

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

И.И. Толмачев

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 620.179.14

Т

Толмачев И.И.

Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие / И.И. Толмачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.

Учебное пособие содержит описание физических основ, технологии и аппаратуры магнитного контроля качества, также рассмотрены вопросы техники безопасности и аттестации специалистов неразрушающего контроля. Основные разделы снабжены контрольными вопросами.

Пособие подготовлено на кафедре физических методов и приборов контроля качества ТПУ и предназначено для специалистов в области контроля качества и студентов очного, заочного и дистанционного обучения по специальности 200102 – Методы и приборы контроля качества и диагностики.

УДК 620.179.14

Рекомендовано к печати Редакционно-Издательским
Советом Томского политехнического университета

Рецензент

Зам. директора ООО «Дикон», к.т.н.

Тарасов В.В.

© Томский политехнический университет, 2008

© Толмачев И.И., 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 магнитного метода контроля и познакомить читателя с физическими основами, методикой, аппаратурой, метрологическим обеспечением данного метода. Для контроля полученных знаний в конце ключевых разделов 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) 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.

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 дефектоскопию, индукционную дефектоскопию, феррозондовую дефектоскопию и магнитографическую дефектоскопию. Все эти методы контроля объединяют два общих признака – объект контроля обладает ярко выраженными характеристиками ферромагнетика и 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, выбор методов контроля существенно расширяется, возможно применение капиллярного, вихретокового и магнитного контроля.

В этой классификации необходимо отдельно выделить категорию подповерхностных дефектов. Точного понятия «подповерхностный де-

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

Выявление этой группы дефектов очень важно на стадии изготовления 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

Описание дефектов металлургического происхождения приводится в соответствии с [2,3]. Далее приведены основные определения дефектов 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).






Дефекты отливок чугуна и стали

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



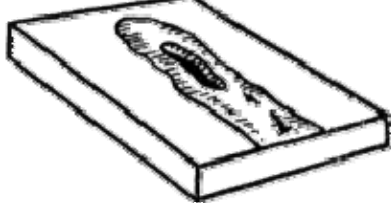
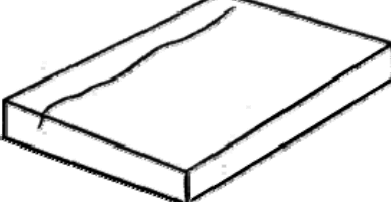


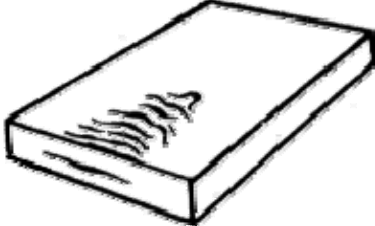
11	Складчатость Foldness, waviness	Дефект в виде незначительных гладких возвышений и углублений на поверхности отливки, возникающих вследствие пониженной жидкотекучести металла
12	Грубая поверхность Rough surface	Дефект в виде шероховатости поверхности с параметрами, превышающими допустимые значения
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.

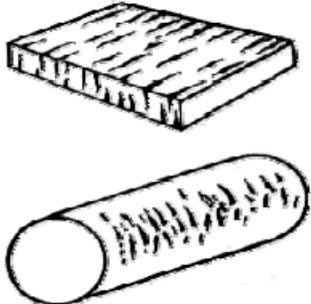

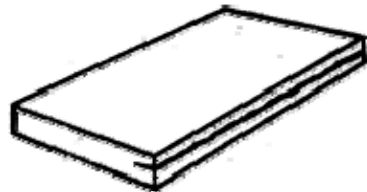
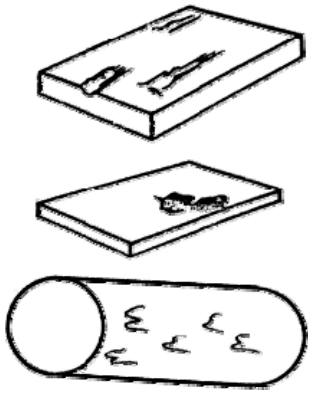
1.2.2. Дефекты проката черных металлов [4]

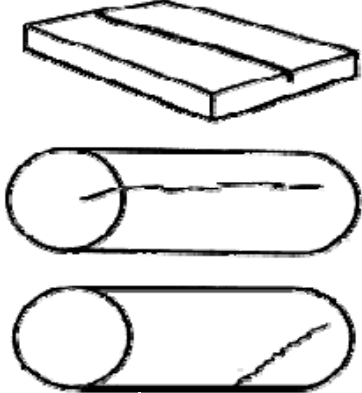

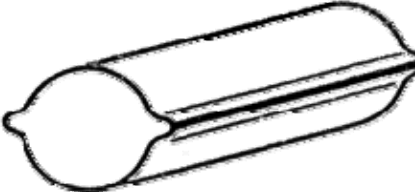
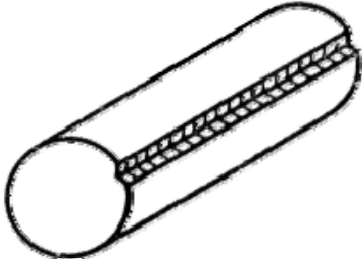
Таблица 1.2

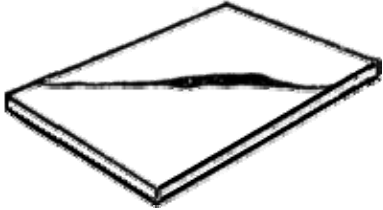
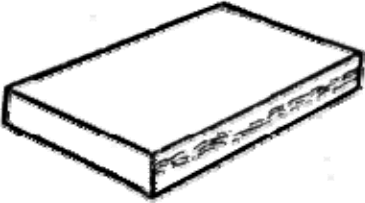
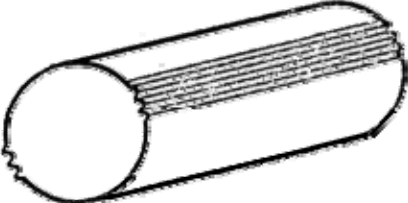
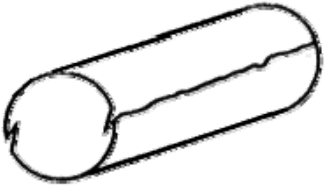
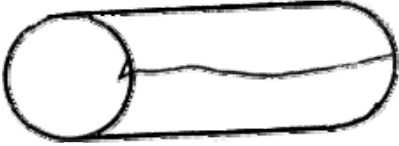
Термин	Определение	Чертеж
<i>Дефекты поверхности, обусловленные качеством слитка и литой заготовки</i>		
<p>1. Раскатанное (раскованное) загрязнение</p> <p>Rolled slag patch, Sand mark</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой вытянутое в направлении деформации раскатанное (раскованное) поверхностное загрязнение слитка или литой заготовки шлаком, огнеупором, теплоизоляционной смесью</p>	 
<p>2. Раскатанная (раскованная) корочка</p> <p>Shelf, Rolled crust</p>	<p>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</p>	 
<p>3. Волосовина</p> <p>Hairline, Spill</p>	<p>Дефект поверхности в виде нитевидных несплошностей в металле, образовавшихся при деформации имеющихся в нем неметаллических включений</p>	 


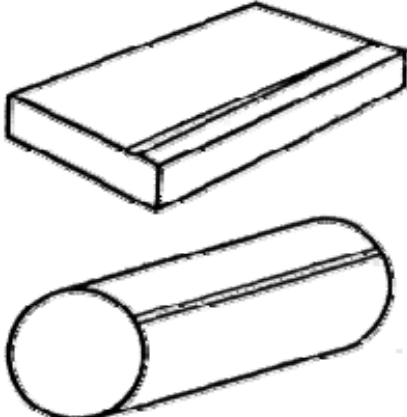
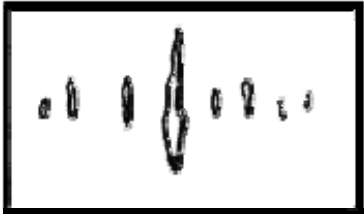
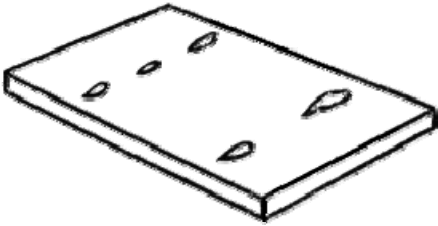
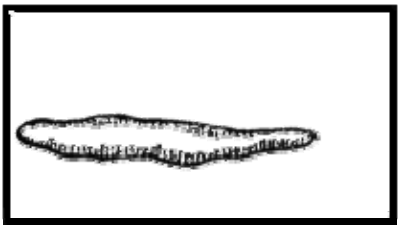
Термин	Определение	Чертеж
<p>4. Раскатанный (раскованный) пузырь</p> <p>Rolled blister</p>	<p>Дефект поверхности в виде прямолинейной продольной различной протяженности и глубины тонкой трещины, образовавшейся при раскатке (расковке) наружного или подповерхностного газового пузыря слитка или литой заготовки.</p>	
<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, пораженным дефектами.</p> <p>Примечание. Дефект обусловлен нарушением технологии выплавки и разливки металла.</p>	

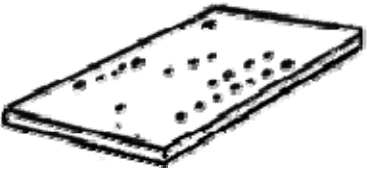
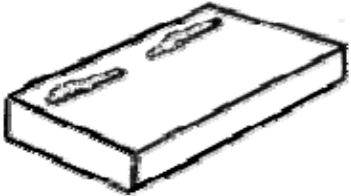


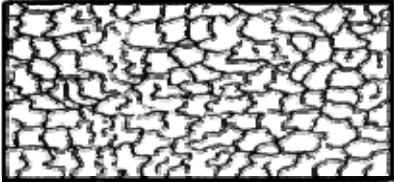
Термин	Определение	Чертеж
<p>8. Слиточная плена</p> <p>E. Sliver, Rolled scab</p>	<p>Дефект поверхности в виде отслоения языкообразной формы, частично соединенного с основным металлом, образовавшегося от раската окисленных брызг, заплесков и грубых неровностей поверхности слитка, обусловленных дефектами 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 разлива 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>	

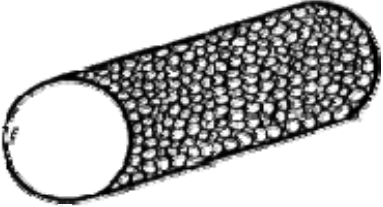
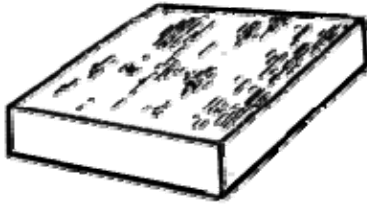
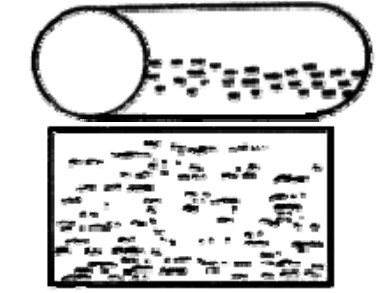
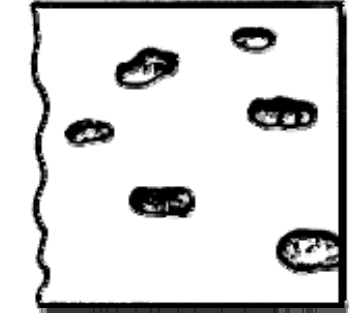


Термин	Определение	Чертеж
<i>Дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе деформации</i>		
12. Деформационная рванина E. Hot tears	Дефект поверхности в виде раскрытого разрыва, расположенного поперек или под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокатке или ковке, образовавшийся вследствие пониженной пластичности металла.	
13. Рванина на кромках Cracked edge	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.	
14. Затянутая кромка Folded edge	Дефект поверхности в виде раскатанной складки на кромке листа, напоминающей по форме зигзагообразную трещину, образующуюся при прокатке без кантовки или путем закатки наплывов, появляющихся при деформации слитков с непрогретой сердцевиной.	
15. Прокатная плена Sliver, Rolling skin	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.	

Термин	Определение	Чертеж
<p>16. Трещина напряжения</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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 и образовавшегося вследствие неправильной настройки привалковой арматуры или одностороннего перекрытия калибра.</p>	

Термин	Определение	Чертеж
20. Порез	<p>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.</p>	
21. Морщины Wrinkles	<p>Дефекты поверхности в виде группы чередующихся продольных углублений и выступов, располагающихся, в основном, по всей длине раската, преимущественно в зоне, соответствующей разьему валков, и образовавшихся при повышенных обжатиях боковых граней.</p> <p>Дефект поверхности, представляющий собой прикатанный продольный выступ, образовавшийся в результате закатывания уса, подреза, грубых следов зачистки и глубоких рисок.</p>	 
22. Закат E. Lap	<p>Примечания:</p> <p>1. Дефект часто расположен с двух диаметрально противоположных сторон и может иметь зазубренный край.</p> <p>2. На поперечном микрошлифе дефект располагается под острым углом к поверхности без разветвления, заполнен окалиной и сопровождается искажением структуры. Металл вокруг дефекта обезуглерожен</p>	 

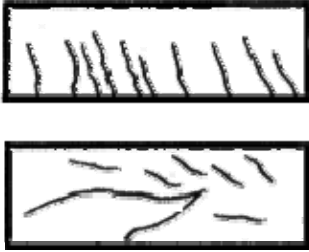


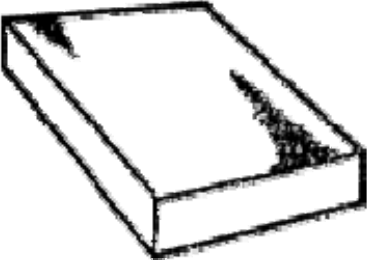
Термин	Определение	Чертеж
<p>23. Заков Forging fold</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой придавленный выступ, образовавшийся при ковке в результате неравномерного обжатия.</p>	
<p>24. Риска Groove, Guide mark</p>	<p>Дефект поверхности в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном, образовавшийся от царапания поверхности металла изношенной прокатной арматурой.</p>	
<p>25. Сквозные разрывы 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 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 Guide scratch</p>	<p>Дефект поверхности в виде широких продольных углублений, образующихся от резкого трения проката о детали прокатного и подъемно-транспортного оборудования.</p>	

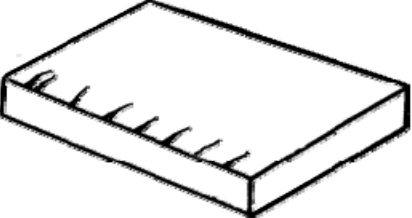
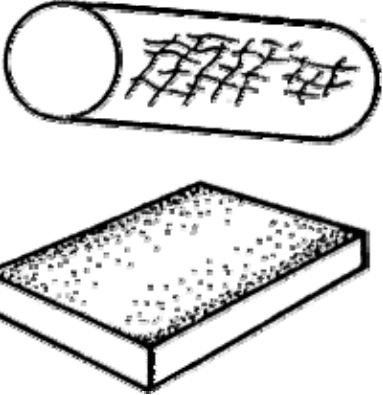
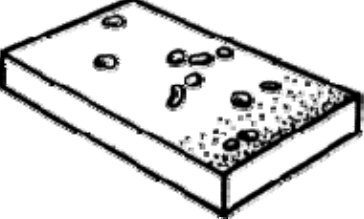
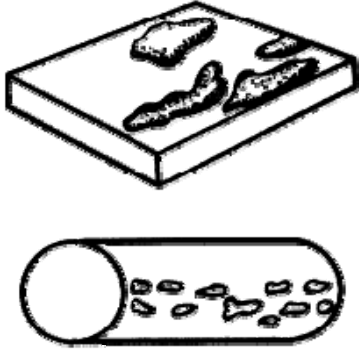

Термин	Определение	Чертеж
<p>28. Наколы-проколы</p> <p>E. Pricks</p>	<p>Дефекты поверхности в виде периодически повторяющихся точечных углублений или сквозных отверстий, образовавшихся от соприкосновения ленты с остроугольными наварями на роликах термических печей, травильных агрегатов и вспомогательного 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 валках, 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 выступы, 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>	

Термин	Определение	Чертеж
<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</p> <p>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.</p> <p>Примечание. К вкатанным металлическим частицам относятся: стружка, отслой от рваных кромок листа.</p>	 

Термин	Определение	Чертеж
38. Раковина-вдав	Дефект поверхности листа и ленты в виде одиночного углубления, образовавшегося при выпадении или вытравливании вкатанной инородной частицы.	
39. Отстающая окалина	Примечание. Дефект повторяет форму вкатанного предмета.	
Exfoliating scale	Дефект поверхности в виде отдельных участков с отслоившейся или рыхлой окалиной, образующихся при нарушении технологии нагрева перед прокаткой или при дальнейшей термической обработке.	
40 Заплески	Дефект поверхности в виде полосок от натеков оплавленного металла, образующихся при нарушении технологии огневой зачистки дефектов.	
41 Следы абразивной зачистки	Дефект поверхности ленты в виде участков с повышенной шероховатостью, образовавшихся после зачистки полосы абразивным инструментом с грубым зерном.	
Grinding traces	Дефект поверхности ленты в виде светло- или темно-серых пятен, расположенных в строчку или группами, образующихся от раската вкатанной окалины или незначительных углублений.	
42 Серые пятна	Дефект поверхности ленты в виде светло- или темно-серых пятен, расположенных в строчку или группами, образующихся от раската вкатанной окалины или незначительных углублений.	
43 Пятнистое науглероживание	Дефект поверхности в виде черных пятен или полос, выявившихся после травления, образовавшихся при длительном нагреве стальных изделий в науглероживающей среде.	
Spot carburization	Дефект поверхности в виде черных пятен или полос, выявившихся после травления, образовавшихся при длительном нагреве стальных изделий в науглероживающей среде.	

Термин	Определение	Чертеж
<p>44 Пятна загрязнения</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>Burr</p>	<p>Дефект поверхности, представляющий собой острый, в виде гребня, выступ, образовавшийся при резке металла.</p>	
<p>47 Зазубрины</p> <p>Nacks</p>	<p>Дефект поверхности в виде выступов и углублений на кромках листа и ленты, образовавшихся при нарушении технологии резки или неисправности оборудования.</p>	
<p>48 Торцевая трещина</p> <p>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>	

Термин	Определение	Чертеж
<p>49. Полосы-линии скользяния</p> <p>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</p> <p>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 побежалости</p> <p>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>	


Термин	Определение	Чертеж
<i>Дефекты поверхности, образовавшиеся при отделочных операциях</i>		
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 окалины.	
55. Перетрав E. Overpickling	Дефект поверхности в виде язв, образовавшихся вследствие длительного травления на отдельных участках или всей поверхности металла.	
56. Остатки окалины E. Scale residue	Дефект поверхности, представляющий собой отдельные участки поверхности, покрытые окалиной, 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.	

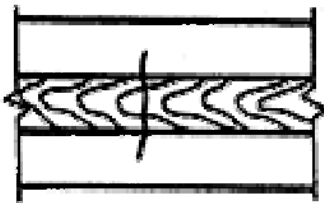
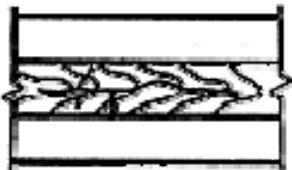
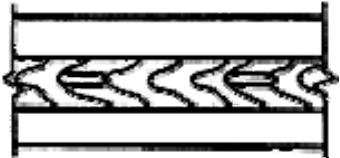


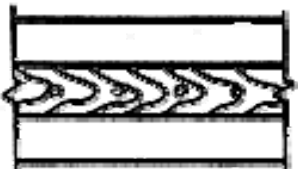
Термин	Определение	Чертеж
58. Шлифовочные трещины Grinding cracks	Дефект поверхности в виде сетки паутинообразных или отдельных произвольно направленных поверхностных разрывов, образовавшихся при шлифовании и абразивной зачистке металла, обладающего высокой твердостью, хрупкостью и малой теплопроводимостью.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

1.3. Дефекты обработки металлов и дефекты сварных соединений

Сварка металлов. Термины и определения основных понятий, относящихся к сварке металлов (Welding of metals), приведены в [5]. В Международном 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 и стальных пресованных труб и профилей приведены в [7,8]. Ниже приведена классификационная таблица дефектов соединений при сварке металлов плавлением [5].

Таблица 1.3

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

<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 пор</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 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, возникают 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.

Последствия возникновения и развития усталостных дефектов иногда приводят к значительным катастрофам, приводящим к гибели большого количества людей. Особенно большим бывает число жертв при авиационных и железнодорожных катастрофах. 12 августа 1985 г. Боинг-747 компании «Japan Airlines», регистрационный номер *JA 8119*, совершавший рейс JAL 123, потерпел аварию недалеко от горы Такамагахара, Япония, в 100 км от Токио. Это вторая по количеству жертв после трагедии на острове Генерифе катастрофа за всю историю авиации (не считая террористический акт 11 сентября 2001) и крупнейшая катастрофа одного самолёта. 15 членов экипажа и 505 пассажиров погибли. В 18:12 по местному времени Боинг-747 взлетел из Международного аэропорта Токио. Борт следовал в Осаку. Через 12 минут после взлёта во время набора высоты у самолёта отвалился киль. Эта поломка повлекла за собой ряд других технических неполадок. Упало давле-

ние в кабине пилотов. Отказали гидравлические системы самолёта. Воздушное судно стало трудноуправляемым и начало терять высоту. На высоте 4100 метров командир экипажа доложил, что самолёт неуправляем. Экипаж Боинга до последнего момента пытался контролировать полёт, изменяя тягу двигателей. В 18:56 рейс JAL 123 исчез с экранов радара на высоте 2100 метров.

Японская комиссия по расследованию катастрофы установила:

- 2 июня 1978 года этот самолёт задел хвостовой частью взлётно-посадочную полосу, в результате чего была повреждена переборка, отделяющая салон лайнера, в котором поддерживается примерно постоянное давление воздуха, от негерметичной хвостовой части самолёта.
- Инженеры фирмы «Боинг» провели ремонт самолёта с нарушением инструкций, в результате, переборка оказалась подвержена развитию **усталостных дефектов**. В последующих полётах она испытывала циклические нагрузки, приводившие к появлению трещин в металле.
- При наборе высоты в роковом полёте, ослабленная переборка не выдержала давления и разрушилась. При этом она перебила трубопроводы гидравлических систем. Вырвавшийся из салона воздух поступил в полость киля, не рассчитанную на такую нагрузку. Это привело к отрыву большей части киля и повреждению горизонтального оперения. Самолёт стал практически неуправляем.

Авиакомпания «Japan Airlines» приняла на себя часть ответственности за катастрофу, так как должным образом не проверила отремонтированный самолёт. Президент авиакомпании подал в отставку.

Причиной произошедшего 17 октября 2000 г. около Хатфилда (к северу от Лондона) серьезного крушения с человеческими жертвами был излом рельса, обусловленный развитием усталостного дефекта в виде трещин на боковой рабочей выкружке головки рельса. Такие усталостные дефекты обычно возникают на наружном рельсе кривых. Сломанный рельс имеет характерную для этого дефекта темную поверхность излома, наклоненную под углом к направлению движения.

В приведенном случае поезда двигались справа налево, а тяговое усилие действовало на рельс в обратном направлении, сдвигая головку рельса и особенно поверхностный слой в зоне контакта колеса и рельса. Вокруг темного пятна поперечное сечение рельса имеет зернистый контур, по которому произошел хрупкий излом, являющийся конечной стадией усталостного разрушения. Излому предшествовало возникновение в нескольких миллиметрах от поверхности рельса трещины на рабочей выкружке головки, наклоненной под острым углом 20...30°.

По внешнему виду излом, происходящий в результате зарождающегося на поверхности головки усталостного дефекта в виде трещин, существенно отличается от излома, который происходит в результате появления усталостного дефекта в виде овальных пятен внутри головки рельса. Зарождению усталостных дефектов в виде овальных пятен способствуют такие внутренние пороки, как неметаллические включения и примеси, которые в последнее время чаще всего встречаются в сварных стыках, а не в рельсах, поскольку рельсовая сталь имеет более высокую чистоту. Внутренние дефекты иногда распространяются вверх и встречаются с поверхностными трещинами, однако в большинстве случаев сломанные по этому дефекту рельсы имеют зернистую поверхность, характерную для хрупкого излома.

