практические экзамены на I и II уровень контролируются и оцениваются по меньшей мере:
- а) одним экзаменатором;
 - б) двумя экзаменаторами.
14. Что из нижеприведенного присуще как специальному, так и практическому экзамену?
- а) Должны проводиться в письменной форме.
 - б) Должны проводиться в рамках каких-либо секторов промышленности.
 - в) При расчете составного балла имеют один и тот же вес.
 - г) Сдаются при повторной аттестации.
15. При оценке уровня квалификационного экзамена на II уровень кандидат получил 71 % и 73 % соответственно по общему и специальному экзамену. Какой минимальный балл необходимо получить на практическом экзамене, чтобы пройти аттестацию?
- а) 80 %;
 - б) 82 %;
 - в) 88 %;
 - г) 90 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. В 2-х кн. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986.
2. Дефекты стали: справочник / под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. – М.: Metallurgia, 1984.
3. ГОСТ 19200–80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. Iron and steel castings. Terms and definitions of defects. – М.: Издательство стандартов, 2004.
4. ГОСТ 21014–88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. Rolled products of ferrous metals. Surface defects. Terms and definitions. . – М.: Издательство стандартов, 1984.
5. ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. Welding of metals. Terms and definitions of basic concepts. – М.: Издательство стандартов, 1993.
6. ГОСТ 30242–97. Межгосударственный стандарт. Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения Imperfections in metallic fusion welds. Classification, designation and definitions. – М.: Издательство стандартов, 2001.
7. Дефекты стальных прессованных труб и профилей: справочник / В.Е. Васюченко и др. – М.: Metallurgia, 1990. – 70 с.
8. Калиниченко Н.П., Васильева М.А. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 55 с.
9. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: УРО РАН, 1996.
10. ОСТ 92-4607-85. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод контроля.
11. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Контроль качества и приемка работ. Миннефтегазстрой. ВСН-012-88. Часть 1. – М.: ВНИИСТ, 1989.
12. Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов: РД 39-132-94. Ввод в действие с 01.07.1994 г. – М.: НПО ОБТ, 1994.
13. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Магнитопорошковый контроль. ПНАЭ Г-7-015-89. – М., 1990.
14. Горкунов Э.С. Магнитопорошковая дефектоскопия и магнитная структуроскопия. – Екатеринбург: УРО РАН, 1999.
15. Козлов В.В. Поверка средств неразрушающего контроля. – М.: Издательство стандартов, 1989.
16. Давыдков А.А. и др. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии. Авторское свидетельство СССР № 1620927.
17. Шарова А.М. и др. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии. Авторское свидетельство СССР № 1658069.

18. Егоров А.С. и др. Способ изготовления эталонов для дефектоскопии. Авторское свидетельство СССР №1177735.
19. Абакумов А.А., Чегодаев В.В. Контрольный образец для дефектоскопов. Авторское свидетельство СССР № 1693522.
20. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия в рисунках и фотографиях. – М.: Диагностический научно-технический центр «Дефектоскопия», 2002.
21. Патент 2245541 Российская Федерация. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии / Толмачев И.И., Прошутина Р.В.; опубл. 2006, Бюл. № 3.
22. Патент 2273848 Российская Федерация. Универсальный контрольный образец для дефектоскопии / Толмачев И.И., Прошутина Р.В.; опубл. 2006, Бюл. № 10.
23. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон. – М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2001.
24. Система неразрушающего контроля. Аттестации лабораторий: сборник документов. Серия 28. Вып. 01 / кол. авт. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002.
25. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля. ПБ-03-440-02. – М.: ПИО ОБГ, 2002.

Таблица ответов на контрольные вопросы к главе 1

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ответ	а	б	б	в	в	б	а	а	в	б

Таблица ответов на контрольные вопросы к главе 2

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ответ	б	в	б	а	а	б	а	б	б	в

Таблица ответов на контрольные вопросы к главе 3

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ответ	в	а	в	в	а	б	б	в	а	а	в	в	в	а	а

Таблица ответов на контрольные вопросы к главе 4

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ответ	в	а	б	а	в	а	в	б	г	в	б	а

Таблица ответов на контрольные вопросы к главе 5

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ответ	б	б	а	б	в	б	б	в	в	б	в	а	а	б	в