Это важное различие между двумя видами дефектов широко не признано (по крайней мере, в Великобритании), что приводит к недооценке влияния на излом рельсов усталостных дефектов в виде поверхностных трещин на рабочей выкружке головки рельса. Согласно официальной статистике, в Великобритании на эту причину приходится только несколько процентов изломов рельсов, но при этом около 20...30 % изломов имеет место в наружной нити и очень мало во внутренней нити кривых. Почти все такие изломы отнесены на усталостные дефекты, зарождающиеся внутри головки рельсов.

Статистические данные показывают, что на железных дорогах других стран контактно-усталостные дефекты рассматривают как более серьезную проблему. Национальное общество железных дорог Франции (SNCF) установило, что в 1992 г. 20 % изломов рельсов произошло в результате усталостных дефектов, зарождающихся на поверхности катания головки в виде темных пятен. В эти же годы аналогичные дефекты являлись основной причиной преждевременной замены рельсов на скоростных линиях в Японии. Ранее, в 1982 г., поверхностные усталостные дефекты обусловили 12 % общих затрат на замену рельсов железнодорожной компании Canadian Pacific, несмотря на предпринимаемые меры по решению этой проблемы.

Следует отметить, что первые исследования по изучению причин возникновения поверхностных усталостных дефектов были проведены в 1970–1980-х годах в университете Кембриджа, Великобритания. В Европе фундаментальные исследования по этой проблеме, проведенные при поддержке Европейской комиссии и существенном участии Великобритании, были завершены в начале 2000 г. На основании этих исследований предусматривалось разработать меры по снижению интенсивности развития этих дефектов и разработать сорта стали с повышенной сопротивляемостью образованию усталостных дефектов.

При отсутствии финансовой поддержки на продолжение этих работ со стороны ЕС было решено (до крушения около Хатвилда) продолжить британскую часть проекта при поддержке администрации Railtrack и железнодорожных компаний Corus Rail и Schweerbau UK.

Причины возникновения усталостных дефектов рельсов

Контактно-усталостные дефекты рельсов делятся на две основные группы: возникающие на поверхности катания рельсов и зарождающиеся внутри головки. К поверхностным дефектам относятся трещины на рабочей выкружке головки рельса, дефекты на поверхности катания головки в виде темных пятен и волосные поверхностные трещины. Усталостные дефекты возникают вследствие значительных напряжений в головке рельсов в условиях действия высоких нагрузок от колес подвижного состава. Это обусловлено тем, что в Великобритании высокоскоростные поезда обращаются на линиях с большим недостатком возвышения в кривых, что и вызывает перегрузку наружной рельсовой нити, особенно от вагонов с высоким расположением центра тяжести.

В этих условиях нагрузки на наружные рельсы в кривых аналогичны тем, которые имеют место на линиях с движением тяжеловесных поездов. Такие нагрузки вызывают особо высокие напряжения при рассогласовании профилей колеса и рельса. Поэтому профиль рельса играет важную роль, особенно для твердых рельсов, которые не могут быстро прирабатываться к профилю колес из-за повышенной износостойкости и сопротивляемости пластическим деформациям.



Рис. 1.1. Общий вид головки рельса с трещинами, направленными под углом к оси рельса

Трещины на поверхности рельсов зарождаются в результате сочетания высоких вертикальных нагрузок и горизонтальных растягивающих усилий, которые вызывают сдвиг поверхностных слоев металла. Направление поверхностных трещин указывает на направление растягивающего усилия. Так, поверхностные дефекты в виде темных пятен, возникающие в прямых и пологих кривых, имеют направление трещин поперек оси рельса. Они возникают от действия значительных про-

дольных сил тяги. Волосные трещины, которые появляются на наружной рельсовой нити в кривых, обычно ориентированы под углом к направлению движения и являются следствием сочетания значительных поперечных и продольных сил тяги (рис. 1). В нескольких случаях выявлено направление трещин вдоль оси рельса, что обусловлено значительными поперечными растягивающими усилиями (рис. 2). Трещины на рабочей выкружке головки рельса, имеющие место в Великобритании на скоростных линиях в кривых с большим недостатком возвышения, направлены поперек оси рельса и обусловлены значительными продольными растягивающими усилиями.



Рис. 1.2. Общий вид головки рельса с трещинами, направленными вдоль оси рельса

Как только на поверхности рельса появляется трещина, механизм ее дальнейшего развития связан с заполнением водой или смазочными материалами. Трещина углубляется в головку рельса по направлению движения, а поверхностные слои под воздействием тягового усилия локомотива смещаются в обратном направлении. При прохождении колес по трещине, заполненной жидкостью, вследствие гидравлического уплотнения у ее вершины возникают значительные напряжения. Это приводит к росту трещин в длину до 10 мм и в глубину до нескольких миллиметров.

Когда трещина вырастает из относительно тонкого, сильно деформированного слоя у поверхности головки рельса, она стремится изменить направление дальнейшего развития, ориентируясь под прямым углом к оси рельса. Иногда она может выйти на поверхность головки рельса или встретиться с другими трещинами, вызывая отслоение металла. Большое влияние на характер развития трещин оказывают значительные напряжения в рельсе: остаточные от прокатки, температурные и изгибные. Если трещину не удалось обнаружить и устранить, то она продолжает расти до тех пор, пока рельс не перестает выдерживать изгибающий момент от подвижной нагрузки или ударное воздействие колес с ползуном. В обоих случаях результатом становится из-

лом рельса. Можно предположить, что поскольку большие напряжения в основном действуют в продольном направлении, то трещины, направленные поперек продольной оси рельса, оказываются более опасными, чем расположенные под углом к оси рельса.

Увеличение числа контактно-усталостных дефектов в рельсах связано не только с ростом осевых нагрузок, но и с существенным снижением интенсивности износа рельсов в результате более эффективного их смазывания. Железные дороги с тяжеловесным движением, которые первыми столкнулись с повышенным износом колес и рельсов без должного смазывания, первыми испытали серьезные проблемы с ростом дефектов рельсов.

Тяжелые условия эксплуатации при отсутствии полного представления о причинах возникновения усталостных дефектов усталостного дефекта и влиянии на их развитие осевых нагрузок, сорта стали и других факторов заставили эти железные дороги искать средства борьбы с дефектами. Железные дороги с тяжелыми режимами эксплуатации не имели ни времени на проведение исследований, ни достаточных средств на непрерывную замену поврежденных или дефектных рельсов. Тем не менее некоторым из них удалось существенно сократить число дефектов и изломов рельсов, а также снизить на 60 % и более число заменяемых рельсов.

Меры по предотвращению развития усталостных дефектов рельсов

Основным средством устранения усталостных дефектов в виде трещин на рабочей выкружке головки рельса является периодическое шлифование рельсов. Идея выборочного шлифования для искусственного увеличения интенсивности бокового износа рельсов была предложена специалистами Национального исследовательского центра Канады. С помощью шлифования удаляются мелкие поверхностные трещины, глубина которых составляет доли миллиметра. Искусственное увеличение интенсивности бокового износа позволяет продлить срок службы рельсов до нескольких сотен или тысяч миллионов тонн брутто поездной нагрузки (вместо 45 млн т брутто, при котором произошло крушение из-за излома рельса в Хатфилде).

В Японии шлифование рельсов более 10 лет применяется на скоростных линиях для устранения усталостных дефектов в виде темных пятен на поверхности катания. Поскольку они аналогичны дефектам в виде трещин на рабочей выкружке головки рельсов, то можно полагать, что шлифование окажется эффективным средством для устранения этих трещин и на железных дорогах других стран.

Другим достоинством шлифования является возможность изменения профиля головки рельса с целью перераспределения нагрузок и приведения его в соответствие с профилем колеса. В испытаниях на полигоне FAST в Пуэбло после пропуска 28,5 млн т брутто поездной нагрузки произошел излом рельса из чистой твердой стали. Причиной этого излома явилось рассогласование профилей головки рельса и колеса, которое вызвало чрезмерно высокие контактные напряжения.

Особенно важную роль играет профиль головки для рельсов из твердой стали, которые обладают высокой износостойкостью и повышенной сопротивляемостью пластическим деформациям. Это обстоятельство, характерное для Великобритании, является наиболее вероятной причиной интенсивного развития трещин на рабочей выкружке головки рельсов стрелочных переводов и глухих пересечений, где из-за разности уклонов рельсов в течение длительного времени в зоне рабочей выкружки действовали высокие контактные напряжения. На некоторых железных дорогах для снижения этих напряжений с помощью шлифования создавали наклонный профиль головки рельса.

На ряде железных дорог стремились снизить интенсивность зарождения контактно-усталостных дефектов путем удаления поверхностных трещин с помощью интенсивного шлифования. Однако в последних испытаниях стали применять слабое шлифование, не удаляющее полностью поверхностные трещины. Такой метод оказался настолько эффективным, что позволил в течение 3 лет сократить вдвое расходы на шлифование и замену рельсов, а также повысить плавность хода и уменьшить расходы на другие путевые работы, включая подбивку шпал. Однако если трещина достаточно глубокая, как показано на рис. 1, шлифование уже не дает положительного эффекта.

Снижению числа контактно-усталостных дефектов в рельсах способствует применение стали улучшенных сортов. Наиболее перспективной является бейнитная сталь. Кроме того, в быстро изнашиваемых рельсах снижается вероятность возникновения контактно-усталостных дефектов, но расходы на частую замену рельсов превышают затраты, связанные с использованием более износостойких рельсов и устранением зарождающихся усталостных дефектов. Тем не менее в ряде случаев быстро изнашиваемые рельсы могут оказаться более эффективным средством борьбы с контактно-усталостными дефектами.

Профилактическое шлифование пока не стало обычной практикой текущего содержания рельсов на железных дорогах Европы. В то же время на ряде европейских железных дорог уже более 10 лет применяют шлифование для устранения волнообразного износа рельсов, который также характерен для кривых. Возможно, случайным совпадением

стало то, что, ликвидируя путем шлифования волнообразный износ, эти железные дороги устраняли контактно-усталостные дефекты. Наряду с этим на европейских железных дорогах разработаны технологии профилактического содержания рельсов, а также средства обнаружения и устранения дефектов, не допускающие излом рельсов. (Приведенные выше примеры взяты из Интернет энциклопедии Vicipedia)

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. 1.3 приведена фотография усталостного разрушения фланца втулки, а на рис. 1.4 показан пример усталостного разрушения рельса.



Рис. 1.3. Усталостное разрушение фланца втулки



Рис. 1.4. Усталостное разрушение 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 и замена или ремонт детали гарантирует нормальную работу оборудования.

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.

Список литературы к главе 1

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник, в 2-х книгах / под редакцией В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986.
2. Дефекты стали: справ. изд. / под ред. Новокщеновой С.М., Виноград М.И. – М.: Металлургия, 1984. 199 с.
3. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. Iron and steel castings. Terms and definitions of defects.
4. ГОСТ 21014-88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. Rolled products of ferrous metals. Surface defects. Terms and definitions.
5. ГОСТ 2601-84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. Welding of metals. Terms and definitions of basic concepts.
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
7. Дефекты стальных прессованных труб и профилей: справ. изд. / Васюченко В.Е. и др. – М.: Металлургия, 1990. – 70 с.
8. Калиниченко Н.П., Васильева М.А. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2006. – 55 с.

ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

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) – электрическую, характеризующуюся воздействием поля как на движущиеся, так и на неподвижные заряженные частицы, и 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 зарядами), 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 г. 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, т. е. 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, характеризующееся 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). Способ-

ность 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 :

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

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 соответственно 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 – фундаментальная физическая постоянная, равная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ 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, характеризуется величиной магнитной восприимчивости (magnetic susceptibility) χ_m :

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

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

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

Векторная величина $\bar{\mathbf{J}} = \chi_m \bar{\mathbf{H}}$ 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 (табл. 2.1), а также некоторые органические и неорганические соединения.

Таблица 2.1

Вещество	$\mu = 1 + \chi_m$	Вещество	$\mu = 1 + \chi_m$
Водород (газообразный)	0,999937	Серебро	0,999981
Вода	0,999991	Золото	0,999963
Стекло	0,999987	Медь	0,999912
Цинк	0,999991	Висмут	0,999824

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 (табл. 2.2), 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.

Таблица 2.2

Вещество	$\mu = 1 + \chi_m$	Вещество	$\mu = 1 + \chi_m$
Азот (газообразный)	1,000013	Эбонит	1,000014
Воздух (газообразный)	1,000038	Алюминий	1,000023
Кислород (газообразный)	1,000017	Вольфрам	1,000253
Кислород (жидкий)	1,003400	Платина	1,000253

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 $\overline{M} = \sum \overline{J}_{si} = \mathbf{0}$. 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 $\overline{\mathbf{J}}_s$ в направлении поля $\overline{\mathbf{H}}$. 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 $\overline{\mathbf{H}}$.

Если ферромагнетик, находящийся в состоянии полного размагничивания ($\mathbf{J}=0$), намагничивать в монотонно и медленно возрастающем поле, то получающуюся зависимость $\mathbf{J}(\mathbf{H})$ называют кривой первоначального намагничивания. Эту кривую обычно подразделяют на пять участков (рис. 2.1.6).

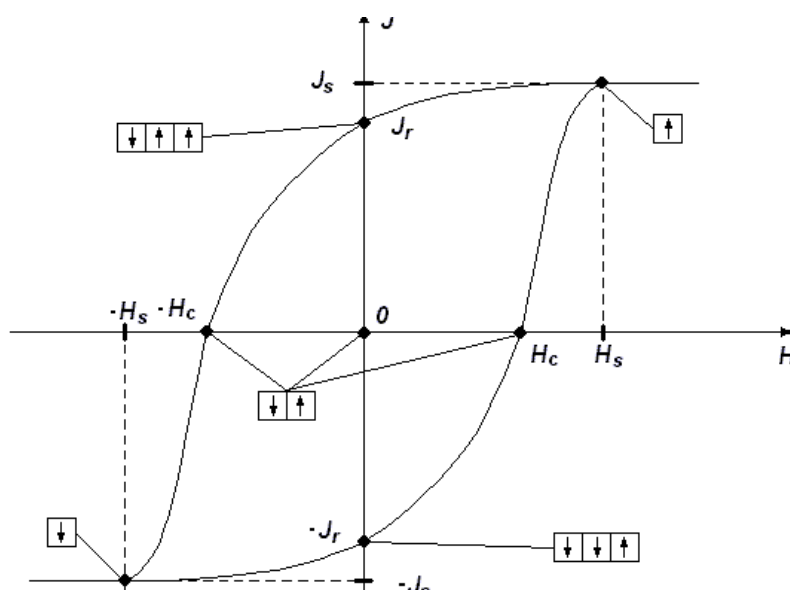


Рис. 2.1. Кривая первоначального намагничивания

Участок I – область начального, или обратимого намагничивания, где $\overline{\mathbf{J}} = \chi_m \overline{\mathbf{H}}$. 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 , связанным 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 далее с ростом напряженности магнитного поля практически не меняется (область V).

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 различного рода неоднородностей. Поэтому при уменьшении напряженности до нуля у ферромагнетика сохраняется т. н. **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 поте-

рям добавляются другие потери, связанные с **вихревыми токами (eddy current)** и **магнитной вязкостью (magnetic viscosity)**.

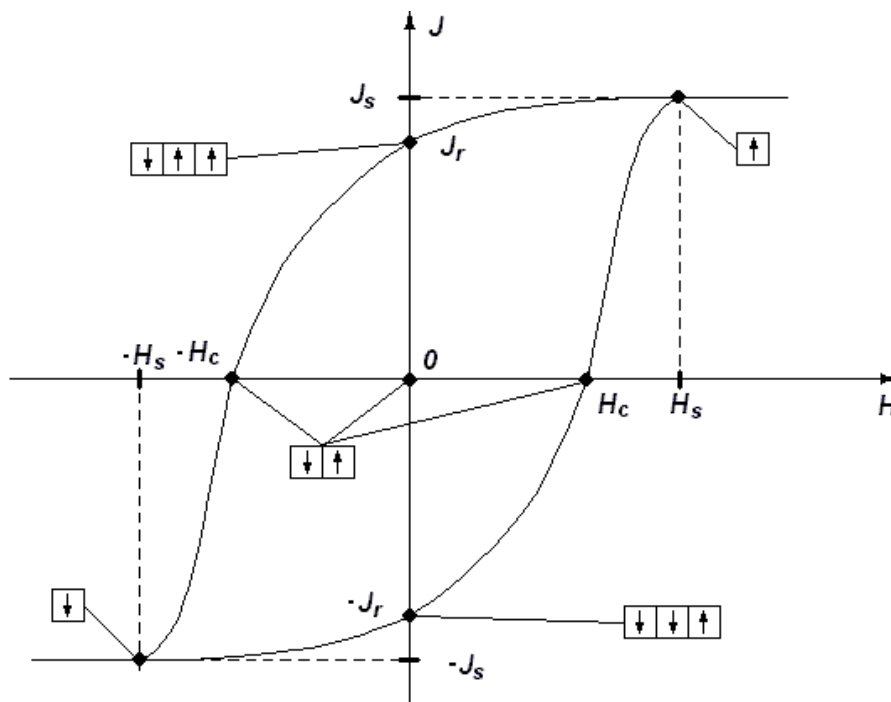


Рис. 2.2. Предельная петля гистерезиса ферромагнетика

Площадь петли гистерезиса при высоких частотах увеличивается. Такую петлю называют динамической, в отличие от описанной выше статической 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_H и максимальная 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).

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_c . 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 (magnetosoft)** и **магнитотвердые (magnetohard)** (табл. 2.1). К магнитомягким относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью $H \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ А/м}$. 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 – $1 \dots 10^3 \text{ Дж/м}^3$ на один цикл.

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

Магнитные свойства материалов зависят не только от их химического состава, но в значительной мере от структурного состояния кристаллической решетки, определяемого механической и 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 перемаг-

ничивании $\frac{\Delta l}{l} \approx 10^{-5} \dots 10^{-2}$. 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_s , проявляется обусловленная обменными силами объемная магнитострикция.

Таблица 2.3

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 (закалка)	2160	1.18	–
	Сталь Х17Н2	1760	0.59	–
	Сталь Х17Н2 (закалка)	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 (магнико)	48000	1.23	–
	2ФК (Со-феррит)	144000	0.3	–
	Co_5Sm	272000	0.94	–
	ПлК (платинакс)	320000	0.79	–

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 напряжений изменяется доменная структура ферромагнетика – векторы намагниченности доменов \mathbf{J}_s меняют свою ориентацию, что может в одних случаях облегчать, а в других затруднять процесс намагничивания.

2.3. Физические основы магнитной дефектоскопии

2.3.1. Общие положения [1]

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 магнитостатическое поле (магнитные поля создаются постоянными магнитами или катушками с постоянными токами) или квазимагнитостатическое поле (магнитные поля создаются катушками с переменными токами, но с такой частотой, что влиянием вихревых токов можно пренебречь).

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

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.

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 магнитной 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 – рассеиваются, 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).

Напротив, если неоднородность среды нарушена дефектом (например, трещиной), то магнитные силовые линии деформируются в этих местах.

Стремясь обойти эти места с пониженной магнитной проницаемостью, часть силовых линий выходит за пределы детали – рассеивается в воздухе.

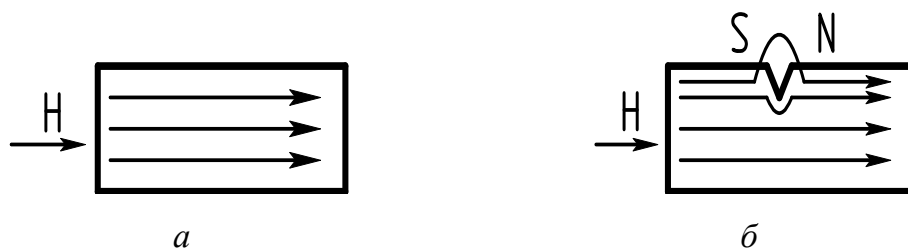


Рис. 2.4. Магнитное поле в ферромагнитном материале при отсутствии (а) и наличии (б) трещины.
 N и S – магнитные полюса вблизи трещины

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.

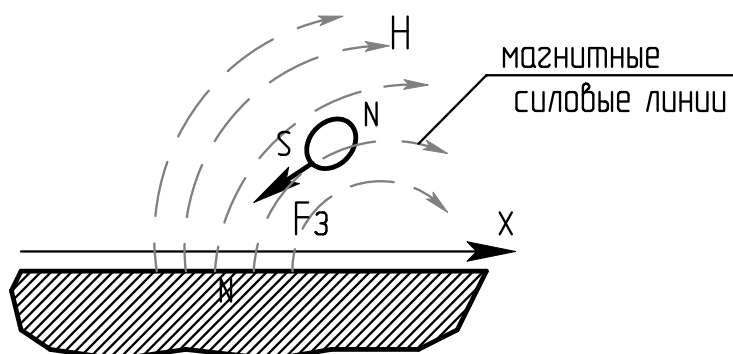


Рис. 2.5. Магнитная частица в неоднородном магнитном поле.
 N и S – магнитные полюса; H – вектор напряженности магнитного поля;
 F_3 – затягивающая сила действующая на частицу

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:

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

где ν – 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 направлению магнитного поля.

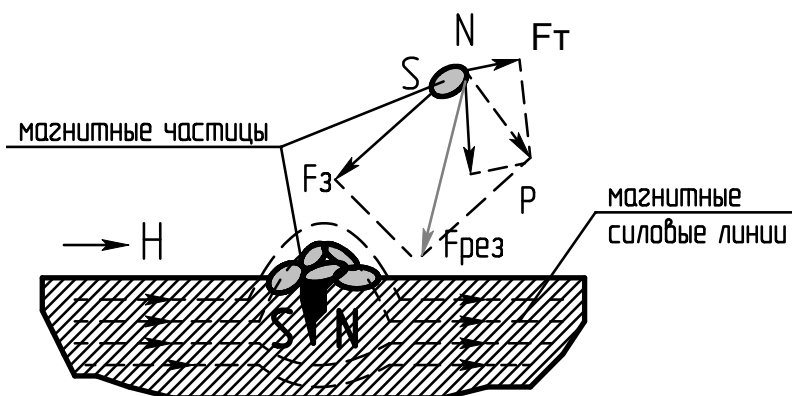


Рис. 2.6. Силы, действующие на магнитную частицу в магнитном поле рассеяния:

P – сила тяжести (вес); F_3 – затягивающая сила;

F_t – 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) зависит от характера и размеров де-

фекта. По виду индикации можно определить характер дефекта (не-сплошности металла). Длина валика порошка сопоставима с длиной де-фекта. С другой стороны, этот метод не дает объективной информации о глубине дефекта, поэтому он не пригоден для решения задач дефекто-метрии, 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.

Список литературы к главе 2

1. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: УРО РАН, 1996, ISBN 5-7691-0655-7.

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТО-ПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

3.1. Методы создания и расчета магнитных полей

3.1.1. Магнитное поле.

Закон Био-Савара-Лапласа (Biot-Savart-Laplace) [1]

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.).

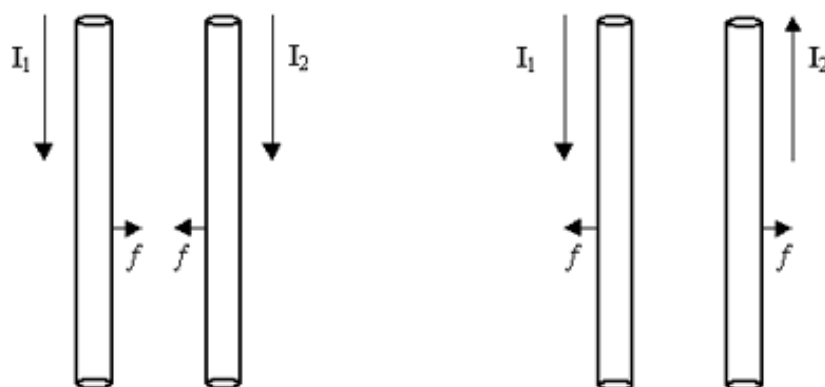


Рис. 3.1. Взаимодействие двух токов,
текущих по параллельным проводникам

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 \mathbf{H} , которую называют напряженностью поля и которая является векторной величиной. Величина поля определяется законом Био-Савара-Лапласа, согласно которому элемент контура Δl

(рис. 3.2), по которому течет ток силой I , создает в произвольно избранной точке A 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.