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛАХ	4
1.1. Общие положения	4
1.2. Дефекты металлургического происхождения	6
1.2.1. Дефекты отливок чугуна и стали	6
1.2.2. Дефекты проката черных металлов	9
1.3. Дефекты обработки металлов и дефекты сварных соединений.....	20
1.4. Дефекты усталостного происхождения	23
Контрольные вопросы к главе 1	24
Глава 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТОПОРОШКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ	26
2.1. Основные параметры магнитного поля	26
2.2. Магнитные свойства материалов	28
2.3. Физические основы магнитопорошковой дефектоскопии	36
2.3.1. Общие положения [9].....	36
2.3.2. Соотношение с другими методами контроля	38
2.3.3. Физические основы магнитопорошковой дефектоскопии.....	38
2.3.4. Выявление магнитного поля рассеяния дефекта с помощью ферромагнитных частиц	40
Контрольные вопросы к главе 2	41
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ	43
3.1. Методы создания и расчета магнитных полей.....	43
3.1.1. Магнитное поле. Закон Био–Савара–Лапласа (Biot–Savart–Laplace)	43
3.1.2. Поле прямого провода с током	44
3.1.3. Поле кругового тока	45
3.1.4. Поле на оси соленоида	46
3.1.5. Поле проводника конечного сечения	47
3.2. Намагничивание тел. Поле рассеяния дефекта	48
3.2.1. Намагничивание тел	48
3.2.2. Особенности поведения ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях.....	49
3.2.3. Размагничивающее действие полюсов образца	50
3.2.4. Поле рассеяния дефекта (Leakage Field Of Flaw).....	54
3.2.5. Способы намагничивания тел	58
3.2.5.1. Полюсное намагничивание (Pole Magnetization)	58
3.2.5.2. Циркулярное намагничивание (Circular Magnetization)	60
3.2.5.3. Комбинированное намагничивание (Combine Magnetization)	64
3.2.6. Способы размагничивания (demagnetizing) тел.....	65
3.3. Магнитопорошковая дефектоскопия	67
3.3.1. Технология магнитопорошковой дефектоскопии	67
3.3.1.1. Подготовка поверхности детали	69
3.3.1.2. Выбор способа и режима контроля	70
3.3.1.3. Нанесение магнитного индикатора	74

3.3.1.4. Осмотр и расшифровка результатов контроля	75
3.3.1.5. Заключение по результатам контроля	76
3.3.2. Технология контроля сварных соединений	76
3.3.2.1. Магнитопорошковая дефектоскопия сварных соединений.....	76
3.3.2.2. Выбор способа и режима контроля.....	77
3.3.2.3. Намагничивание объекта контроля.....	78
3.3.2.4. Нанесение индикаторных материалов	79
3.3.2.4. Оценка результатов контроля	79
3.4. Магнитопорошковые дефектоскопы.....	81
Контрольные вопросы к главе 3	83
Глава 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАГНИТОПороШКОВОГО КОНТРОЛЯ.....	87
4.1. Общие сведения.....	87
4.2. Контроль качества магнитных порошков и суспензий	88
4.3. Контроль параметров намагничивающих устройств	90
4.3.1. Измерение напряженности магнитного поля	90
4.3.2. Измерение тока циркулярного намагничивания	92
4.4. Контроль параметров осветительных устройств	92
4.5. Метрологическое обеспечение магнитопорошковых дефектоскопов	93
Контрольные вопросы к главе 4	103
Глава 5. АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПО РОССИЙСКИМ И МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ	106
5.1. Общие положения. Понятие об опасном производственном объекте.....	106
5.2. Аттестация специалистов в области неразрушающего контроля по правилам Ростехнадзора (ПБ 03-440-02).....	108
5.2.1. Требования к общей и специальной подготовке персонала в области неразрушающего контроля	110
5.2.2. Квалификационные требования к персоналу в области неразрушающего контроля.....	111
5.2.2.1. Требования к квалификации специалиста I уровня.....	111
5.2.2.2. Требования к квалификации специалиста II уровня.....	112
5.2.2.3. Требования к квалификации специалиста III уровня квалификации	114
5.2.3. Основные требования к квалификационному экзамену	115
5.2.4. Анализ результатов экзаменов и принятие решения об аттестации.....	116
5.2.5. Прекращение действия аттестации	116
5.3. Аттестация специалистов по международному стандарту EN473	117
Контрольные вопросы к главе 5	
Вопросы на знание Федерального Закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и ПБ 03-440-02	118
Вопросы на знание EN473.....	119
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	121

Учебное издание

ТОЛМАЧЕВ Игорь Иванович

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Научный редактор
д. т. н., профессор,
заведующий лабораторией ФГНУ
НИИ интроскопии

Б.И. Капранов

Редактор

Д.В. Заремба

Верстка

В.П. Аршинова

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 30.12.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 7,27. Уч.-изд. л. 6,58.

Заказ 806. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.