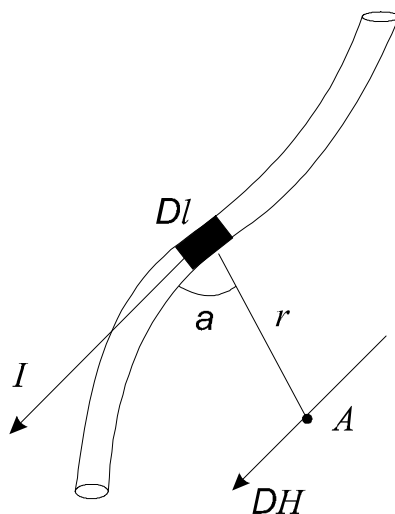


Рис. 3.2. К выводу закона Био-Савара-Лапласа

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:

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

Вектор \mathbf{H} перпендикулярен плоскости чертежа.

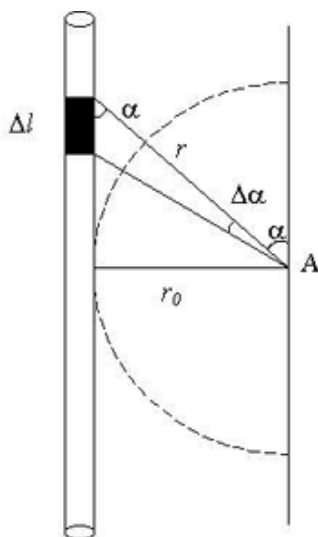


Рис. 3.3. К расчету поля прямого провода с током

3.1.3. Поле кругового тока

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

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

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

Направление поля перпендикулярно плоскости чертежа.

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

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

Вектор поля – в плоскости чертежа.

При $d=0$ (т. е. в центре кругового тока) выражение (3.4) переходит в (3.3). При $d \gg R$

$$H = \frac{IR^2}{2d^3},$$

т. е. очень быстро спадает с увеличением диаметра d .

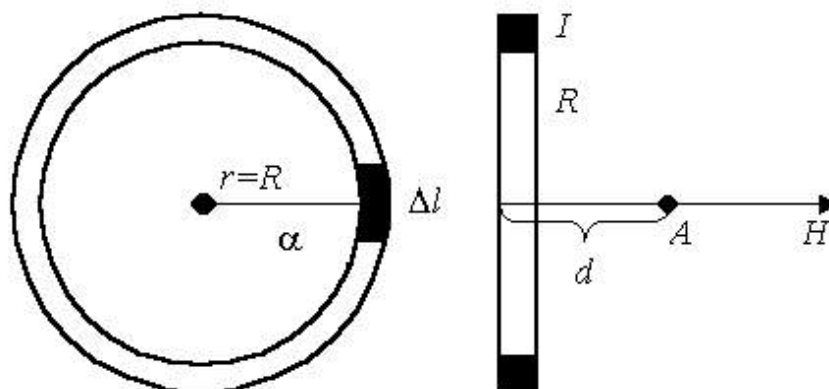


Рис. 3.4. Поле кругового тока

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 [1]

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 употребляют 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 $l \gg R$

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

т. е. 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.

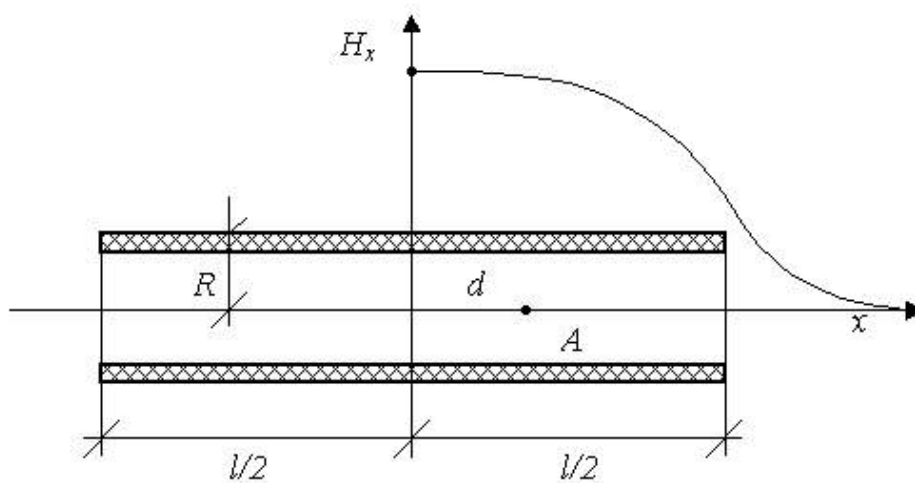


Рис. 3.5. Поле на оси соленоида

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:

1. $H = 0$ при $r = 0$;
2. $H = I r / 2\pi R^2$ при $r \leq R$;
3. $H = I / 2\pi r$ 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. $H = 0$ при $r \leq R_1$;
2. $H = I / 2\pi r$ при $r \geq R_2$;
3. $H = \frac{I(r^2 - R_1^2)}{2\pi r(R_2^2 - R_1^2)}$ при $R_1 \leq r \leq R_2$. (3.10)

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

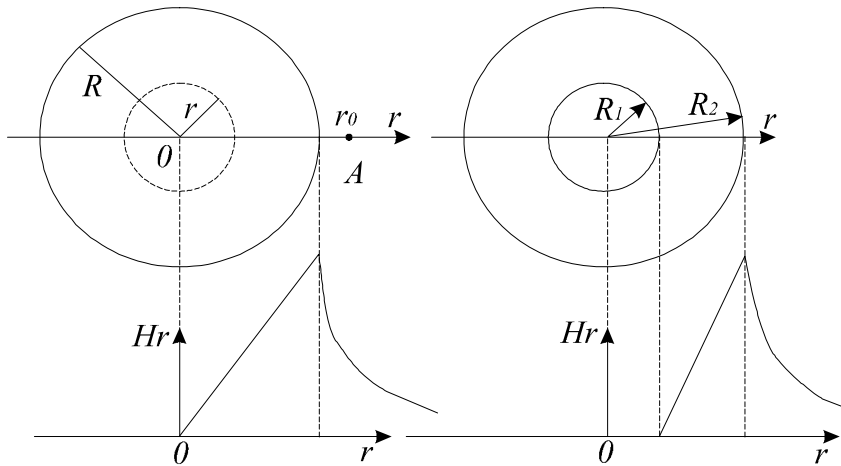


Рис. 3.6. Поле тока, текущего по цилиндру (*a*) и по трубе (*б*)

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 – они 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} , $k = \sqrt{2\pi f \sigma \mu_0}$, здесь f – частота электромагнитных колебаний, Гц; σ – удельная элек-

трическая 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_0 (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 .

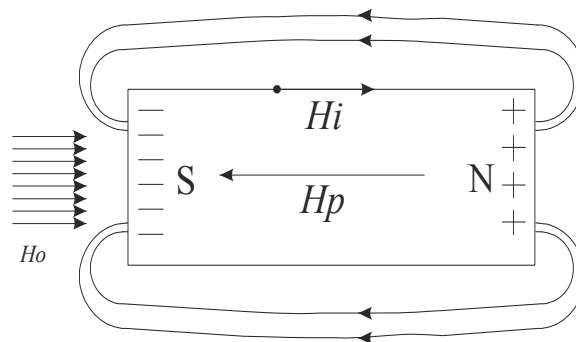


Рис. 3.7. Размагничивающее действие полюсов при продольном намагничивании образца

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 су-

щественно 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, и для этого применяется параметр под названием **магнитная проницаемость тела μ_r .**

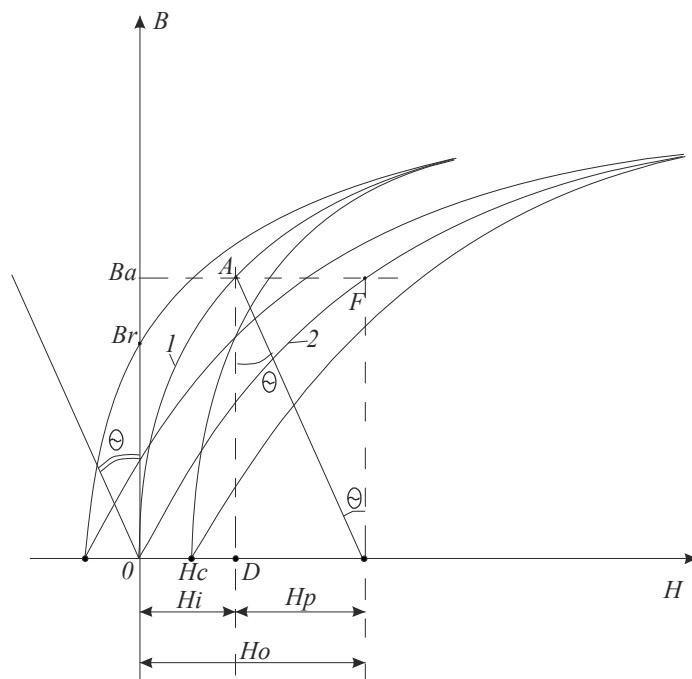


Рис. 3.8. Построение кривой намагничивания тела (2) по кривой намагничивания материала (1)

Магнитная проницаемость тела μ_T и магнитная проницаемость материала μ связаны соотношением

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

Отсюда видно, что если коэффициент размагничивания N велик по сравнению с обратной величиной $1/\mu$, то проницаемость тела μ_T независимо от истинной проницаемости μ определяется главным образом значением N , и наоборот, при $N = 0$ получается равенство $\mu_T = \mu$. 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 $\mu_T = 3p$, 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 потребуется 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 $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр детали. В этом случае площадь сечения детали произвольной формы приравнивают к площади эквивалентной окружности $S_{\text{дет}} = \pi d_{\text{экв}}^2/4$, откуда рассчитывается значение $d_{\text{экв}}$. 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 удлинняющие 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 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.

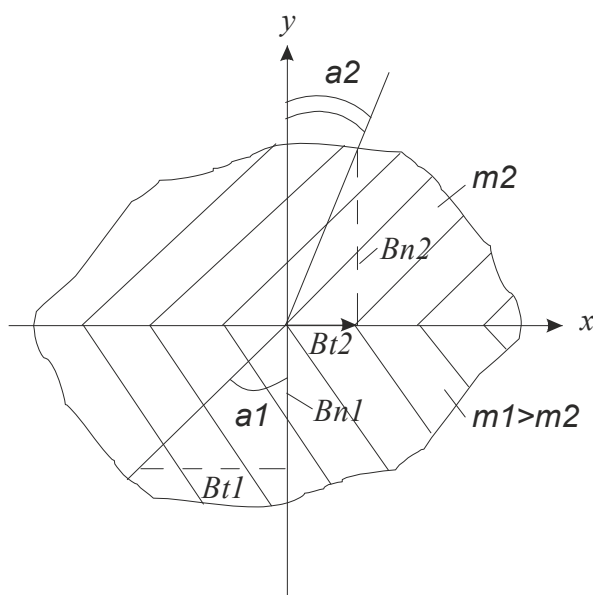


Рис. 3.9. Схема к выводу закона преломления магнитных силовых линий на границе раздела двух сред

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

$$\overline{\mathbf{B}_{n1}} = \overline{\mathbf{B}_{n2}}, \quad (3.13)$$

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

$$\overline{\mathbf{H}_{t1}} = \overline{\mathbf{H}_{t2}}. \quad (3.14)$$

Тангенциальная составляющая магнитной индукции в обоих веществах определяется по формулам:

$$\mathbf{B}_{t1} = \mu_1 \mathbf{H}_{t1} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{B}_{t2} = \mu_2 \mathbf{H}_{t2}, \quad (3.16)$$

откуда с учетом (3.14)

$$\frac{\mathbf{B}_{t1}}{\mathbf{B}_{t2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (3.17)$$

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

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{\mathbf{B}_{t1}}{\mathbf{B}_{n1}}; \operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{\mathbf{B}_{t2}}{\mathbf{B}_{n2}}. \quad (3.18)$$

откуда

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

Согласно (3.13) вблизи границы раздела двух сред $\mathbf{B}_{n1} = \mathbf{B}_{n2}$, откуда

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{\mathbf{B}_{t1}}{\mathbf{B}_{t2}} = \frac{\mathbf{H}_{t1}\mu_1}{\mathbf{H}_{t2}\mu_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (3.20)$$

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 диапазон значений от 100 до нескольких тысяч. 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 $\text{tg}\alpha_2 = 0.01$, 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 чугуне). В однородном магнитном поле \mathbf{H}_0 ферромагнетик приобретает намагниченность \mathbf{J}_n , 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 \mathbf{H}_d называют **полем дефекта**. Поле \mathbf{H}_d имеет сосредоточенный характер, поэтому результирующее поле, которое является суперпозицией внешнего намагничивающего поля \mathbf{H}_0 и поля дефекта \mathbf{H}_d , становится неоднородным и имеет сложную топографию.

На рис. 3.10, *a* показано типичное поле рассеяния над поверхностным дефектом в виде прямоугольной канавки шириной $2b$ и глубиной h , а на рис. 3.10, *б* – топография тангенциальной \mathbf{H}_{td} и нормальной \mathbf{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 **градиентомеры (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 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.

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 для внутреннего 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.

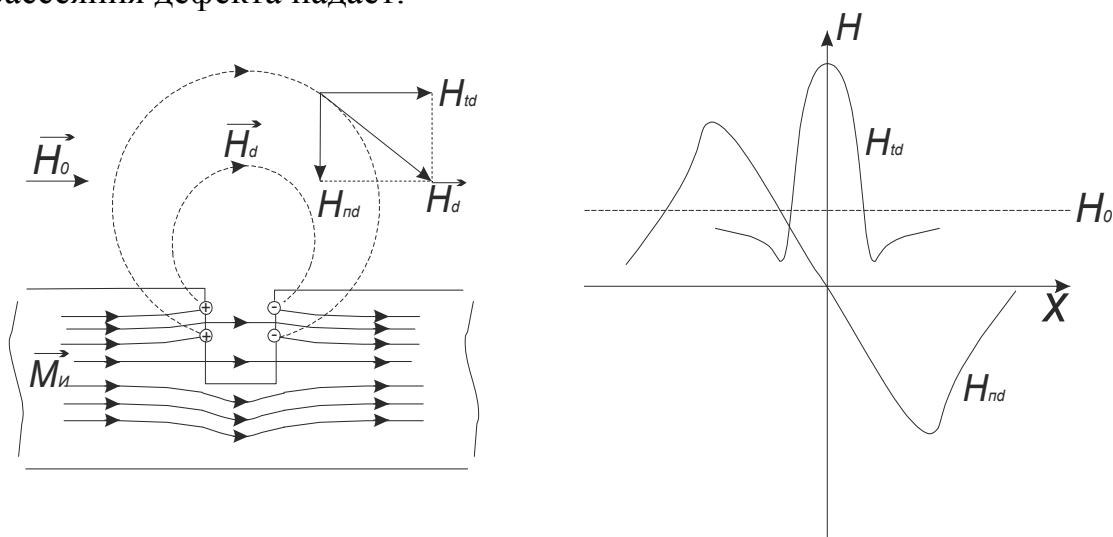


Рис. 3.10. Распределение намагниченности в ферромагнитном изделии и поля рассеяния H_d над поверхностным дефектом (а), а также топография тангенциальной H_{td} и нормальной H_{nd} составляющих напряженности поля поверхностного дефекта (б)

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 перпендикуляр-

но 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, *a*);
 - с помощью переносного электромагнита (возможно применение постоянного и переменного тока – рис. 3.11, *б*);
 - с применением катушки – катушка 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 $L/2$.

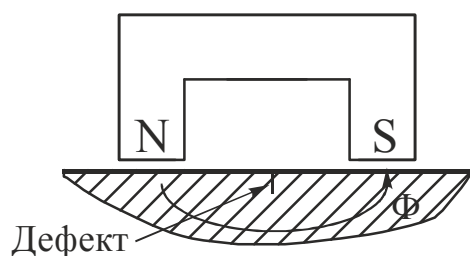
При продольном намагничивании переносными электромагнитами необходимо обеспечить хороший контакт полюсов магнита с поверхностью детали и отсутствие воздушных зазоров или немагнитных покрытий

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).

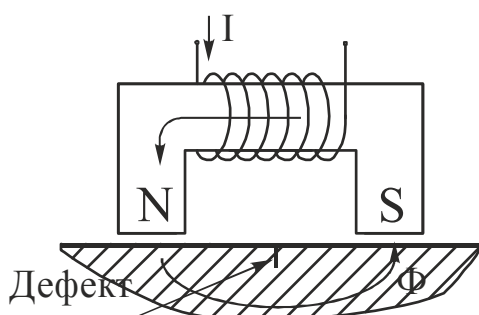
При намагничивании соленоидом коротких деталей (при соотношении длины к диаметру менее 10) обязательно необходимо учитывать размагничивающий фактор. Способы намагничивания таких деталей приведены в разделе 3.2.3. Ориентация дефектов, оптимально выявляемых при полюсном намагничивании, показана на рис.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

Полюсное намагничивание (Pole magnetization)



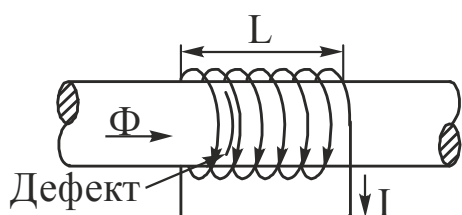
а) постоянным магнитом

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

Рис. 3.11. Способы полюсного намагничивания

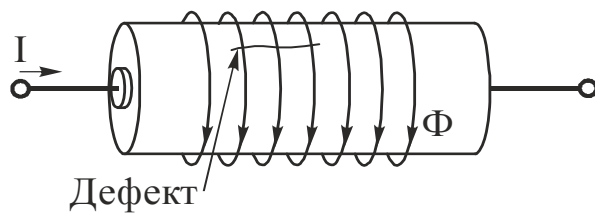
3.2.5.2. Циркулярное намагничивание (Circular Magnetization)

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);

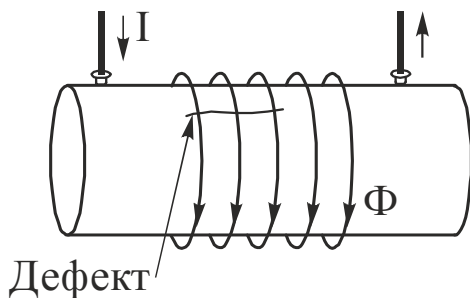
При циркулярном намагничивании необходимо знать связь между током и напряженностью поля на поверхности детали.

Циркулярное намагничивание (Circular Magnetization)



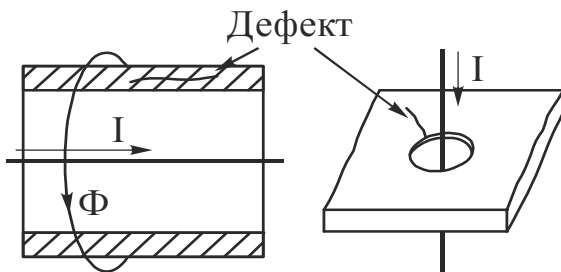
а) пропусканием тока по всему изделию

Оси, валы, длина которых позволяет пропустить ток необходимой величины



б) пропусканием тока по контролируемой части изделия

Отдельные участки валов, плоских поверхностей, сварных соединений. Очень 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

Рис. 3.12. Способы циркулярного намагничивания

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

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

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

В случае контроля детали прямоугольного сечения (рис. 3.13)

$$I_{ц} = 2H(a+b), \quad (3.23)$$

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

$$I_{ц} = 2Ha, \quad (3.24)$$

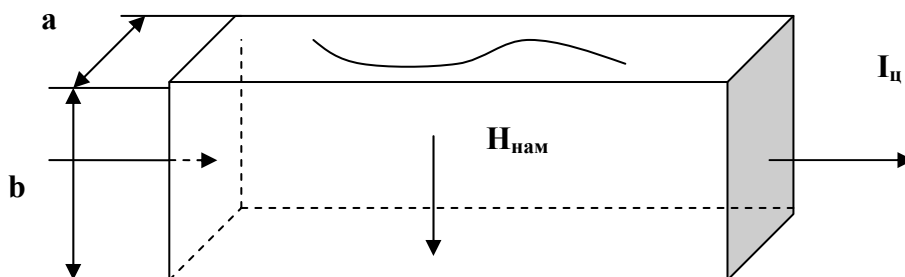


Рис. 3.13 Циркулярное намагничивание детали прямоугольного сечения

Часто вариант намагничивания, приведенный на рис. 3.13 применяют при контроле крупногабаритных деталей. В этом случае расстояние между электроконтактами L_k выбирать из условия $75 \text{ мм} \leq L_k \leq 250 \text{ мм}$. 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 $0,6L_k$. 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.

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.

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

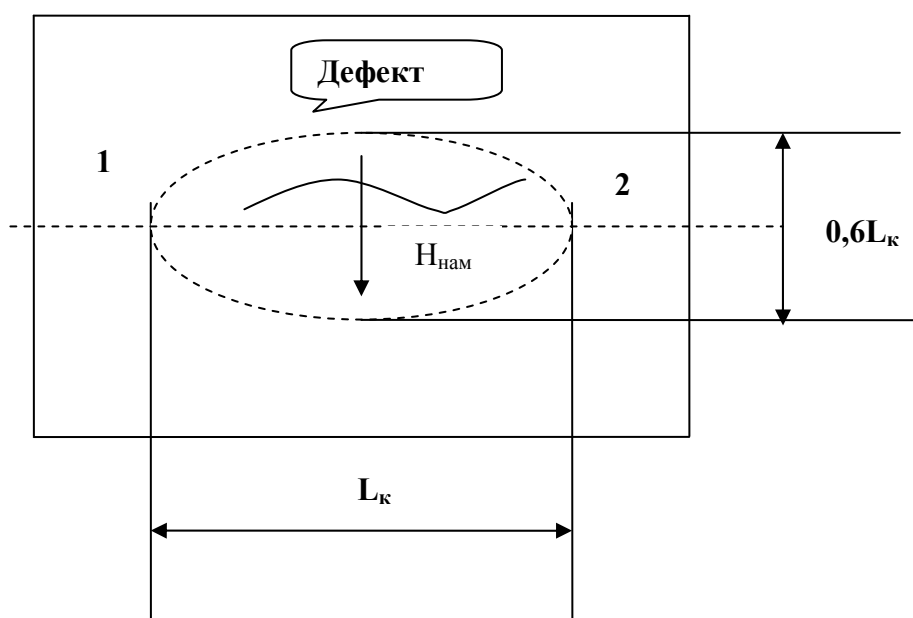


Рис. 3.14. Циркулярное намагничивание участка крупногабаритной детали

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 накопечников 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)

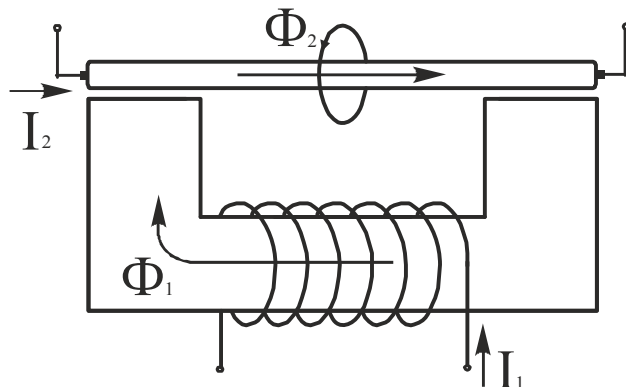
Осуществляется двумя или несколькими полями, ориентированными различно в пространстве и отличающимися законами изменения во времени. При комбинированном намагничивании результирующий вектор намагничивающего поля поворачивается на угол минимум 90° или вращается в пространстве, поэтому его применяют для 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, при

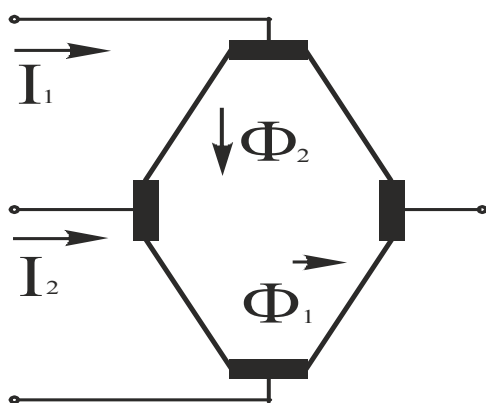
контроле деталей в полевых условиях, дефектоскопист обычно имеет в наличии ограниченное количество намагничивающих устройств. В этом случае комбинированное намагничивание осуществляется намагничиванием детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях **последовательно во времени**, при этом объем контроля удваивается.

Комбинированное намагничивание (Combine Magnetization)



а) пропусканием через изделие электрического тока и магнитного потока от электромагнита

Выявление дефектов произвольной ориентации в осях, валах



б) пропускание по изделию двух (или более) независимых токов во взаимно перпендикулярных направлениях

Отдельные участки валов, плоских поверхностей, сварных швов

Рис. 3.15. Способы комбинированного намагничивания

3.2.6. Способы размагничивания (methods of 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.

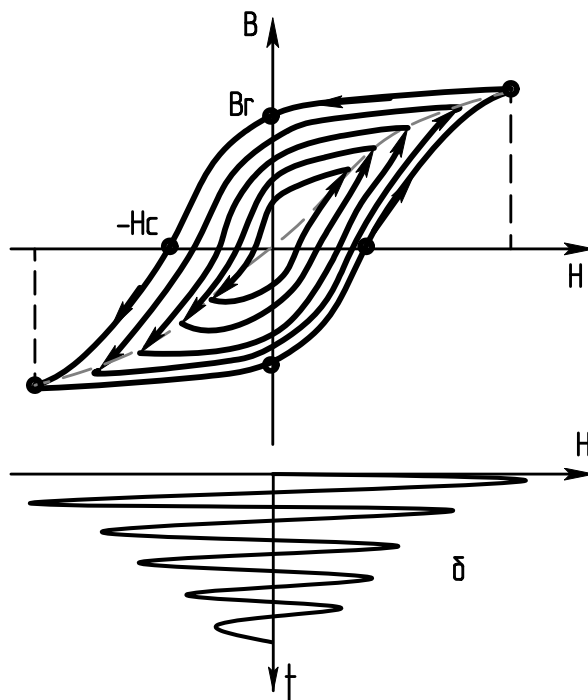


Рис. 3.16. Изменение магнитной индукции при размагничивании:
 B – магнитная индукция; H – напряженность магнитного поля;
 B_r – остаточная индукция; H_c – коэрцитивная сила; t – время

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 – т. е. соленоидом, гибким кабелем, электроконтакта-

ми, электромагнитом. При этом необходимо обеспечить, чтобы ток через эти устройства изменялся по закону, представленному на рис. 3.17.

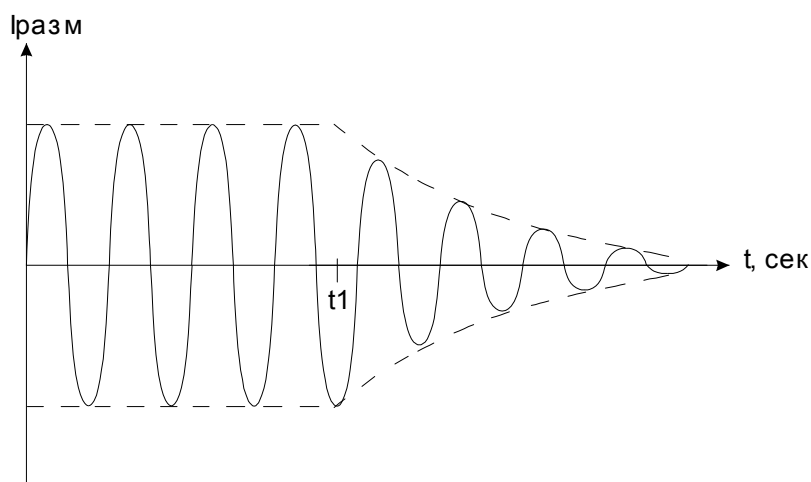


Рис. 3.17. Закон изменения тока в размагничивающем устройстве

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 не размагниченными. Поэтому для размагничивания относительно массивных деталей (практически при толщинах 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_3 . Изделие считается размагниченным, с технической точки зрения, если остаточная напряженность поля в любой точке изделия не превышает тройного значения поля Зем-

ли. 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. 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. Условные уровни чувствительности (по ГОСТ 21105-87¹) приведены ниже (табл. 3.2). Следует заметить, что требуемого уровня чувствительности можно достичь лишь в том случае, когда поверхность детали обработана с шероховатостью не хуже приведенной в таблице.

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

- номер документа, по которому проводится контроль;
- обозначение типов изделий;

¹ В настоящее время готовится новая редакция ГОСТа

- 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.

Таблица 3.2

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	

Примечания

1 Условный уровень чувствительности А достигается при параметре шероховатости контролируемой поверхности $R_a \leq 2,5$ мкм, уровни чувствительности Б и В – при $R_a \leq 10$ мкм.

2 При выявлении подповерхностных дефектов, а также при $R_a > 10$ мкм чувствительность метода понижается и условный уровень чувствительности не нормируется.

3 При контроле изделий с немагнитными покрытиями с увеличением толщины покрытия чувствительность метода понижается.

В качестве индикаторов несплошностей используются чёрные и цветные магнитные, 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 раздельно 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 определяет 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 $R_z 40$.

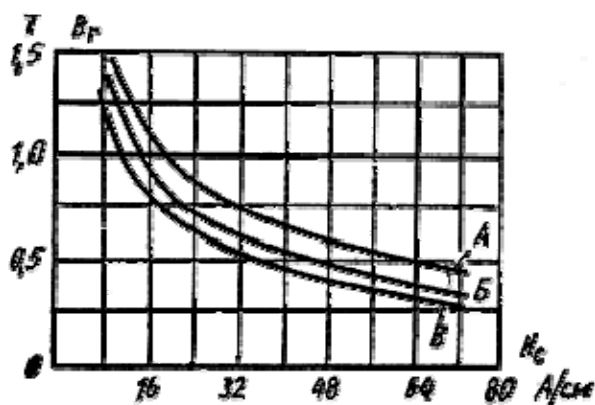


Рис. 3.18. Определение условного уровня чувствительности при контроле способом остаточной намагниченности

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 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 $H_{пр}$ по известному значению коэрцитивной силы H_c . Затем для выбранного способа

намагничивания и форме 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 формуле:

для объектов цилиндрической формы с круглым сечением

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

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

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

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

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

Для участков крупногабаритных объектов

$$I_{ц} = K \cdot H_{np} \sqrt{L^2 + C^2}, \quad (3.34)$$

где L – расстояние между электроконтактами или длина контролируемого участка, см; C – ширина контролируемого участка, см; K – 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 примет вид:

$$\text{для переменного тока } I_{ц} = 2,1 H_{np} L_{к}; \quad (3.35)$$

$$\text{для выпрямленного тока } I_{ц} = 1,7 H_{np} L_{к}. \quad (3.36)$$

На практике расстояние между электроконтактами $L_{к}$ выбирают в диапазоне от 75 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_{np} , рассчитывается по формуле:

$$I_{ц} = \pi \cdot D \cdot H_{np} / W, \quad (3.37)$$

где D – средний диаметр объекта контроля, см; H_{np} – 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:

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

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 $H_{пр}$ и индукции в материале 1,2 Тл, но не менее 0,8 Тл; $NJ=H_p$ – 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:

$$J=(B - H_{пр})/4\pi, \quad (3.39)$$

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: $H=H_{пр}+H_p$. 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 напряжен-

ности 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 выключить и приступить к нанесению магнитного индикатора 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. Магнитный индикатор на контролируемую поверхность наносится 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 струёй, не смывающей осевший порошок над

несплошностью, с обязательным стеканием её с поверхности. Наиболее часто применяют простую водную суспензию – (25 ± 5) грамм 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 литр воды определяет фирма-производитель – это значение может находиться в диапазоне от 5 до 50 грамм 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 изготавливаются многими фирмами в виде аэрозольных баллонов, готовых к употреблению. Среди известных производителей можно отметить Magnaflux и ELY (Великобритания)

При контроле изделий с темной поверхностью применяется технология магнитолюминесцентного контроля. Она основана на применении специального магнитолюминесцентного порошка, состоящего из смеси собственно 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, 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 перечисленные следы порошка являются ложными:

- 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 переходом одного сечения изделия к другому;
- размытые нечеткие индикации, вызванные местными изменениями магнитных свойств металла (например, по границам сварных швов);
- индикации в виде широких групп мелких и параллельных осадений 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**. Браковочные признаки – т. е. 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 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 Б и В, а выполненные ручной сваркой – только по условному уровню В [2].

Поверхность, подлежащая контролю, очищается от грязи, окалины и инородных частей. Ширина контролируемой зоны сварных соединений принимается ± 20 мм от оси шва [3]. 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 [4]. 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 [4]. Применение вращающихся металлических щеток и скребков для зачистки поверхности шва и околошовной зоны не допускается [2].

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

При контроле изделий с темной или серой поверхностью для обнаружения и анализа распределения индикаторного порошка необхо-

димо 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 большим.

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 [5]. 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.

3.3.2.4. 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. Возможные 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.



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

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 дополни-

тельные узлы (например, устройства комбинированного намагничивания, дефектоотметчики).



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

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

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

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).

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.



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

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 V_r и меньше дифференциальная магнитная проницаемость μ_d материала, тем больше напряженность поля рассеяния дефекта при прочих равных условиях.
 - б) Чем ниже остаточная индукция V_r и больше дифференциальная магнитная проницаемость μ_d материала, тем больше напряженность поля рассеяния дефекта при прочих равных условиях.
 - в) Чем выше остаточная индукция V_r 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?
- СПП.
 - СОН или СПП.
 - 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.
- Неправильно определен способ контроля и расстояние между электроконтактами.
 - Неправильно определена чувствительность контроля и расстояние между электроконтактами.
 - 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?
- Контроль невозможен.
 - Возможен контроль по СОН по условному уровню чувствительности В.
 - Возможен контроль по СПП, уровень чувствительности определяется состоянием поверхности.
13. Для каких целей применяется технология магнитолюминесцентного контроля?
- Для повышения чувствительности контроля.
 - Для снижения расхода магнитного порошка.
 - Для контроля деталей с темной поверхностью.
 - 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 V_r после термообработки?
- а) В случае затруднения с определением параметров H_c и V_r после термообработки необходимо применять технологию СПП.
 - б) В случае затруднения с определением параметров H_c и V_r после термообработки необходимо применять технологию СОН.

Список литературы к главе 3

1. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УРО РАН, 1996, ISBN 5-7691-0655-7.
2. ОСТ 92-4607-85. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод контроля.
3. ВСН-012-88. Часть 1. Строительство магистральных и промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ. Миннефтегазстрой. М.: ВНИИСТ, 1989.
4. РД 39-132-94. Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов. М.: НПО ОБТ, 1994.
5. ПНАЭ Г-7-015-89. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Магнитопорошковый контроль: М.: 1990.

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 – т. е. 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 и 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 [1]. 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 (ГОСТ17299-78). 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 отстоя 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 [2]. 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 $(6 \dots 9)$ 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 [2]. 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 с другом 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, которая включена 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, позволяет измерять остаточную напряженность деталей после размагничивания.

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 использо-

ваться 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.



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



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

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 [3] 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 ГОСТ21105-87 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 общее цеховое освещение 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, например типа Ю-16, Ю-116 или аналогичные.

Осмотр изделий, обработанной люминесцентной магнитной суспензией, следует проводить в ультрафиолетовом свете от источников ультрафиолетового излучения с длиной волны 3150400 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 [3]. 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 дефектов и их расположения на образце, размеры дефектов и 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 не указывается (это 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 А, Б и В. 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 в 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 А, Б и В 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.

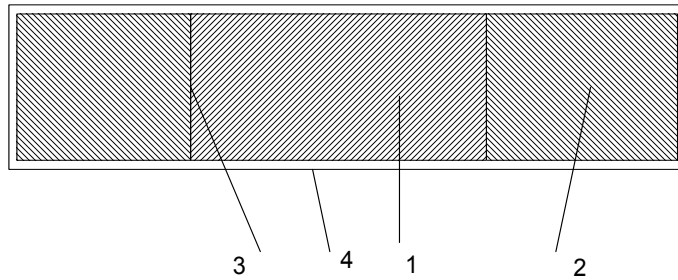


Рис. 4.3. Контрольный образец с поверхностным дефектом

Контрольный образец (рис. 4.4) предназначен для контроля качества двусторонних сварных швов [4] 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.

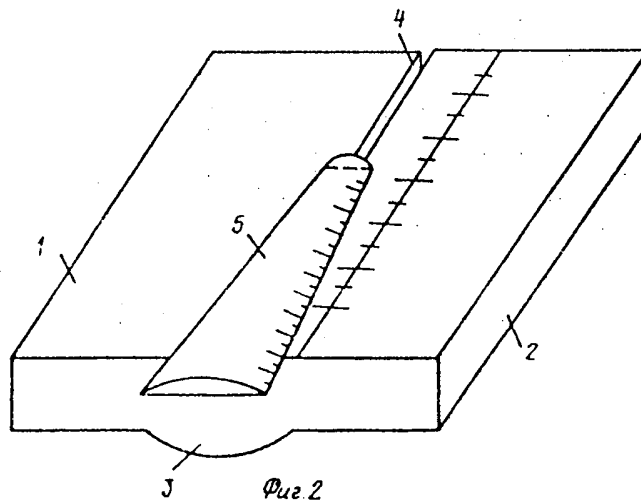


Рис. 4.4. Контрольный образец для магнитного контроля качества двусторонних сварных швов

Контрольный образец (рис. 4.5) содержит имитатор сварного соединения [5] 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 [6] 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.

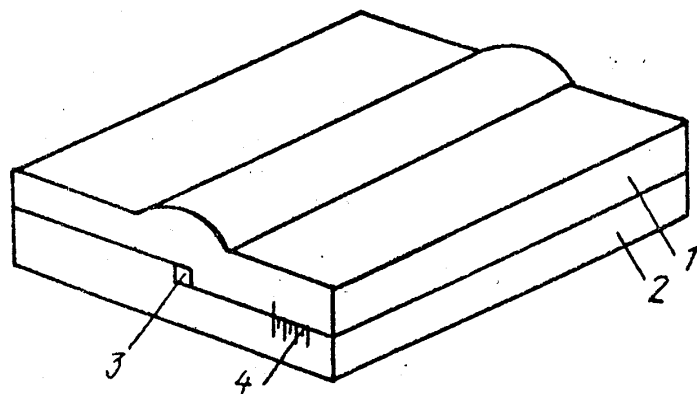
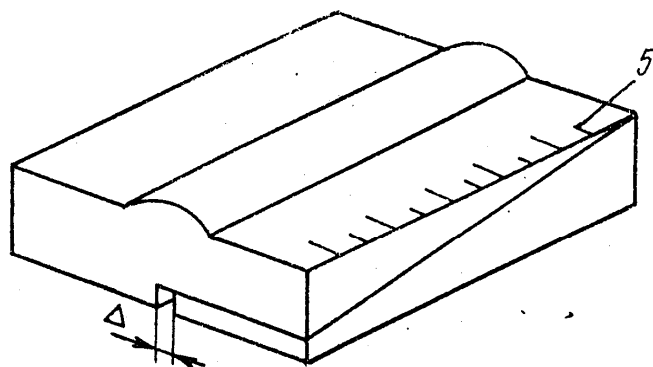
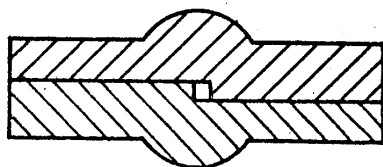


Рис. 4.5. Контрольный образец – имитатор сварного соединения

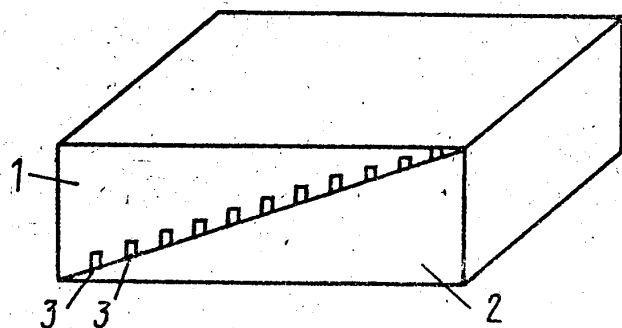


Фиг. 2



Фиг. 3

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



Фиг. 1

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

На рис. 4.7 представлен контрольный образец [7], 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.

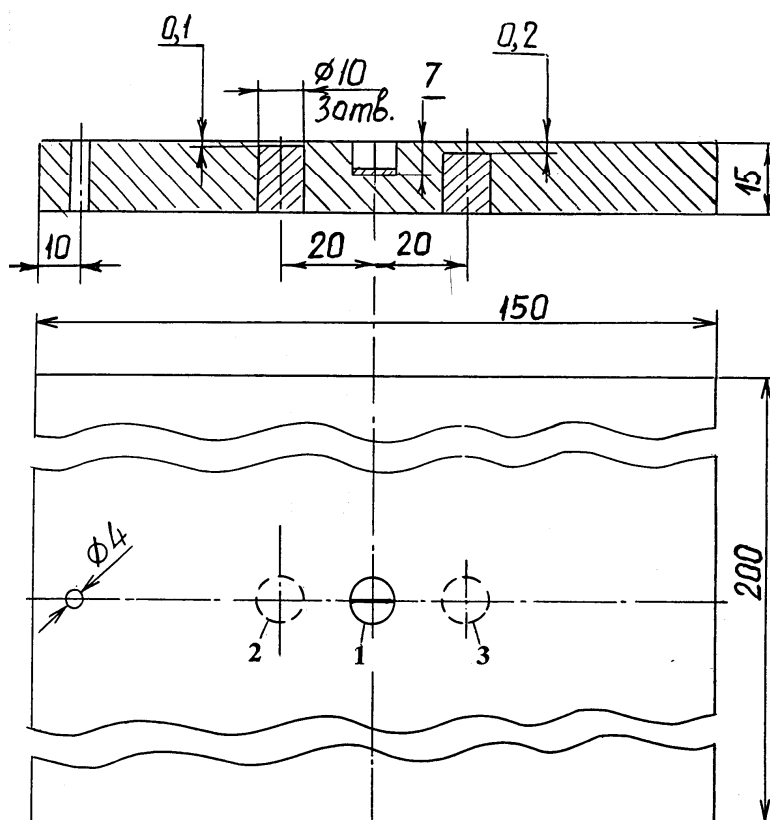


Рис. 4.8. Контрольный образец МО-1 Шелихова Г.С.

На рис. 4.8 представлен контрольный образец МО-1 Шелихова Г.С. [8] 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, точность задания глубины залегания дефекта невысока.

На рис. 4.9 представлен контрольный образец МО-3 Шелихова Г.С. с рядом подповерхностных дефектов с глубиной залегания от 2 мм до 8 мм. Собственно дефекты представляют 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).

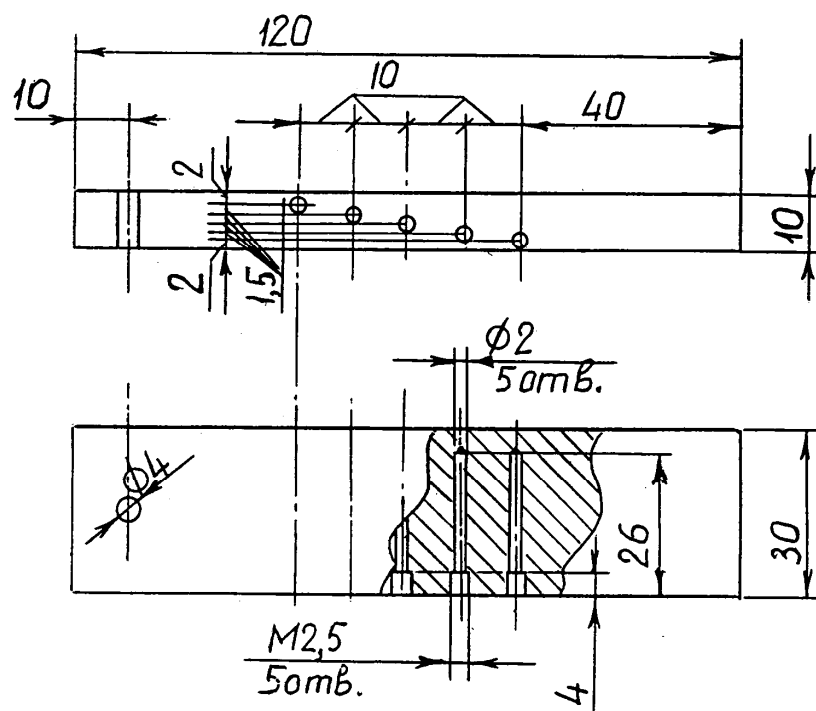


Рис. 4.9. Контрольный образец МО-3 Шелихова Г.С.

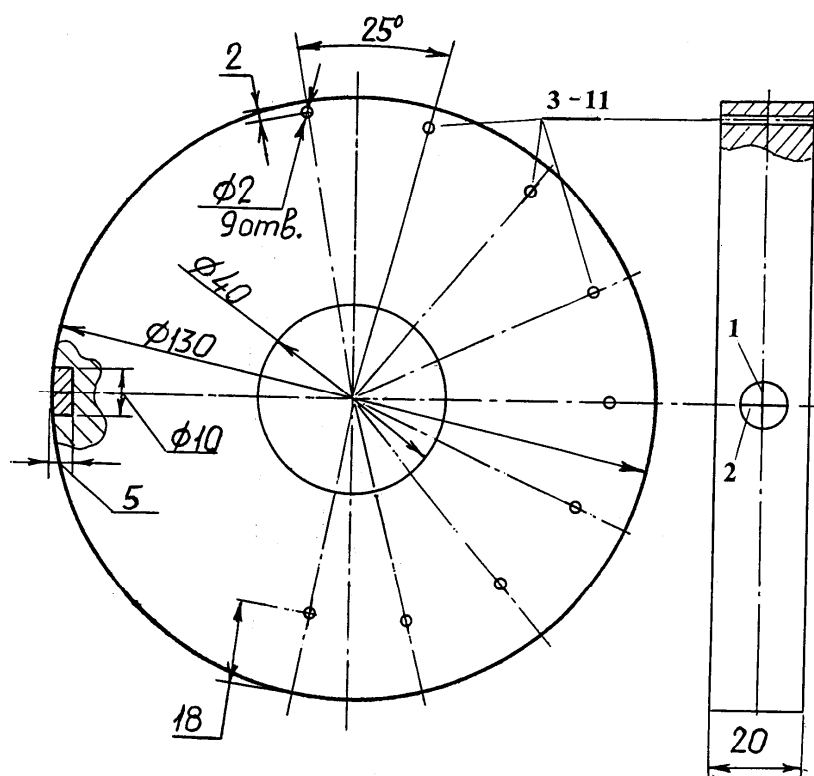


Рис. 4.10. Контрольный образец МО-4 Шелихова Г.С.

Контрольный образец МО-4 Шелихова Г.С. (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 различными 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.

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 дефектов, далекую от реальных дефектов, например дефектов металлургического происхождения [9,10].
- 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 [11] в виде ферромагнитной пластины 1 с цилиндрической вставкой 2, в которой выполнено сквозное отверстие 3 (может быть наклонным), имитирующее подповерхностный дефект, залегающий на известной глубине.

При намагничивании в направлении β 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.

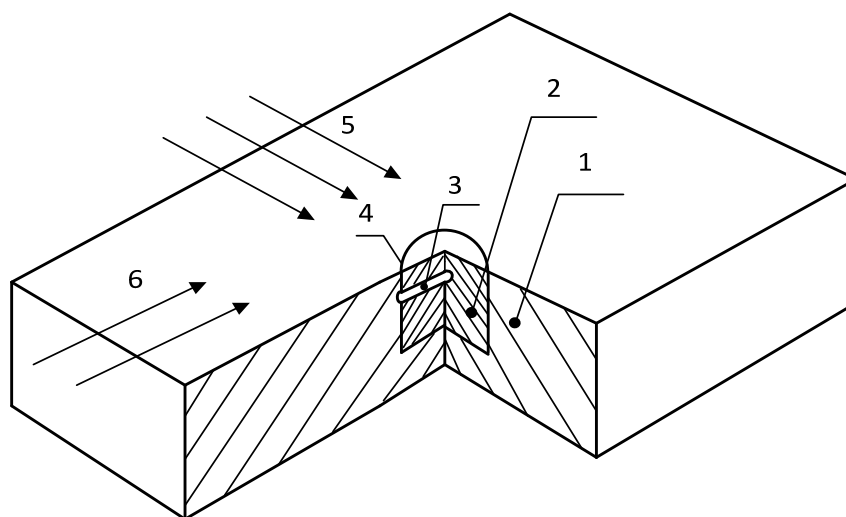


Рис. 4.11. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии

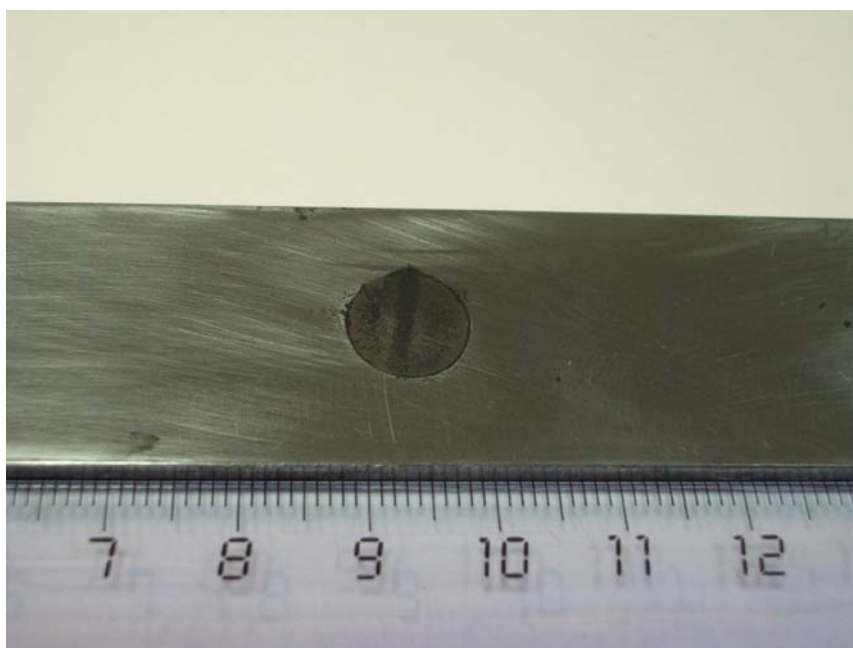


Рис. 4.12. Фотография отложения магнитного порошка в зоне подповерхностного дефекта

На рис. 4.12 представлена фотография отложения магнитного порошка в зоне подповерхностного дефекта, полученная при продольном намагничивании приставным электромагнитом дефектоско-

па 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 [12].

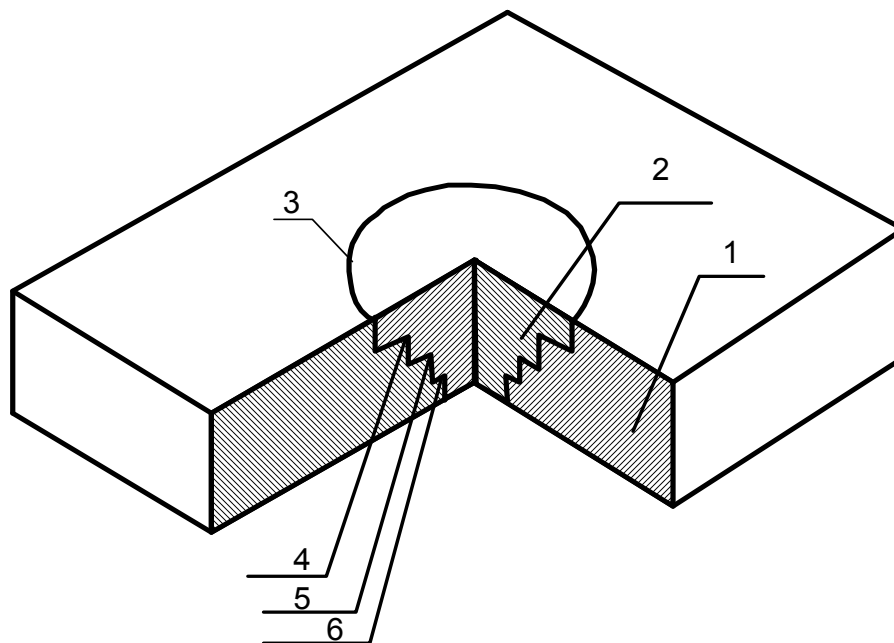


Рис. 4.13. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии

Данный контрольный образец может быть выполнен как из ферромагнитного, так и из немагнитного электропроводного материала для настройки как магнитных, так и вихретоковых дефектоскопов и 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 А, Б или В 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 ГОСТ21105-87?
 - 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, 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 и 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 и 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.

Список литературы к главе 4

1. ПНАЭ Г-7-015-89. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Госкомитет СССР по надзору за безопасным ведением работ в атомной энергетике. – М., 1990. – 32 с.
2. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов: практическое пособие / под ред. д.т.н. Лозовского В.Н. – М.: НТЦ «Эксперт», 1995.
3. Козлов В.В. Поверка средств неразрушающего контроля. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 215 с.
4. Давыдков А.А. и др. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии. Авторское свидетельство СССР № 1620927.
5. Шарова А.М. и др. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии. Авторское свидетельство СССР № 1658069.
6. Абакумов А.А., Чегодаев В.В. Контрольный образец для дефектоскопов. Авторское свидетельство СССР № 1693522.
7. Шкатов П.Н. и др. Настраечный образец с имитатором подповерхностного дефекта для магнитной дефектоскопии. Авторское свидетельство СССР № 1467488.
8. Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия в рисунках и фотографиях. – М.: Диагностический научно-технический центр «Дефектоскопия», 2002. – 324 с.
8. Дефекты стали. Справ. изд. / под ред. Новокщеновой С.М., Виноград М.И. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
9. Дефекты стальных прессованных труб и профилей: Справ. изд. Васюченко В.Е. и др. – М.: Металлургия, 1990. – 70 с.
10. Толмачев И.И., Прошутина Р.В. Контрольный образец для магнитной дефектоскопии. Патент РФ № 2245541. Дата выдачи: 27.01.2005.
11. Толмачев И.И., Прошутина Р.В. Универсальный контрольный образец для дефектоскопии. Патент РФ № 2273848. Дата выдачи: 10.04.2006.

ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ И ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

5.1. Общие положения

Высокое качество неразрушающего контроля обеспечивается строгим соблюдением технологии контроля, которая представлена в нормативных документах различного уровня. Прежде всего, это ГОС-Ты, которые описывают общие принципы контроля всех известных физических методов, в том числе и различных методов магнитного контроля. Применение ГОСТов носит рекомендательный характер. В различных отраслях народного хозяйства действуют свои технологические нормы и правила. Обязательными к применению при контроле потенциально опасных объектов являются нормы, содержащиеся в руководящих документах Ростехнадзора. К наиболее важным относятся документы серии ПБ – Правила безопасности, РД – Руководящие документы и СП – Своды правил. Наличие этих документов позволяет опытному специалисту разработать технологию контроля конкретной детали или изделия с применением одного или нескольких видов контроля (комплексный контроль) в виде короткого документа, носящего название **технологическая карта**.

5.2. Технологические карты в неразрушающем контроле

Требования к технологическим картам

Технологические карты (ТК) являются основными рабочими документами, в соответствии с которыми выполняется неразрушающий контроль (НК). От их качества, правильности описания в них технологии контроля, ясности и четкости их изложения в большой степени зависит эффективность неразрушающего контроля.

Технологическая карта является нормативно-техническим документом по проведению НК на предприятии и предназначена для постоянного применения на участке НК.

Технологические карты разрабатываются, как правило, техническим отделом или отделом технического контроля предприятия. Технологические карты периодически, обычно не менее одного раза в год, проверяется на соответствие действующей нормативно-технической документацией предприятия, и по необходимости в них вносятся изменения. Изменения вносятся ведущим инженером предприятия.

Содержание технологических карт

В технологических картах магнитопорошкового контроля должна содержаться основная информация, которая является необходимой для дефектоскописта, облегчает выполнение контроля, способствует исключению ошибок при его проведении.

К основной информации относятся:

- наименование изделия (узла);
- наименование и номер детали;
- марка материала детали (используется краткая стандартная форма записи наименования марки материала);
- эскиз детали с указанием габаритных размеров и зон контроля;
- метод и способ контроля;
- вид и схема контроля;
- параметры контроля (намагничивающий ток, шаг перемещения намагничивающего устройства);
- средства контроля (дефектоскоп, преобразователи, суспензии, типы луп и так далее). При перечислении оборудования указывается краткая форма его наименования и тип (модель);
- нормы на отбраковку.

Структура технологической карты

Для удобства пользования информацией технологические карты разрабатывают в виде таблиц, разбитых на графы. Заголовки граф должны отражать суть информации, приводимой в каждой из них.

Последовательность граф в технологической карте должна вытекать из логики ее применения, последовательности выполнения процесса контроля дефектоскопистом и значимости содержащейся в ней информации.

Структура технологической карты и характер изложения в ней материала должны предотвращать его неоднозначное толкование.

В целом разработка технологических карт контроля относится к ответственным и профессиональным видам деятельности, выполнять которые могут специалисты – практики, прошедшие специальную подготовку и аттестацию по определенным видам контроля (специалисты не ниже II уровня подготовки). При аккредитации лаборатории неразрушающего контроля технологические карты являются обязательным документом, предоставляемым в аккредитующий орган по всем заявленным направлениям.

Если на предприятии проводятся большие объемы контроля деталей и узлов (разных типоразмеров и марок сталей) различными видами контроля, то выполнение работ по разработке технологических карт

желательно автоматизировать. Невозможно представить подобную программу, которая бы охватывала все или несколько физически разнородных вида контроля. Поэтому имеет смысл проектировать подобные программы в рамках одного вида контроля (далее речь пойдет, естественно, о магнитном контроле), возможно, даже в пределах однородной группы объектов контроля, т. е. объектов, близких по форме и свойствам материалов. Ниже описана разработанная автором программа автоматизированной разработки технологических карт магнитопорошковой дефектоскопии

5.3. Программа «Эксперт» для автоматизированной разработки технологических карт магнитопорошковой дефектоскопии [1]

Создание технологической карты магнитопорошковой дефектоскопии является трудоемкой задачей. Для разработки технологической карты необходимо проведение расчетов, наличие необходимых справочных данных по магнитным характеристикам материала объекта контроля с учетом термообработки, по техническим параметрам используемой аппаратуры, а также принятой в данной отрасли нормативно-технической документации. От качества разработанной технологической карты, правильности описания в них технологии контроля, ясности и четкости их изложения в большой степени зависит эффективность неразрушающего контроля. В связи с этим, составление технологической карты требует достаточной квалификации специалиста. Разработкой технологических карт могут заниматься аттестованные специалисты II уровня в соответствии с требованиями Ростехнадзора.

Основной целью автоматизации процесса создания технологических карт является сокращения времени и уменьшение количества ошибок при расчетах (автоматизация расчетов), оптимизация выбора режимов контроля, выбор образцов и расходных материалов. Исходя из поставленных целей, к программе для автоматизации процесса создания технологических карт предъявляется ряд требований:

- Наличие баз данных, содержащих всю необходимую информацию (нормативная документация, ГОСТы, данные о свойствах материалов, эскизы деталей, оборудование и расходные материалы, метрологическое обеспечение и т. д.);
- Возможность пополнения баз данных;
- Наличие системы для необходимых расчетов режимов намагничивания;
- Функция вывода отчета на печать;
- Возможность ручного редактирования отчета;

- Удобный интерфейс;

Эта программа состоит из следующих баз данных помогающих при создании технологических карт:

- база готовых эскизов деталей с указанием размеров и положения зон контроля (по отраслям);
- база магнитных характеристик сталей с учетом режимов термообработки;
- база НТД (по отраслям);
- база приборов магнитопорошковой дефектоскопии;
- база расходных материалов;
- база данных контрольных образцов (КО) и стандартных образцов предприятия (СОП).

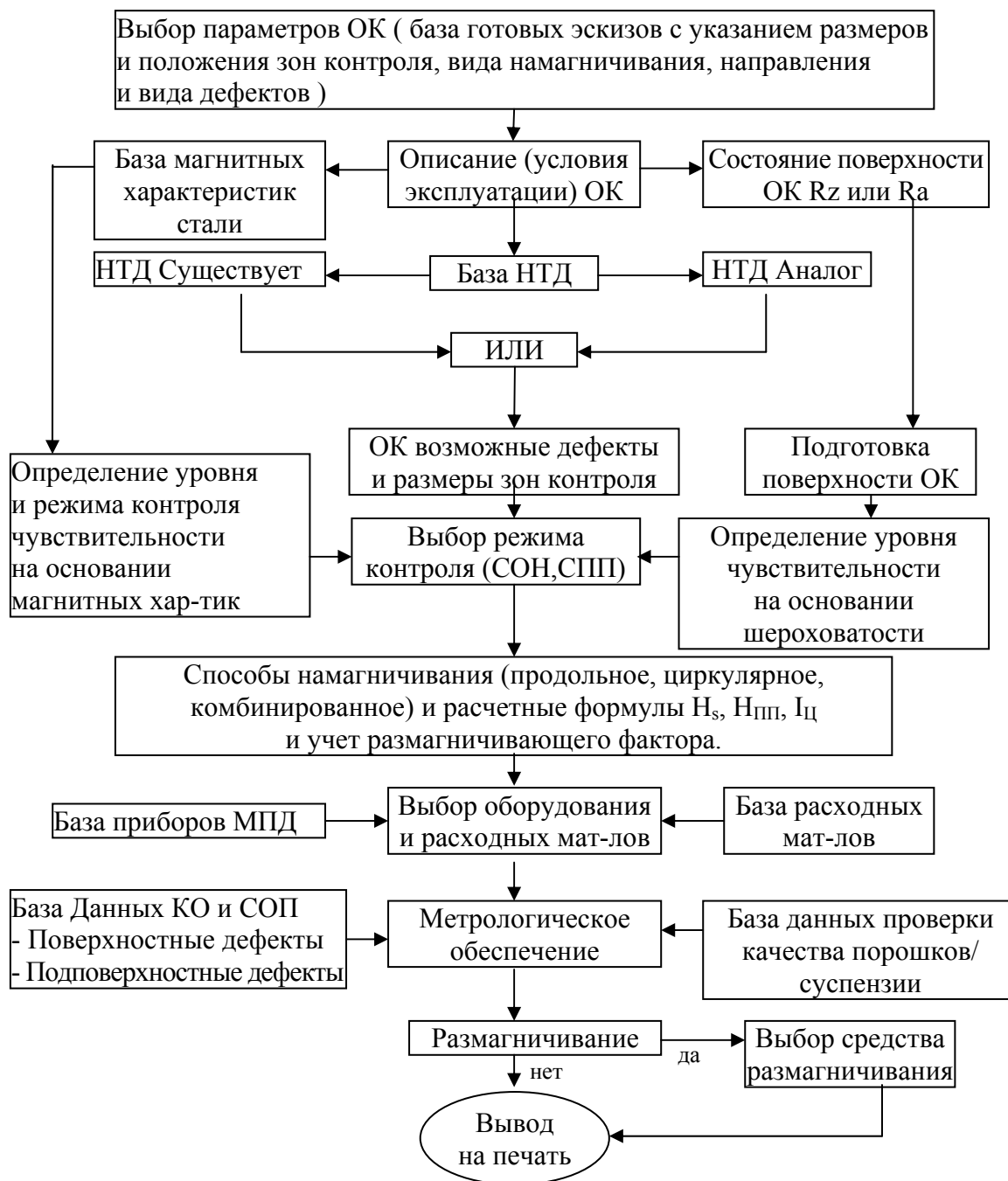
Для проведения необходимых расчетов в процессе разработки технологических карт в программу встроены:

- Подпрограмма определения уровня чувствительности контроля на основании магнитных характеристик и шероховатости поверхности;
- Подпрограмма, рекомендуемая способы намагничивания (продольное, циркулярное, комбинированное) и режим контроля (способ остаточной намагниченности (СОН), способ приложенного поля (СПП));
- Подпрограмма, рассчитывающая напряженность поля насыщения (H_s), напряженность приложенного поля (H_{III}), ток намагничивания (I) с учетом размагничивающего фактора;

В виде расширения возможностей может быть представлена подпрограмма позволяющая определять места возможных дефектов, а также объем контроля из партии на основании статистических методов контроля.

Качество работы программы по приведенному выше алгоритму во многом определяется качеством и полнотой включенных баз данных. Все базы данных могут существовать и отдельно в качестве информационно-справочных инструментов. Наиболее узким местом является база данных магнитных характеристик сталей. В принципе такие сведения существуют в разрозненном виде в учебниках и в нормативных документах. Как правило, сведения сведены в таблицу, содержащую значения коэрцитивной силы, остаточной индукции и напряженности поля, необходимой для технического насыщения. Сведения приводятся для материала в состоянии поставки, иногда дополнены для нескольких режимов термообработки. Проблема возникает в том случае, если проводится расчет режима для термообработанной стали, а справочные данные для такого режима термообработки отсутствуют, либо приведены для других значений температуры закалки или отпуска. Это зна-

чит, что в этом случае необходимо измерить магнитные характеристики материала детали, ввести данные в программу вручную и затем продолжить расчет.



Структурная схема системы автоматизированной разработки технологических карт магнитопорошковой дефектоскопии

Для более комфортной работы с базой данных магнитных характеристик необходимо спроектировать ее таким образом, чтобы в ней были заложены зависимости магнитных характеристик сталей от ре-

жимов термообработки. В принципе такие исследования проводились в 50–70 годы в нашей стране, есть соответствующие публикации, например, в журнале «Дефектоскопия», в которых необходимые сведения представлены в графическом виде. Для решения этой задачи предлагается [2] структура подобной базы данных, в которой известные графические зависимости разбиваются методом кусочно-линейной аппроксимации на прямолинейные участки, для каждого из которых вычисляются коэффициенты уравнения прямой, заложенные в программу. Это позволяет получить данные о магнитных свойствах стали по запросу, путем введения значений температуры закалки и отпуска и затем ввести эти данные в программу расчета.

Список литературы к главе 5

1. Каюмов Р.Н., Прохоров В.В., Толмачев И.И. Система автоматизированной разработки технологических карт магнитопорошковой дефектоскопии. Современная техника и технологии: Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых – Томск: ТПУ, 2007
2. Сыщиков Р.А., Толмачев И.И. Разработка базы данных магнитных характеристик сталей для магнитной дефектоскопии. Современная техника и технологии: Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых – Томск: ТПУ, 2007

ГЛАВА 6. ИНДУКЦИОННАЯ И ФЕРРОЗОНДОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

В индукционный и феррозондовой дефектоскопии для преобразования напряженности поля рассеяния дефекта в электрический сигнал используют индукционные катушки и феррозонды. Индукционные и феррозондовые дефектоскопы применяют, в основном, для контроля протяженных изделий в виде прутков, труб непосредственно в технологическом потоке. Широко используют эти методы для контроля железнодорожных рельс, особенно уложенных в путь (без остановки движения-при помощи специальных вагонов-дефектоскопов).

6.1. Основы индукционного контроля

6.1.1. Индукционные преобразователи [1]

Индукционные преобразователи (ИП) подразделяются на пассивные, вращающиеся и вибрирующие. Пассивный ИП представляет собой каркас из изоляционного материала, на котором размещена электрическая обмотка. Для увеличения чувствительности в преобразователе применяют ферромагнитные сердечники, однако при наличии сердечников амплитудная характеристика ИП становится нелинейной.

Принцип действия пассивных ИП основан на законе электромагнитной индукции Фарадея:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6.1)$$

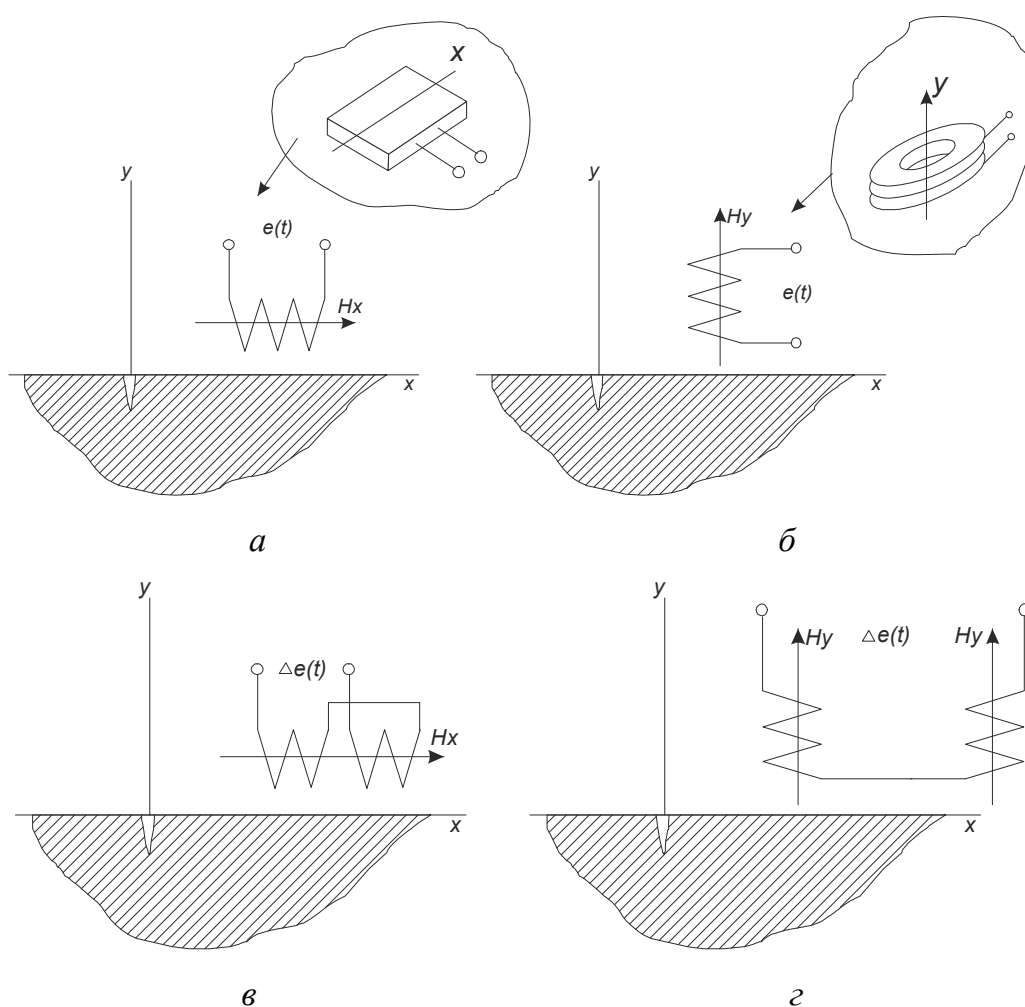
где $\psi = W\Phi$ – потокосцепление катушки преобразователя; W – число витков в катушке; Φ – магнитный поток через плоскость витка катушки. Если ИП движется со скоростью V в неоднородном магнитном поле, то ЭДС, наводимая в катушке

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} V = -W\mu_0 S \cos \theta \frac{dH_1}{dt}, \quad (6.2)$$

где S – площадь сердечника ИП или среднего витка преобразователя без сердечника, m^2 ; θ – угол между осью катушки и вектором напряженности магнитного поля; H_1 – напряженность магнитного поля в месте расположения катушки, A/m .

Встречающиеся на практике конструкции ИП и их расположение относительно объекта контроля можно свести к четырем основным вариантам (рис. 6.1). Индукционные преобразователи типа полемер могут регистрировать тангенциальную составляющую поля \mathbf{H}_x (рис. 6.1, а) или нормальную составляющую поля \mathbf{H}_y (рис. 6.1, б).

Если два полемера объединить в единую конструкцию, а их обмотки включить последовательно-встречно, то мы получим ИП, реагирующий на градиент поля – градиентометр – соответственно для градиента тангенциальной составляющей по направлению x (рис. 6.1, в) и для градиента нормальной составляющей поля по направлению y (рис. 6.1, г).



*Рис. 6.1. Конструкции и расположение индукционного преобразователя относительно изделия:
 а – для тангенциальной составляющей поля;
 б – для нормальной составляющей поля;
 в – для градиента тангенциальной составляющей в направлении x ;
 г – для градиента нормальной составляющей в направлении x*

Если ИП находится в переменном гармоническом поле $\mathbf{H}_x = \mathbf{H}_{mx} \sin \omega t$, то сигнал на выходе присутствует даже у неподвижного ИП и определяется как

$$e(t) = \mu_0 \omega \mathbf{W} \mathbf{S} \mathbf{H}_{mx} \cos \omega t, \quad (6.3)$$

Из (6.3) следует, что чувствительность полемера к магнитному полю

$$K_m = \mu_0 \omega \mathbf{W} \mathbf{S} \quad (6.4)$$

растет с ростом частоты измеряемого поля. Произведение $\mathbf{W} \mathbf{S}$ называют постоянной катушки преобразователя, которая определяется экспериментально. Выражения (6.1) и (6.2) справедливы также для полемеров, регистрирующих нормальную составляющую поля \mathbf{H}_y . Очевидно, что увеличить чувствительность ИП можно, увеличивая постоянную преобразователя $\mathbf{W} \mathbf{S}$, но это вызовет рост габаритных размеров ИП, и такой преобразователь будет давать усредненную (интегральную) оценку напряженности магнитного поля по поверхности объекта контроля, что не всегда приемлемо, особенно в задачах контроля качества, где обычно стремятся уменьшить площадь (локальность) контроля. Особенно ярко эта проблема выражена в задачах магнитной дефектоскопии, где применяются ИП с площадью сечения обмотки \mathbf{S} несколько миллиметров квадратных, т. к. этот размер должен быть сопоставим с площадью реальных дефектов.

Для ИП градиентометрического типа в постоянном магнитном поле (катушки намотаны на магнитных сердечниках) выходная ЭДС определяется как

$$e = -\mathbf{W} \mathbf{S} \mu_r \left(\cos \theta_1 \frac{d\mathbf{H}_1}{dt} - \cos \theta_2 \frac{d\mathbf{H}_2}{dt} \right), \quad (6.5)$$

где μ_r – магнитная проницаемость сердечника (проницаемость тела); θ_1 и θ_2 – углы между осью катушек и вектором напряженности измеряемого магнитного поля; \mathbf{H}_1 и \mathbf{H}_2 – напряженность магнитного поля в местах расположения катушек.

Магнитная индукционная головка представляет собой разновидность ИП (рис. 6.2). Она состоит из катушки, находящейся на кольцевом магнитопроводе с рабочим зазором. Локальный магнитный поток Φ_r носителя 1 через головку разветвляется на поток Φ_R , проходящий через кольцевой сердечник 2 и сцепляющийся с обмоткой 3 (полезный поток), и поток рассеяния Φ_s , минующий сердечник. Эффективность сердечника магнитной головки

$$E = \frac{\Phi_R}{\Phi_s} = \frac{1}{1 + \frac{I_s Q_s}{I_s Q_c \mu_c}}, \quad (6.6)$$

где l_s – средняя длина магнитных силовых линий в зазоре, имеющем площадь поперечного сечения Q_s ; l_c – средняя длина магнитных силовых линий в сердечнике головки, площадь поперечного сечения которого равна Q_c ; μ_c – средняя магнитная проницаемость сердечника головки. В качестве материалов для сердечников головок используют пермаллой или ферриты (специальные магнитные материалы с очень высокой магнитной проницаемостью). Выходной сигнал магнитной головки пропорционален градиенту поля и скорости перемещения головки относительно источника поля. Головки характеризуются не только чувствительностью, но и частотной характеристикой, при этом в частотном спектре могут быть существенно подавлены низшие гармонические составляющие сигнала.

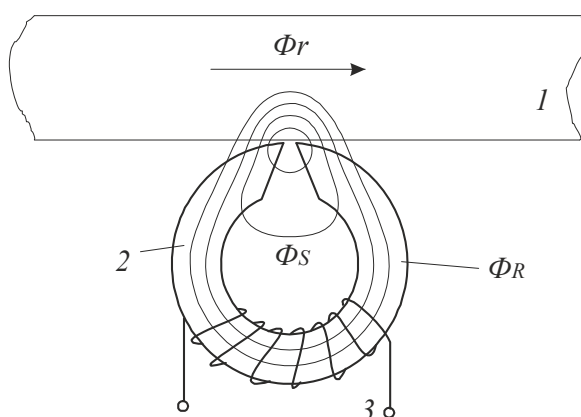


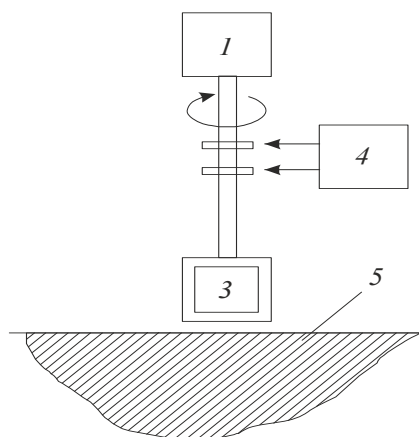
Рис. 6.2. Разветвление локального магнитного потока Φ_r в магнитной индукционной головке

Вращающийся индукционный преобразователь применяют для преобразования постоянных магнитных полей (рис. 6.3). Преобразователь состоит из собственно катушки, устанавливаемой вблизи поверхности изделия и приводимой во вращение от двигателя. Катушка устанавливается так, чтобы магнитные силовые линии поля были перпендикулярны оси вращения. При этом в катушке будет индуцироваться переменная ЭДС

$$e(t) = \omega \mu_0 W S H_m \sin \omega t, \quad (6.7)$$

пропорциональная угловой частоте вращения ω , постоянной катушки WS и максимальному значению напряженности поля H_m в плоскости вращения.

Порог чувствительности преобразователя при постоянной катушки, равной 100 витков*см² и скорости вращения 3000 об/мин, составляет около 10^{-3} А/см. Применяют такие преобразователи для измерения постоянных магнитных полей в зазорах электрических машин и аппаратов.



*Рис. 6.3. Вращающийся индукционный преобразователь:
1 – двигатель; 2 – токосъемники;
3 – катушка; 4 – индикатор; 5 – объект контроля*

Вибрирующий индукционный преобразователь. Недостаток всех рассмотренных выше ИП при контроле напряженности магнитного поля на поверхности плоского образца заключается в том, что напряженность поля быстро убывает при удалении от поверхности образца. Так, напряженность поля на расстоянии 0,5 мм от поверхности на 2...3 % меньше, чем на поверхности. Следовательно, чем больше размеры (высота) катушки, тем меньше амплитуда сигнала и больше погрешность измерения. С целью устранения этого недостатка применяют вибрирующие катушки, выходной сигнал которых пропорционален амплитуде и частоте вибрации катушки.

6.1.2. Способы намагничивания деталей в индукционном контроле

Для намагничивания изделий используют циркулярное и полюсное намагничивание. Циркулярное намагничивание применяют при контроле труб и выполняют его путем пропускания тока по проводнику, проходящему через трубу (рис. 3.12, в). При таком способе намагничивания требуются мощные источники тока, кроме того, возникают затруднения при автоматизации контроля, связанные с необходимостью продевания проводника через трубу.

С целью снижения мощности источника тока намагничивание осуществляется кратковременными импульсами – это приводит к тому, что считывание полей рассеяния производится в остаточном поле, а такое считывание дает хорошие результаты только на изделиях из магнитотвердого материала, имеющего большие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы. От недостатков, присущих рассмотренному способу намагничивания, несколько свободен способ намагничивания небольшого участка изделия (рис. 3.12, б). При этом

электроконтакты выполняются в виде прижимных роликов, катящихся по поверхности детали. Благодаря уменьшению длины намагничиваемого участка удастся снизить мощность, расходуемую намагничиваемым устройством, но она все же остается достаточно высокой.

Дальнейшее снижение мощности намагничивающего устройства достигается применением для намагничивания переменного тока. При этом в результате проявления поверхностного эффекта ток протекает только в поверхностном слое изделия, вследствие чего при неизменной величине тока происходит увеличение его плотности именно в той части изделия, в которой необходимо обнаружить дефекты. Намагничивание изделия путем пропускания по нему тока через прижимные ролики находит применение при контроле изделий с чистой поверхностью и небольшими поперечными размерами. В случае контроля горячекатаных изделий слой непроводящей окалины затрудняет пропускание тока и ухудшает тем самым условия контроля.

В современных разработках индукционных и феррозондовых дефектоскопов получил распространение способ поперечного полюсного намагничивания вращающимся электромагнитом (рис. 6.4). Намагничиваемый участок изделия имеет при этом небольшую протяженность в направлении оси и, следовательно, требует меньшую мощность для намагничивания. Индукционные или феррозондовые преобразователи (обычно два) располагаются в плоскости, перпендикулярной оси электромагнита.

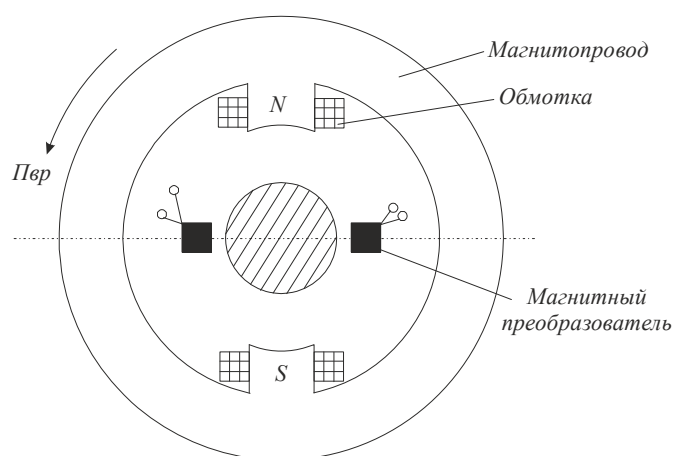


Рис. 6.4. Поперечное полюсное намагничивание вращающимся электромагнитом

Обмотка электромагнита питается постоянным или переменным током, причем последнее предпочтительнее, т. к. переменный ток в обмотку электромагнита можно подавать с помощью специального трансформатора, у которого первичная обмотка неподвижна и соединена с питающей сетью, а вторичная обмотка размещена на электро-

магните и вращается вместе с ним и с магнитными преобразователями. Такая конструкция носит название вращающийся трансформатор.

Теоретически и экспериментально доказано, что выявляемость дефектов улучшается при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями. Дополнительное постоянное поле смещает рабочую точку на кривой намагничивания, вследствие чего уменьшается влияние на выходной сигнал преобразователя магнитных неоднородностей поверхности изделия. Величина постоянного поля подбирается в каждом конкретном случае (магнитные свойства материала детали и шероховатость поверхности) из условия получения максимального отношения сигнал/шум. Один из вариантов комбинированного намагничивания показан на рис. 6.5. Круглые намагничивающие катушки 1 коаксиальны с изделием, включены согласно и создают постоянное магнитное поле, направленное по оси изделия 4. Электромагнит 2, обмотка которого питается переменным током, вращается вместе с магнитным преобразователем 3 вокруг оси изделия и создает поперечное полюсное намагничивание.

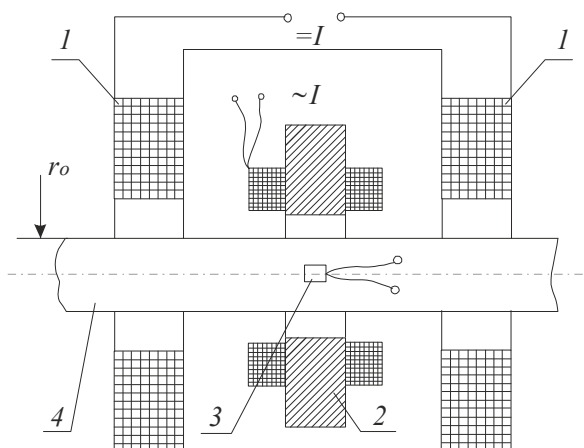


Рис. 6.5. Комбинированное намагничивание длинномерных деталей в индукционных и феррозондовых дефектоскопах

При циркулярном намагничивании протяженных изделий над их поверхностью на бездефектных участках нормальная составляющая поля отсутствует и появляется только над дефектом. По этой причине индукционный преобразователь обычно располагается над изделием таким образом, что его ось перпендикулярна поверхности изделия, и он регистрирует только нормальную составляющую поля. Анализ нормальной составляющей поля на модели дефекта и экспериментальные исследования показали, что поле дефекта в направлении поверхности детали простирается на расстояние, примерно равное ширине дефекта. В направлении нормали поле также затухает очень быстро. Следова-

тельно, преобразователь для регистрации поля рассеяния дефекта должен иметь малые размеры и находиться как можно ближе к поверхности детали. Но с уменьшением размеров преобразователя возрастают технологические трудности его изготовления, и, как следует из (6.2), уменьшается абсолютное значение ЭДС. С целью увеличения абсолютной чувствительности преобразователя при заданных его размерах применяют ферритовые сердечники, вставляемые в катушку. При этом сигнал возрастает в μ_r раз (магнитная проницаемость короткого сердечника μ_r определяется в большей мере его геометрическими размерами и в меньшей степени проницаемостью материала, из которого он сделан).

С целью повышения достоверности контроля и определения азимута дефекта (т. е. точного положения дефекта по сечению детали), в дефектоскопе может быть применен индукционный преобразователь, состоящий из нескольких катушек, объединенных в группы, подключенных каждая к своему каналу обработки информации.

В процессе поступательного движения изделия и вращательного движения преобразователя сканирование поверхности осуществляется по винтовой линии. Для проверки всей поверхности изделия необходимо, чтобы шаг сканирования не превышал диаметра катушки индукционного преобразователя – это накладывает ограничения на скорость поступательного движения изделия, тем самым ограничивая производительность контроля. Например, при диаметре катушки преобразователя 2 мм и скорости вращения 3000 об/мин, шаг сканирования не более 2 мм будет обеспечен при скорости поступательного движения изделия не более 0,1 м/с. Современные технологии проката металлов используют гораздо более высокие скорости (до десятков м/с при прокатке тонких прутков) – значит, в этом варианте контроль нельзя проводить непосредственно в технологическом процессе производства, и уж тем более не стоит замедлять ради контроля скорость производства.

Если преобразователь содержит m катушек, расположенных по периметру изделия, то скорость контроля может быть увеличена в m раз. Такой же результат достигается установкой m катушек в линию по направлению оси изделия.

Сигнал, снимаемый с индукционного преобразователя, кроме информации о дефекте содержит также информацию об изменении зазора, о наличии поверхностных неоднородностей магнитных свойств и об индустриальных помехах. С целью выделения полезной информации на фоне мешающих факторов в индукционных дефектоскопах используют следующие характерные признаки сигнала: частотный спектр; форма импульсов; периодическая повторяемость импульсов в многоэлементном преобразователе.

Если ось изделия не совпадает с осью вращения электромагнита и преобразователя, то в последнем будет наводиться переменная ЭДС с периодом, равным периоду вращения. Частотный спектр этого сигнала значительно ниже спектра сигнала от дефекта, поэтому избавиться от этого сигнала можно включением в цепь преобразования сигнала фильтра высоких частот, частота среза которого находится между спектром сигнала от дефекта (более высокие частоты) и спектром сигнала от несоосности.

При малых размерах преобразователя спектр сигналов от неоднородностей магнитных свойств поверхности изделия также ниже спектра полезного сигнала, поэтому правильным выбором нижней границы среза частотного спектра также можно значительно ослабить помехи, обусловленные этими неоднородностями. Верхняя граница полосы пропускания частотного фильтра определяется верхней границей спектра полезного сигнала.

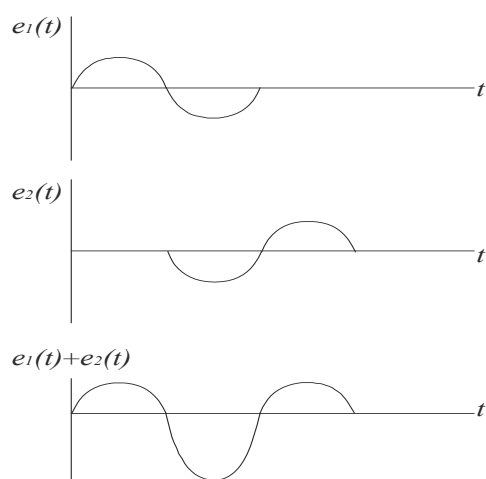


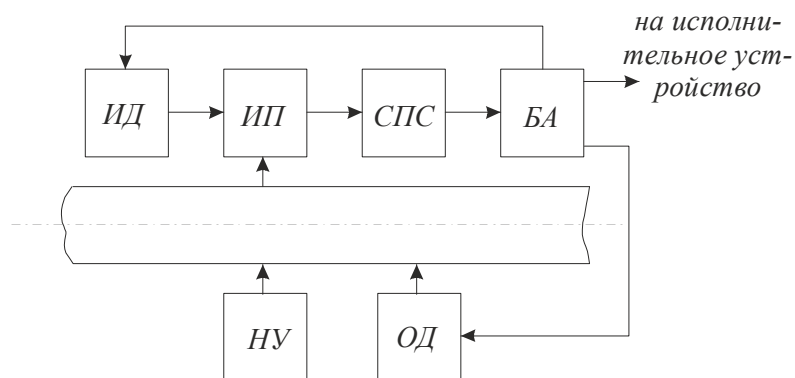
Рис. 6.6. Формирование сигнала в двухкатушечном индукционном преобразователе

В индукционном преобразователе дефектом генерируются импульсы S-образной формы. Это свойство полезного сигнала может быть использовано для повышения отношения сигнал/шум примерно в два раза, что достигается применением двух встречно включенных преобразователей, смещенных относительно друг друга в направлении сканирования. Импульсы ЭДС, наводимые в первой катушке $e_1(t)$ и второй катушке $e_2(t)$, сдвинуты во времени (рис. 6.6). Расстояние между катушками подобрано таким образом, что отрицательные части импульсов первой и второй катушек складываются, в результате на выходе встречно включенных катушек формируется сложный импульс, отрицательная часть которого по амплитуде вдвое больше положи-

тельной. Кроме этого, у сигналов такого типа есть еще один характерный признак – чередование максимумов и минимума, характерное только для сигналов от дефекта, что также может быть положено в основу алгоритма распознавания сигнала от дефекта на фоне помех.

Рассмотренное суммирование выполняется не для всех сигналов. В частности, оно не будет выполняться для сигналов, обусловленных быстрыми изменениями зазора при радиальных биениях движущегося объекта контроля. Применение двухкатушечного преобразователя в дополнение к частотной селекции сигнала позволяет улучшить в ряде случаев отношение сигнал/шум примерно вдвое. В многоэлементных индукционных преобразователях с расположением катушек по периметру изделия сигналы от дефектов появляются в катушках через равные промежутки времени. Это свойство может быть использовано для повышения помехозащищенности – для этого используется как минимум два преобразователя, причем сигнал со второго преобразователя (по ходу сканирования поверхности детали) задерживается линией задержки на время, равное повороту ротора намагничивающего устройства от первого преобразователя ко второму. Затем оба сигнала поступают на компаратор и в случае совпадения сигналов (прямого и задержанного) сигнал с выхода компаратора регистрируется как дефект. Все прочие сигналы будут воздействовать на преобразователи одновременно, а на входы компаратора, напротив, будут поступать в разные моменты времени, что не вызовет его срабатывания. Линия задержки в данном случае может быть аналоговой либо цифровой.

Обобщенная структурная схема индукционного дефектоскопа показана на рис. 6.7. Электрический сигнал с индукционного преобразователя ИП поступает на схему преобразования сигналов СПС, где он усиливается, очищается от помех, нормализуется и передается для использования на блок автоматики БА. Блок автоматики при появлении сигнала от дефекта подает команду на отметчик дефектов ОД (который обычно отмечает дефектные участки краской) и на исполнительное устройство, которое направляет годные и бракованные детали по разным путям технологического процесса. Так как изделия имеют конечную длину, то между контролем двух изделий имеется межконтрольная пауза. Во время паузы имитатор дефектов ИД оказывает на индукционный преобразователь определенное воздействие, от которого на выходе исправного ИП появляется сигнал, подобный сигналу от дефекта. Этот сигнал анализируется в блоке автоматики и в случае его отклонения от нормы вырабатывается другой сигнал, указывающий на неисправность дефектоскопа. Таким образом осуществляется самоконтроль исправной работы прибора.



*Рис. 6.7. Обобщенная структурная схема индукционного дефектоскопа.
 ИИП – индукционный преобразователь; НУ – намагничивающее устройство;
 ИД – имитатор дефектов; СПС – схема преобразования сигнала;
 БА – блок автоматики; ОД – отметчик дефектов*

Современные индукционные дефектоскопы выпускаются во многих промышленно развитых странах мира, предназначены в основном для контроля труб в процессе производства и устанавливаются на выходе прокатного стана либо на отдельно стоящем участке контроля. Дефектоскопы предназначены для выявления дефектов на наружной поверхности трубы (порог чувствительности составляет 0,2 мм по глубине дефекта для труб с хорошим состоянием поверхности), возможно также выявление дефектов на внутренней стенке трубы (при толщине стенки до 8 мм) – при этом порог чувствительности составляет 10 % от толщины стенки. В более ранних моделях использовалось циркулярное намагничивание трубы путем пропускания тока по стержню, продетому через трубу. В поздних разработках предпочтение стали отдавать комбинированному способу намагничивания (рис. 6.5). Скорость контроля таких дефектоскопов зависит от минимальной длины выявляемого дефекта и от количества индукционных преобразователей, включенных в группу – известные модели приборов охватывают диапазон от 0,2 до 2 м/с.

6.2. Основы феррозондового контроля

6.2.1. Конструкция феррозондового преобразователя

Принцип действия феррозондовых преобразователей (ФП) основан на том, что при одновременном действии на ферромагнитный сердечник постоянного и переменного магнитных полей, направленных по оси сердечника, его перемагничивание будет происходить по несимметричной частной петле гистерезиса. При этом в индукции магнитного поля сердечника изменится соотношение между нечетными гармониками и появятся четные гармоники. Принцип работы и условное

обозначение ФП – полемера показаны на рис. 6.8. На двух сердечниках K1 и K2, изготовленных из материала с высокой магнитной проницаемостью имеется по одной возбуждающей и одной измерительной обмотке. Возбуждающие обмотки включены последовательно-встречно и подключены к внешнему генератору синусоидального напряжения. При этом в сердечниках K1 и K2 наводится переменное магнитное поле. При нарастании мгновенной напряженности поля в течение одного периода в сердечнике K1 появляется положительное намагничивание и соответственно положительная магнитная индукция. Поскольку первичные обмотки включены навстречу друг другу, в сердечнике K2 в это же время возникает отрицательное намагничивание и, следовательно, отрицательная индукция.

На рис. 6.8 также показаны петли гистерезиса $B_1(H)$ и $B_2(H)$ для сердечников K1 и K2, причем для большей наглядности представлен случай отсутствия гистерезиса, т. к. на практике для изготовления ФП применяют очень магнитомягкие материалы, гистерезисом которых можно пренебречь. Если магнитные свойства сердечников одинаковы, то сумма индукций B_1 и B_2 при любом мгновенном значении напряженности поля равна нулю. Если на переменное магнитное поле в обоих сердечниках будет наложено постоянное магнитное поле H_0 того же направления, то индукция в сердечнике K1 увеличится, а в сердечнике K2 ослабится, т. е. в сердечнике K1 при прохождении переменного поля через ноль еще останется индукция B_0 , вызванная наложенным постоянным магнитным полем, которая обратится в ноль только тогда, когда мгновенная напряженность переменного магнитного поля будет противоположно направлена и равна напряженности постоянного магнитного поля. Это произойдет в точке A, при этом кривая $B_1(H)$ будет смещена параллельно оси напряженностей и перейдет в кривую, показанную пунктирной кривой.

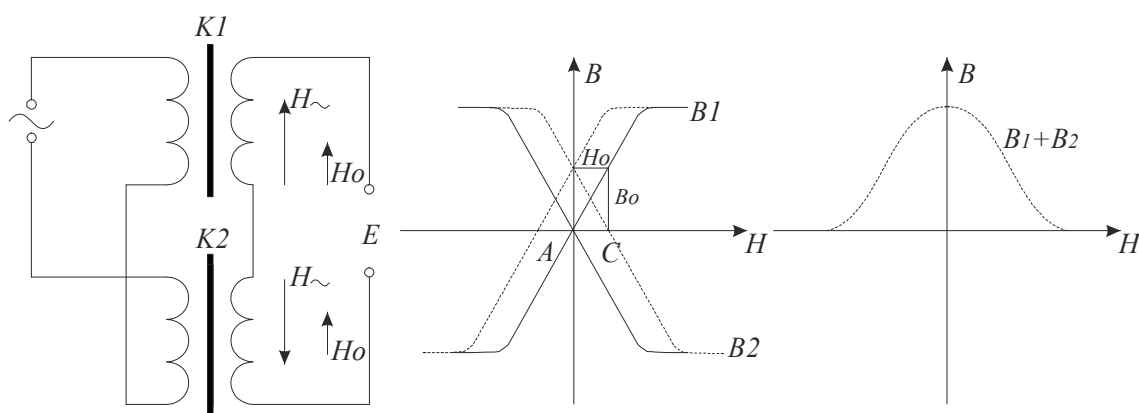


Рис. 6.8. Принцип работы феррозонда-полемера

В сердечнике К2 при прохождении переменного магнитного поля через ноль тоже будет индукция \mathbf{V}_0 , однако через ноль эта индукция пройдет в тот момент, когда мгновенное значение индукции $\mathbf{V}_2(\mathbf{H})$ достигнет величины \mathbf{V}_0 и будет противоположно ей по направлению – в точке С. Таким образом, кривая $\mathbf{V}_2(\mathbf{H})$ сместится параллельно оси напряженностей в точку С. Если теперь сложить полученные при наложении постоянного поля пунктирные кривые индукции $\mathbf{V}_1(\mathbf{H})$ и $\mathbf{V}_2(\mathbf{H})$ для каждого мгновенного значения напряженности поля, то получится результирующая индукция $(\mathbf{V}_1+\mathbf{V}_2)$, вид зависимости для которой приведен на рис. 6.8. Величина результирующей индукции пропорциональна измеряемому наложенному постоянному полю, так что этот способ может быть использован для измерения абсолютных значений магнитных полей (в том числе и очень малых полей). При отсутствии внешнего магнитного поля \mathbf{H}_0 перемагничивание сердечников феррозонда идет по симметричным петлям гистерезиса, поэтому сигнал на выходе измерительных обмоток равен нулю. При воздействии на сердечники постоянного магнитного поля в спектре сигнала измерительных обмоток появляются четные гармонические составляющие. Наибольшую амплитуду имеет вторая гармоника, амплитуды гармоник с более высокими номерами (четвертая, шестая и т. д.) быстро убывают и вносят незначительный вклад в общий сигнал. Поскольку практически невозможно получить две идеально симметричные половины феррозонда, то в его выходном сигнале всегда будет присутствовать ЭДС основной частоты (которую задает внешний генератор, подключенный к возбуждающим обмоткам ФП). Эта ЭДС может быть сопоставима по амплитуде с полезным сигналом второй гармоники, поэтому для подавления сигнала первой гармоники в измерительных схемах, подключаемых к ФП, как правило, применяется избирательный усилитель, настроенный на частоту второй гармоники.

На ФП оказывает действие только та составляющая постоянного поля, которая совпадает по направлению с сердечниками катушек, следовательно, можно определить измеряемое поле по величине и направлению, вращая ФП до тех пор, пока на показывающем приборе не появится наибольшее показание, т. е. пока зонд не покажет направление поля. Если значение постоянного измеряемого поля такого же порядка что и земное магнитное поле, то земное поле необходимо каким-либо способом подавить (компенсировать). С подобной проблемой часто сталкиваются при измерении магнитного поля рассеяния дефекта, т. к. у дефектов малых размеров поле рассеяния невелико. Поэтому в магнитной дефектоскопии, как правило, используют феррозонды-градиентометры, которые измеряют разность напряженности магнит-

ного поля в двух соседних точках. Конструктивно ФП-градиентометры отличаются от ФП-полемера лишь способом соединения обмоток (возбуждающие обмотки включены последовательно-согласно а измерительные – последовательно – встречно).

Частота возбуждающего тока, которым питают возбуждающие обмотки, зависит от величины и скорости изменения измеряемого поля и может находиться в диапазоне от 50 Гц до сотен кГц. ФП, предназначенные для измерения напряженности поля, работают на частотах возбуждающего тока 1...10 кГц, а феррозонды дефектоскопов – на частотах 10...300 кГц. ФП обладают высокой чувствительностью к магнитному полю – они позволяют получить порог чувствительности измерительных устройств-магнитометров 10^{-6} А/см. ФП можно использовать и для измерения переменного магнитного поля – для этого нужно обеспечить частоту возбуждающего поля минимум на порядок выше частоты измеряемого поля.

6.2.2. Формирование и преобразование сигнала в феррозондовых дефектоскопах

В феррозондовых дефектоскопах применяют полемерные и градиентометрические феррозонды. Контроль проводят в приложенном или остаточном поле. В любом случае одним из основных мешающих факторов, ограничивающих порог чувствительности, является неоднородность магнитных свойств поверхности материала объекта контроля, вызываемая неоднородностью структуры материала изделия и явлением так называемого локального наклепа. Локальный наклеп – это небольшие по размеру области поверхности изделия (несколько миллиметров квадратных, т. е. сравнимы с размером дефекта), в которых металл уплотнен и, следовательно, обладает более высокой прочностью и твердостью. Локальный наклеп может быть применен сознательно для упрочнения поверхности металла либо может быть вызван случайными ударами о поверхность детали – например, при нарушении технологии изготовления. Локальный наклеп изделий, особенно из малоуглеродистых и легированных сталей, приводит к появлению резких неоднородностей магнитных свойств, создающих при остаточной намагниченности поля рассеяния, близкие по величине и топографии к полям рассеяния от дефектов. В качестве примера на рис. 6.9 показаны основные кривые намагничивания для отожженных и для прошедших правку труб из стали 10. Как известно, операция отжига снимает в сталях внутренние напряжения, в том числе и связанные с наклепом. Процедура же правки труб осуществляется чисто механическим способом за счет прокатки труб между валками и оставляет на поверхности

труб значительный наклеп. На рис. 6.9 видно, что отличие магнитных свойств для этих двух случаев наблюдается в основном в области слабых и средних магнитных полей. Следовательно, для снижения уровня сигналов от локальных наклепов контроль изделий необходимо проводить в сильных магнитных полях, т. е. в приложенном магнитном поле.

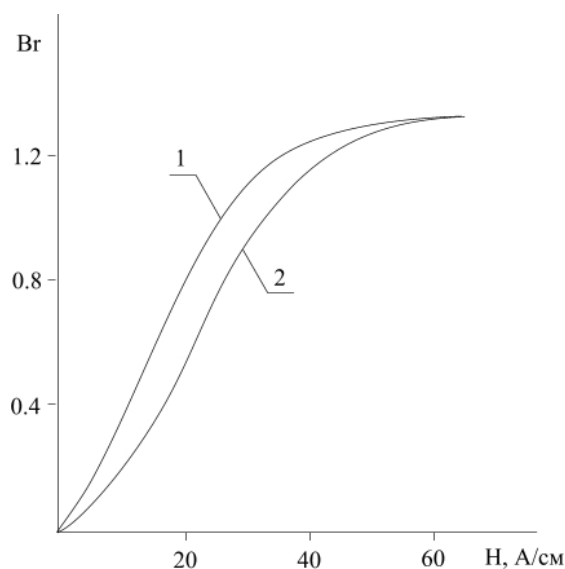


Рис. 6.9. Основные кривые намагничивания для труб из стали 10:
1 – отожженные трубы; 2 – трубы, прошедшие правку

Контроль в приложенном поле приводит к тому, что на феррозонд действует не только поле дефекта, но и само намагничивающее поле. В результате действия намагничивающего поля на выходе феррозонда создается сильный фон, снижающий в целом чувствительность дефектоскопа. С целью снижения помех от намагничивающего поля в феррозондовых дефектоскопах применяют различные системы ориентации и стабилизации положения феррозонда относительно изделия. Чаще всего это механические конструкции в виде роликов или износостойчивых прокладок, помещаемых между феррозондом и изделием.

Контроль в приложенном поле в современных автоматизированных феррозондовых дефектоскопах часто реализуется при поперечном намагничивании протяженного контролируемого изделия вращающимися электромагнитами (рис. 6.4).

Поле рассеяния дефекта локализовано в малом объеме над поверхностью изделия, поэтому феррозондовые преобразователи в дефектоскопах должны иметь малые размеры. Наибольшее распространение получила конструкция феррозонда из двух одинаковых полузондов, каждый из которых представляет пермаллоевый сердечник с двумя катушками (сердечники могут быть диаметром 0,1...0,3 мм,

длиной 2...3 мм и располагаться на расстоянии 1...2 мм). Одна из катушек служит для возбуждения в сердечнике переменного магнитного потока, а вторая для измерения ЭДС. Если сердечник находится только в магнитном поле катушки возбуждения, то ЭДС второй катушки содержит составляющие нечетных гармоник и, в частности, первой гармоники, определяемой частотой тока, питающего катушку возбуждения. При введении феррозонда в исследуемое магнитное поле меняется ЭДС измерительной катушки и в ее составе появятся гармоники (в частности, вторая), величина которых обуславливается величиной поля. При использовании преобразователей для дефектоскопии соединение обмоток возбуждения двух параллельно устанавливаемых полузондов производится по так называемой градиентометрической схеме для того, чтобы направление магнитных потоков в обоих сердечниках было одинаковым. Соединение измерительных катушек полузондов осуществляется так, чтобы при отсутствии измеряемого поля выходное напряжение было равно нулю. Феррозондовый дефектоскоп обычно состоит из высокочастотного генератора (в дефектоскопии используется частотный диапазон 100...300 кГц), феррозонда с устройством бесконтактного трансформаторного токосъема, усилителя, детектора и измерительного прибора. Применение амплитудно-фазового детектирования позволяет получить сигнал о дефекте с большей достоверностью при наличии мешающего фактора.

Наиболее существенными мешающими факторами при феррозондовой дефектоскопии являются пространственные неоднородности магнитных свойств изделия, изменение взаимного положения преобразователя и изделия, промышленные помехи, шумы и помехи электронных схем. Все способы повышения помехозащищенности феррозондовых дефектоскопов по месту их реализации можно разделить на три группы: конструктивные (реализуются конструкцией преобразователя и намагничивающего устройства); схемные (реализуются в схеме обработки сигнала преобразователя); логические (реализуются вычислительной машиной или оператором, если выходная информация представляется в форме видимого изображения).

К конструктивным способам и приемам повышения селективности феррозондовых дефектоскопов следует отнести применение градиентометрических феррозондов, установку их в месте, максимально удаленном от намагничивающих полюсов, регистрацию по нормальной составляющей поля дефекта, ориентация осей сердечников феррозонда по радиусу изделия и стабилизация зазора между феррозондом и поверхностью изделия. В феррозондовых дефектоскопах для повышения селективности можно использовать также приемы, применяемые в ин-

дукционных дефектоскопах и основанные на характерной форме сигналов от дефектов и их повторяемости.

Современные феррозондовые дефектоскопы позволяют выявлять дефекты на изделиях простой формы – листы, прутки, трубы. Минимальная глубина надежно обнаруживаемых дефектов на наружной поверхности составляет 0,15...0,2 мм, на внутренней поверхности труб – 10 % от толщины стенки трубы (контролируются толщины в диапазоне 2...8 мм). Следовательно, по основным техническим характеристикам феррозондовые дефектоскопы подобны индукционным дефектоскопам, но высокая чувствительность феррозондовых преобразователей в дефектоскопах может быть реализована только при контроле малошумящих изделий с чистой поверхностью и при хорошей стабилизации взаимного положения преобразователя и изделия.

Список литературы к главе 6

1. Жуков В.К. Электромагнитная и магнитная дефектоскопия: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПИ, 1983. – 95 с.

ГЛАВА 7. МАГНИТОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Принцип магнитографического контроля состоит в записи поля рассеяния дефекта на магнитную ленту, плотно прижатую к поверхности объекта контроля и последующего считывания сигнала с магнитной ленты (рис. 7.1). Намагничивание поверхности объекта контроля и ленты осуществляется подвижным электромагнитом 1, который перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Поле рассеяния дефекта 2 фиксируется на эластичной магнитной ленте 3, плотно прижатой к поверхности детали магнитным слоем. После окончания намагничивания лента снимается с поверхности детали и запись с ленты воспроизводится на магнитографическом дефектоскопе.

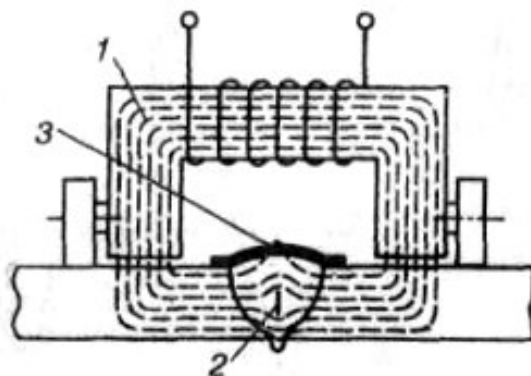


Рис. 7.1. Магнитная запись дефектов на ленту:

1 – подвижный электромагнит, 2 – дефект шва, 3 – магнитная лента

Согласно ГОСТ 25225-82 магнитографический контроль предназначен для выявления в стыковых швах трубопроводов из низко- среднелегированных углеродистых ферромагнитных сталей наружных и внутренних трещин, непроваров, цепочек шлаковых включений и пор, ориентированных преимущественно вдоль шва, а также других инородных включений, резко отличающихся по магнитным свойствам от основного металла шва.

Процесс контроля состоит из следующих этапов:

1. Подготовка поверхности (очистка от загрязнений).
2. Намагничивание изделия вместе с лентой.
3. Воспроизведение записи.
4. Разбраковка по результатам воспроизведения.

Для проведения магнитографического контроля сварных стыковых соединений должны применяться следующие средства:

- магнитная лента;
- намагничивающее устройство;

- магнитографический дефектоскоп (прибор для воспроизведения магнитограмм);
- источник постоянного тока для питания электромагнита намагничивающего устройства;
- вспомогательные устройства для прижатия магнитной ленты к поверхности контролируемого сварного шва;
- испытательный образец (образец предприятия) для изготовления контрольной магнитограммы;
- контрольная магнитограмма для настройки чувствительности дефектоскопа;
- приборы и принадлежности для проверки исправности дефектоскопов и намагничивающих устройств.

Магнитная лента в магнитографическом контроле играет двойную роль: сначала служит индикатором поля дефекта, фиксируя поле рассеяния дефекта в виде пространственного распределения намагниченности рабочего слоя ленты, а затем сама лента становится источником вторичного, отображенного магнитного поля, которое, в свою очередь, считывается с магнитной ленты с помощью магнитных головок. Магнитографический метод нашел наиболее широкое применение для контроля стыковых сварных соединений ферромагнитных сталей. Намагничивание изделия и ленты производят с помощью электромагнитов, режущим током по детали. Отличия магнитографического контроля от других методов магнитной дефектоскопии заключаются в следующем:

1. Ферромагнитные частицы на магнитной ленте не могут перемещаться, а под воздействием имеющихся на данном участке полей рассеяния изменяют только свою полярность и намагниченность. Благодаря этому магнитографический контроль обладает большей эффективностью при обнаружении подповерхностных дефектов по сравнению с магнитопорошковым контролем, что особенно важно при контроле сварных швов.
2. На магнитной ленте с определенной степенью точности фиксируются размеры отпечатков полей рассеяния от дефектов и их топография, что дает возможность при считывании записи осуществлять количественную и качественную оценку дефектов в сварных швах.
3. Магнитная лента может быть использована как объективный документ, сохраняющий данные о качестве сварного соединения ответственного назначения.

При записи поля дефекта магнитная лента перемагничивается по кривой начального намагничивания (рис. 7.2).

Наружное поле H_0 (создаваемое внешним намагничивающим устройством в объекте контроля и в прижатой к нему ленте) намагничивает ленту

до соответствующей точки основной кривой намагничивания. После снятия поля \mathbf{H}_0 лента имеет остаточную индукцию \mathbf{Br}_0 . Поле дефекта \mathbf{H}_g намагничивает соответствующий участок ленты до точки, лежащей на кривой намагничивания выше и после снятия внешнего поля создает остаточную индукцию \mathbf{Br}_g . В результате на прилегающем к дефекту участке остаточная индукция выше индукции \mathbf{Br}_0 на величину $\Delta\mathbf{Br}=(\mathbf{Br}_g-\mathbf{Br}_0)$. Недостатком такого способа намагничивания является то, что поскольку вся лента намагничена до уровня \mathbf{Br}_0 , что соответствует бездефектным участкам шва, то для выявления дефекта используется приблизительно половина динамического диапазона ленты по остаточной намагниченности.

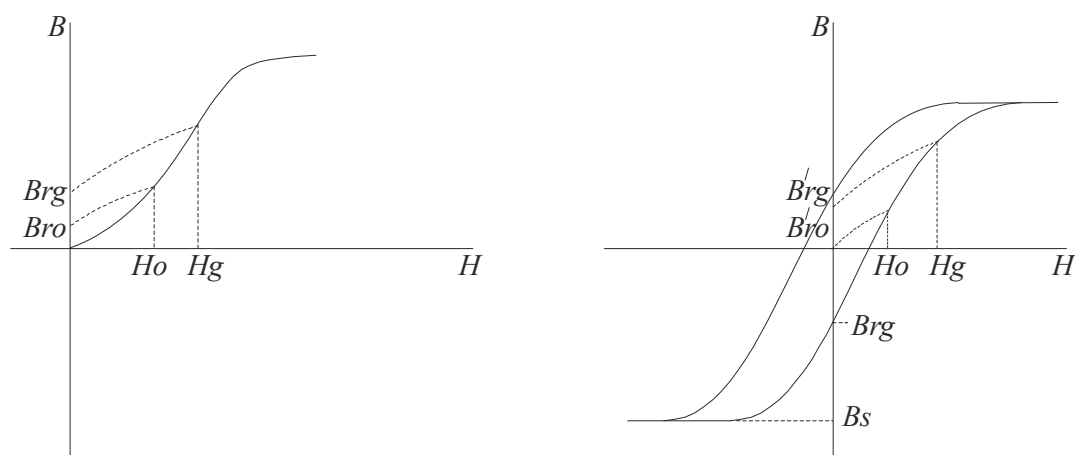


Рис. 7.2. К объяснению принципа записи поля дефекта на обычную или поляризованную ленту

Для повышения уровня сигнала от дефекта используется предварительное подмагничивание магнитной ленты [1]. С этой целью перед записью магнитную ленту предварительно намагничивают однородным постоянным полем \mathbf{H}_s (поля \mathbf{H}_s и \mathbf{H}_0 имеют противоположный знак) до индукции насыщения – \mathbf{B}_s . Для этого ленту достаточно протянуть между полюсами электромагнита. В результате лента приобретает остаточную индукцию – \mathbf{Br}_{max} . Далее ленту укладывают на поверхность контролируемого изделия и включают намагничивающее поле \mathbf{H}_0 . Под действием поля \mathbf{H}_0 магнитная лента перемагничивается в соответствующую точку на предельной петле гистерезиса. В связи с тем, что напряженность намагничивающего поля \mathbf{H}_0 над сварным швом выбирается соизмеримой с коэрцитивной силой \mathbf{H}_c магнитной ленты, после снятия поля \mathbf{H}_0 остаточная индукция ленты близка к нулю. Если на фоне поля \mathbf{H}_0 над швом возникает поле дефекта \mathbf{H}_g , то оно намагничивает прилегающий участок ленты до точки, лежащей выше на кривой намагничивания ленты, в результате чего лента приобретает остаточную индукцию $\Delta\mathbf{B}_{r2}=(\mathbf{B}'_{rg}-\mathbf{B}'_{r0})\approx\mathbf{B}'_{rg}$, и нетрудно видеть что приращение

индукции, обусловленное дефектом, во втором случае приблизительно в два раза больше, т. е. контрастность записи увеличилась в 2 раза.

Однако при контроле поверхностных дефектов с малым раскрытием способность ленты записать поле рассеяния реализуется слабо из-за относительно больших размеров ферромагнитных частиц, образующих чувствительный слой ленты и из-за ограниченного частотного диапазона считывающих магнитных головок. При обнаружении глубинных дефектов магнитное поле на поверхности менее локализовано и высокая чувствительность ленты реализуется в полной мере.

В табл. 7.1 приведены характеристики магнитных лент [2], применяемых в магнитографическом контроле.

Таблица 7.1

Тип ленты	Основа		Магнитный слой		
	Материал	Толщина, мкм	Толщина, мкм	Коэрцитивная сила, А/см	Остаточная индукция, Тл
МК2	Лавсан	25...30	20	80	0,05
6	Триацетат-целлюлоза	40	16	≥ 175	$\geq 0,1$
ТЛЦ2	Лавсан	25	12	265	0,09
А	Лавсан	25	12	320	0,1
Б	Лавсан	21	6	370	0,12

Для магнитографического контроля сварных стыковых соединений из обычных магнитомягких сталей перлитного, бейнитного и мартенсито-ферритного классов с коэрцитивной силой до 10 А/см следует применять магнитную ленту И4701 (ТУ6-17-632-74) с коэрцитивной силой 90...100 А/см, шириной 35, 50 и 70 мм в соответствии с ТУ 6-17-632-74. Ширина применяемой для магнитографического контроля магнитной ленты должна быть больше ширины валика усиления контролируемых сварных швов не менее чем на 10 мм. Применяемая магнитная лента не должна иметь надрывов, проколов, местных отслаиваний магнитного слоя, неразглаживающихся морщин и других механических повреждений.

Для магнитографического контроля сварных соединений могут применяться намагничивающие устройства, состоящие из П-образного электромагнита и условно подразделяемые на две группы:

- подвижные устройства, позволяющие намагничивать стыковые соединения в процессе непрерывного или шагового перемещения по периметру трубы вдоль сварного шва;

- неподвижные устройства, позволяющие намагничивать одновременно весь периметр стыкового шва или его значительную часть с одной установки.

В каждом конкретном случае при магнитографическом контроле должен использоваться такой типоразмер намагничивающего устройства, область применения которого в соответствии с технической документацией (паспортом и инструкцией по эксплуатации) распространяется на контроль стыковых швов плоскостных и криволинейных (радиусных) поверхностей сварных соединений металлоконструкций.

Для магнитографического контроля применяются дефектоскопы МДУ-2У, МД-11Г и УВ-30Г с индикацией сигналов воспроизведения магнитограмм сварных стыков на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), а также дефектоскопы МД-20Г и МД-40Г, с многоканальной регистрацией результатов воспроизведения на электрохимической бумажной ленте.

В дефектоскопе должно обеспечиваться одновременное синхронизированное воспроизведение на экране ЭЛТ или на носителе записи регистратора полутонового изображения магнитных отпечатков полей дефектов в плане в виде яркостной индикации, а также амплитуды и формы сигналов от них в виде импульсной индикации или диаграммы максимальных значений сигналов от дефектов вдоль сварного шва.

Экран ЭЛТ дефектоскопа, предназначенный для яркостной (видео-) индикации, имеет длительное послесвечение (не менее 15 с), позволяющее анализировать изображение магнитограммы участка сварного шва, полученное после одноразового заполнения (развертки) кадра.

Экран ЭЛТ для импульсной индикации, а также соответствующий канал регистратора для записи максимальных значений сигналов от дефектов должны быть снабжены шкалой, цена делений которой устанавливается в относительных единицах (%) при настройке чувствительности дефектоскопа по контрольной магнитограмме. В дефектоскопах с разверткой диаграммы максимальных или других значений сигналов, характеризующих изменение величины (глубины) дефектов вдоль сварного шва, должна быть предусмотрена возможность мерной регулировки ширины зоны поперечного воспроизведения магнитограммы на экране ЭЛТ или на носителе записи регистратора для устранения сигналов от краев валика усиления шва.

При магнитографическом контроле необходимо применять прижимное устройство, например эластичный (резиновый) пояс, обеспечивающий плотное прилегание магнитной ленты к поверхности контролируемого сварного шва и неподвижную фиксацию этой ленты на кольцевом шве во время его намагничивания по всему периметру.

Длина прижимного пояса должна быть рассчитана на определенный диаметр трубы так, чтобы он охватывал периметр сварного стыка в натяг. К концам прижимного пояса должны быть прикреплены соединительные элементы (замки) из немагнитного материала.

Контрольные образцы стыковых сварных швов должны быть изготовлены для каждого типоразмера металлоконструкций и труб, толщины стенки и марки стали и сварены тем же методом и по той же технологии (сварочные материалы, режим сварки), что и подлежащие контролю магнитографическим методом стыковые швы.

Если на объекте строительства трубопровода применяются трубы различной поставки, но из сталей с одинаковыми или близкими структурами, химическими составами и магнитными свойствами, то допускается изготовление одного общего контрольного образца из этих сталей с одинаковой толщиной стенки.

В качестве контрольного образца может служить обечайка или ее часть длиной не менее $1/3$ окружности, сваренная из двух колец трубы того же диаметра и той же толщины стенки, что и контролируемый трубопровод. Ширину свариваемых колец трубы следует выбирать не менее чем по 0,5...0,6 м. Сварка стыкового шва контрольного образца должна производиться таким образом, чтобы поверхность шва имела в некоторых участках сварного стыка внутренние дефекты (непровар или цепочка шлаковых включений преимущественно в корне шва) протяженностью не менее 40...50 мм и величиной, соответствующей минимальному браковочному уровню, например 10 % толщины стенки трубы.

Допускается использование сварных контрольных образцов с искусственными дефектами в виде канавок шириной 2...2,5 мм и длиной не менее 50 мм, фрезерованных по середине стыкового шва со стороны его корня. При наличии подварки корня шва внутренний валик усиления в местах фрезеровки должен быть предварительно удален.

Глубина искусственных дефектов выбирается равной минимальному браковочному уровню для заданной толщины стенки соединения в соответствии с требованиями нормативных документов.

После сварки стыковые швы контрольных образцов должны быть подвергнуты радиографическому контролю. По полученным снимкам определяют вид, величину и место расположения дефектов в контрольных образцах. На поверхности контрольного образца должны быть отмечены краской месторасположение и границы дефектных участков с указанием вида и величины контрольных дефектов. Кроме того, должны быть отмечены границы радиографических снимков с указанием их индексов.

Современные магнитографические дефектоскопы позволяют обнаруживать дефекты на глубине 20...25 мм с размерами, составляющими 10...15 % от толщины изделия. В комплект магнитографического дефектоскопа входит контрольный образец с несколькими внутренними дефектами известного размера (или объема), находящимися на разной глубине – например, это могут быть три дефекта объемом 2 мм^3 , расположенные на глубине 5, 10 и 15 мм. Для проверки работоспособности дефектоскопа производится запись магнитограммы на контрольном образце и затем считывание магнитограммы и сравнение полученного результата с контрольным.

Чувствительность магнитографических дефектоскопов к поверхностным дефектам такого же порядка, как и магнитопорошкового, а к глубинным выше. Это объясняется тем, что минимальная напряженность магнитного поля, обнаруживаемого магнитными лентами МК-1 и МК-2 – 40 А/м, а магнитным порошком – 160 А/м.

Список литературы к главе 7

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. В 2-х книгах. Кн. 2 / под ред. В.В. Клюева. – 2 изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
2. Неразрушающий контроль: справочник: В 8 т / под общ редакцией В.В. Клюева. Т6: В 3 кн. Кн1. В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля. – 2 изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 848 с.

ГЛАВА 8. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

8.1. Общие положения

Магнитные методы достаточно широко применяются для измерения геометрических размеров в машиностроении. Можно привести пример точного измерения наружного диаметра железнодорожных подшипников, в основе которого лежит применение индукционных преобразователей, включенных по схеме индуктивного моста. При работе на потенциально опасных объектах наиболее часто приходится сталкиваться с задачами толщинометрии. Задачи толщинометрии можно разделить на две группы. **Первая группа** – измерение толщины металлических изделий непосредственно во время эксплуатации либо во время ремонта. Измеряемые материалы – сталь, чугун, сплавы цветных металлов. Как правило, происходит уменьшение толщины всей детали или ее фрагментов вследствие механического износа или процессов коррозии. При эксплуатации трубопроводов эти процессы могут происходить как с наружной, так и с внутренней поверхностью металла (особенно при транспортировке агрессивных сред). При диагностике подобных объектов необходимо установить соответствие размеров детали (например, толщины стенки трубопровода) требованиям нормативной документации и возможность дальнейшей эксплуатации объекта при номинальных условиях или эксплуатацию при сниженных параметрах грузоподъемности, давления, температуры и скорости рабочей среды и т. д. В настоящее время эту группу задач успешно решают при помощи ультразвуковых толщиномеров. Ультразвуковые толщиномеры выпускаются в большом ассортименте во всех развитых странах, обладают высокой точностью измерения, широким диапазоном измерения, портативны, могут быть откалиброваны для работы по любым металлам. У этих приборов есть только два недостатка – необходимость хорошего механического контакта между пьезопреобразователем и поверхностью металла (в качестве контактной жидкости применяют воду или масло) и невозможность измерять толщины менее 1 мм. Второй недостаток не является принципиальным, а первый необходимо учитывать и зачищать контролируемую поверхность от грязи, краски или пленочных защитных покрытий. Несмотря на указанные недостатки ультразвуковые толщиномеры получили широкое распространение на практике.

Магнитные толщиномеры для измерения толщины ферромагнитных материалов получили значительно меньшее распространение, т. к. в этом случае для точного измерения толщины необходимо отстраиваться от влияния электропроводности и магнитной проницаемости материала. На практике такие приборы иногда применяют для выходного контроля толщины при производстве жести до 2 мм, т. к. в этом случае магнитная толщинометрия обеспечивает бесконтактный контроль при высокой скорости движения металла.

Вторая группа задач магнитной толщинометрии – измерение толщины защитных покрытий стали. Защитные покрытия стали носят антикоррозионный характер, иногда одновременно выполняя декоративные функции. Защитные антикоррозионные покрытия по их типу и диапазону толщин можно условно разделить на три вида. Первый вид – покрытия цветными металлами, например, цинком. Толщина защитного слоя составляет около 30 микрон. Второй вид – лакокрасочные покрытия. В зависимости от технологии окраски и количества слоев грунтовки и краски толщина защитного покрытия может достигать до 1 мм. Третий вид антикоррозионного покрытия – многослойные ленточные покрытия, гудроны и эпоксидные компаунды, толщина которых может достигать до 10 мм. Для измерения толщины перечисленных защитных покрытий ультразвуковые толщиномеры принципиально не применимы, т. к. ультразвуковые волны в лакокрасочных покрытиях и гудронах не распространяются. В то же время магнитные толщиномеры оптимально подходят для решения этой задачи, т. к. в этом случае фактически измеряется расстояние от торца магнитного преобразователя до поверхности стали. При работе в постоянных магнитных полях или на низкочастотных переменных полях (до нескольких килогерц) практически все равно, чем заполнен этот промежуток – диэлектрическим материалом или немагнитным металлом. Поэтому, в настоящее время, большинство серийно выпускаемых магнитных толщиномеров относятся к толщиномерам покрытий и предназначены для измерения толщин покрытий.

Известные технические решения магнитных толщиномеров покрытий отличаются лишь способами регистрации напряженности и индукции поля в точках пространства, окружающих источник магнитного поля. В зависимости от способа регистрации различают три группы толщиномеров покрытий [1].

1. Пондеромоторные толщиномеры.
2. Магнитостатические толщиномеры.
- Индукционные толщиномеры.

8.2. Пондеромоторные магнитные толщиномеры

Действие пондеромоторных толщиномеров основано на измерении силы отрыва постоянных магнитов или электромагнитов от контролируемого изделия.

Сила отрыва пропорциональна квадрату индукции в зазоре между ферромагнитным изделием и магнитом, а индукция зависит от величины зазора. Пондеромоторные магнитные толщиномеры с регистрацией измеряемой величины по силе отрыва применяют в основном для измерения толщины проводящих и непроводящих покрытий на ферромагнитной основе. Приборы этой группы портативны, не требуют источников питания, но обладают невысокой точностью измерения (погрешность 5...10 %). Кроме того, некоторые из известных моделей не являлись прямопоказывающими, а результат измерения по шкале прибора было необходимо переводить в значение толщины по специальному графику, приведенному в техническом описании прибора. Поэтому в настоящее время приборы этой группы морально устарели и серийно не выпускаются. Устройство магнитоотрывного толщиномера показано на рис. 8.1.

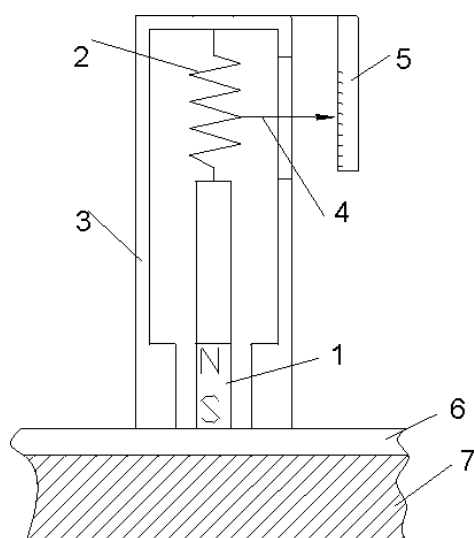


Рис. 8.1. Схематическое устройство пондеромоторного толщиномера:

1 – постоянный магнит; 2 – пружина динамометра; 3 – корпус;
4 – указатель; 5 – шкала; 6 – покрытие; 7 – ферромагнитная основа

На результаты измерения толщины покрытия в значительной степени влияют магнитные свойства материала подложки. Поэтому магнитные толщиномеры (всех трех групп) калибруются с помощью контрольных образцов, изготовленных из той же марки стали, что и контролируемая деталь, с покрытием заданной толщины.

Состояние поверхности (шероховатость) оказывает значительное влияние на погрешность магнитного толщиномера. Поэтому значения приводимых погрешностей относятся к обработке, определяемой шероховатостью поверхности не более $R_z=20$ мкм, что соответствует 5 классу чистоты поверхности. Если это особо не оговорено, погрешности приводятся в отношении к соответствующим пределам измерения.

8.3. Магнитоэлектрические толщиномеры

В магнитоэлектрических толщиномерах покрытий для регистрации изменений магнитного поля, вызванных вариацией контролируемой толщины, используют феррозондовые преобразователи или преобразователи Холла. Указанные преобразователи реагируют на изменение напряженности магнитного поля в цепи электромагнита или постоянного магнита при изменении расстояния между ним и ферромагнитным изделием из-за наличия немагнитного покрытия.

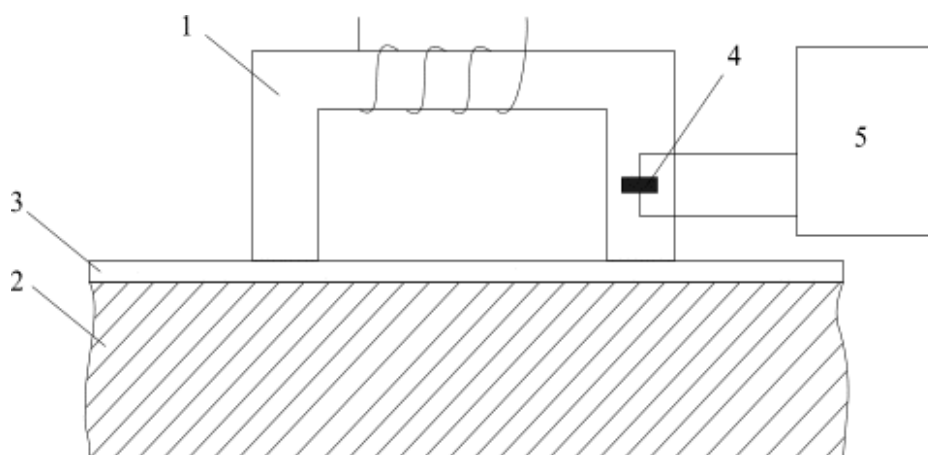


Рис. 8.2. Конструкция преобразователя магнитоэлектрического толщиномера:

1 – магнитопровод; 2 – магнитное основание; 3 – немагнитное покрытие; 4 – индикатор магнитного поля; 5 – измерительная схема

В толщиномере покрытий (рис. 8.2) при увеличении толщины немагнитного покрытия 3 увеличивается расстояние между полюсами магнитопровода 1 и магнитным основанием 2. Вследствие этого уменьшается индукция и магнитный поток, создаваемый обмоткой электромагнита. Это приводит к уменьшению сигнала на выходе преобразователя магнитного поля 4 (это может быть феррозонд или преобразователь Холла). Кроме того, зависимость амплитуды выходного электрического сигнала преобразователя 4 от толщины немагнитного покрытия 3 носит нелинейный экспоненциальный характер, причем с ростом толщины покрытия уровень сигнала преобразователя падает.

Погрешность измерения магнитостатическими толщиномерами зависит от следующих факторов:

1. Магнитные свойства материала изделия;
2. Шероховатость поверхности;
3. Геометрии поверхности контролируемого изделия;
4. Температура.

8.4. Индукционные толщиномеры

Для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе широкое распространение получили индукционные толщиномеры. Их действие основано на определении изменения магнитного сопротивления магнитной цепи, состоящей из ферромагнитной основы (деталь), преобразователя прибора и немагнитного зазора между ними. Преобразователь индукционного толщиномера представляет собой систему из трех катушек, размещенных на общем ферромагнитном сердечнике (рис. 8.3). Для уменьшения влияния края изделия на точность измерения стремятся локализовать магнитное поле преобразователя в месте его взаимодействия с контролируемым изделием. С этой целью удлиняют сердечник, заостряют и скругляют его конец. Это позволяет достигнуть площади пятна контроля 1 мм^2 при краевом эффекте в $3 \dots 4 \text{ мм}$. Отклонение оси преобразователя на 10° от направления нормали к поверхности вызывает дополнительную погрешность, не превышающую основную (как правило, $3 \dots 5 \%$). Однако при автоматизации процесса контроля толщины слишком малая площадь пятна контроля снижает производительность контроля. Для измерения на плоских поверхностях преобразователь выполняется на трехточечной опоре с подпружиненным сердечником, обеспечивающим минимальный воздушный зазор.

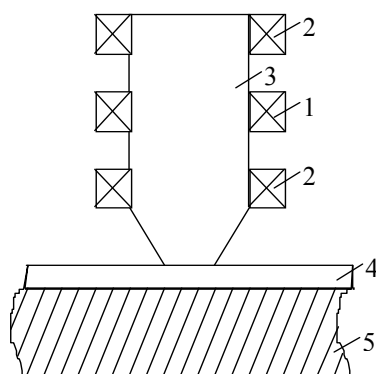
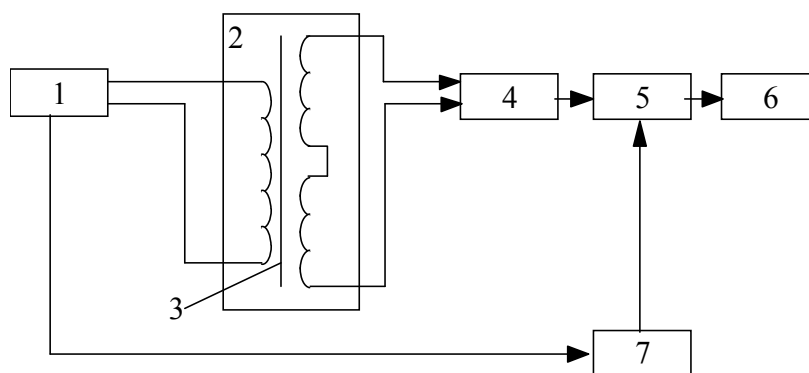


Рис.8.3. Индукционный преобразователь магнитного толщиномера:
1 – возбуждающая катушка; 2 – измерительные катушки;
3 – ферромагнитный сердечник; 4 – покрытие; 5 – ферромагнитная основа

Структурная схема индукционного толщиномера изображена на рис. 8.4. Обмотка возбуждения индукционного преобразователя 2 подключена к низкочастотному генератору 1. Измерительные обмотки преобразователя включены встречно и через избирательный усилитель 4 связаны со входом амплитудно-фазового детектора 5, на управляющий вход которого через формирователь 7 подано напряжение от генератора.



*Рис. 8.4. Структурная схема индукционного толщиномера
 1 – генератор; 2 – индукционный преобразователь;
 3 – ферромагнитный сердечник преобразователя;
 4 – избирательный усилитель; 5 – амплитудно-фазовый детектор;
 6 – индикатор; 7 – формирователь опорного напряжения*

Генератор формирует синусоидальное напряжение частотой 100...200 Гц. Измерительные обмотки преобразователя включены встречно и на воздухе (без изделия) выходной сигнал преобразователя близок к нулю. При поднесении преобразователя к ферромагнитной детали его симметрия нарушается и в измерительной обмотке наводится ЭДС, которая в определенных пределах обратно пропорциональна расстоянию между деталью и преобразователем.

Цифровой толщиномер МТ-2003 (рис. 8.5) является типичным представителем приборов данного класса (производитель – фирма Aka-Control, г. Москва, www.aka-control.ru). Толщиномер выпускают в двух модификациях – для диапазона толщин покрытий от 5 мкм до 2 мм и для диапазона толщин покрытий от 0,05 до 20 мм с погрешностью измерения 3%. Прибор позволяет запоминать результаты измерения. Для удобства хранения и обработки информации в приборе предусмотрена возможность работы «в группе». При этом данные измерений, относящиеся к разным объектам (или к разным участкам одного объекта) хранятся в соответствующей группе, что облегчает впоследствии обработку результатов измерения при составлении протокола измерений. Существует модификация прибора с инфракрасным портом для связи с персональным компьютером.



Рис. 8.5. Магнитный толщиномер покрытий индукционного типа МТ 2003

Для всех приборов этой группы в техническом описании приводятся минимально допустимый радиус кривизны измеряемого объекта и минимальное расстояние от оси преобразователя до края объекта.

Достоинства магнитных толщиномеров:

1. Возможность локального контроля толщины немагнитных и диэлектрических покрытий на стали.
2. Портативность приборов – вес в среднем 0,2... 0,3 кг.

Недостатки:

1. Контроль производится контактным способом, что предъявляет дополнительные требования к форме и чистоте поверхности изделия.
2. Точное измерение толщины возможно только при калибровке прибора на том же материале, на котором в последствии будут проводиться измерения.

Список литературы к главе 8

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. справочник, в 2-х книгах / под редакцией В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986.

ГЛАВА 9. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ

9.1. Общие положения

Для понимания проблем, решаемых в данном разделе магнитного контроля, приведем небольшой (не претендующий на полноту) перечень задач, относящихся к данному разделу:

- контроль химического состава сталей;
- контроль содержания углерода в стали;
- контроль режимов термообработки сталей;
- контроль твердости;
- контроль напряженного состояния материала и т. д.

Как известно, все задачи подобного рода хорошо решаются классическими разрушающими методами контроля. Так, например, для измерения твердости металлов многие десятилетия пользуются известными методами контроля, основанными на том, что в специально изготовленный образец материала, уложенный под пресс, вдавливается **индентор** (стальной шарик или алмазная пирамидка) и по размеру отпечатка в материале судят о его твердости. Метод дает очень объективные результаты о механических свойствах материала, однако он неприменим для измерений непосредственно на объекте контроля (например, на стенке трубопровода или парового котла) и поэтому непригоден при решении задач **диагностики**, т. е. определения возможности дальнейшей эксплуатации объектов, которые отработали расчетный срок эксплуатации. Поэтому разрушающие методы применяются на стадии изготовления оборудования в заводских условиях. Для диагностики оборудования, находящегося в эксплуатации, необходимы другие – неразрушающие – методы контроля. Теоретически информацию о структуре металлов могут давать радиационные, ультразвуковые, магнитные и вихретоковые методы контроля.

Для решения подобных задач магнитными методами проводят магнитный структурно-фазовый анализ, объектами контроля являются детали и изделия из сталей и чугунов. Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2 % относят к сталям, выше 2 % – к чугунам. По химическому составу стали делят на углеродистые и легированные. Легированными сталями называют такие стали, в состав которых помимо железа и углерода входят специальные легирующие элементы (хром, марганец, ванадий, вольфрам, кремний и др.). Промышленные

чугуны являются многокомпонентными сплавами и обычно содержат 2,4...4 % углерода, 0,5...5 % кремния, а также легирующие и модифицирующие элементы и примеси марганца, серы, фосфора и др.

Структура и фазовый состав железуглеродистых сплавов определяется содержанием в них углерода. Состояние сплавов железа с углеродом при различных температурах (вплоть до температуры плавления сталей ≈ 1600 °С) и в диапазоне содержания углерода до 6 % описывается диаграммой, приводимой, как правило, в учебниках по металлвоведению. Для различных областей диаграммы характерно существование различных фаз и структур. Фазой (от греческого *phasis*) сплава называют однородную по физическим и химическим свойствам часть сплава, имеющую одинаковую кристаллическую решетку и отделенную от остальных частей границами раздела, на которых происходит изменение свойств. Например, жидкий раствор углерода в железе и твердый раствор того же химического состава – различные фазы, поскольку их физическое состояние разное. Модификации α -Fe (феррит) и γ -Fe (аустенит) – две разные фазы, т. к. отличаются их кристаллические решетки. Цементит и графит также являются фазами, встречающимися в стали или чугунах.

При одинаковом фазовом составе сплав может обладать различной структурой. Под структурой следует понимать устойчивое состояние сплава, его элементов (зерна, границы зерен, включения, кристаллическая решетка и ее несовершенства), обеспечивающее его целостность и тождественность самому себе, т. е. сохранение морфологии, размеров и формы при различных воздействиях. Основные фазовые и структурные составляющие стали и чугуна: **феррит, мартенсит, аустенит, цементит, перлит, ледебурит**. Углеродистые стали в отожженном состоянии содержат только две фазы: феррит и цементит.

Феррит – равновесный твердый раствор углерода в α -Fe – является самой мягкой магнитной составляющей. Он имеет низкую коэрцитивную силу ~ 2 А/см, высокую магнитную проницаемость, большую намагниченность насыщения. Его механическая твердость по Бринеллю невелика – НВ ≈ 80 ед. **Цементит** – химическое соединение Fe_3C – обладает достаточно большой коэрцитивной силой, его намагниченность насыщения примерно в 2 раза меньше J_s феррита. По твердости НВ цементита в 10 раз больше твердости феррита.

Структура углеродистых сталей в состоянии отжига определяется содержанием углерода. Сталь, содержащая 0,8 %С, носит название **эвтектоидной** и имеет характерную структуру, состоящую из чередующихся пластин феррита и цементита, – структуру **перлита**. В доэвтектоидных сталях ($C < 0,8$ %) по мере увеличения в их составе углерода от структур феррита ($C \leq 0,02$ %) наблюдается переход к феррито-перлитной смеси, в которой

возрастает процентное содержание перлитной составляющей, достигающее у эвтектоидной стали 100 %. В заэвтектоидных сталях ($0,8 < C < 2 \%$) не связанный в перлите углерод выделяется в структурно-свободном виде как графит, располагаясь как по границам перлитных зерен, так и внутри их. Структура заэвтектоидных сталей: перлит + цементит.

Наиболее широко отожженные стали используются в конструкциях, изготавливаемых непосредственно из проката. Эти стали, как правило, являются магнитомягкими и имеют коэрцитивную силу менее 8 А/см. Для получения более высоких прочностных характеристик металла его упрочняют, поэтому могут встречаться термически упрочненные сорта проката или изделия, подвергаемые упрочняющим термическим обработкам. Сущность **закалки** заключается в том, что в результате этого вида термической обработки в структуре стали при комнатной температуре появляется мартенсит и изделие упрочняется.

Мартенсит – основная структурная составляющая закаленной стали – неравновесный пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe. Мартенсит – магнитотвердая составляющая, его коэрцитивная сила тем выше, чем больше в стали углерода и легирующих элементов. Намагниченность мартенсита ниже J_s феррита и перлита и зависит от процентного содержания C и легирующих элементов в твердом растворе. Механическая твердость мартенсита велика: (30...65) HRC и повышается, как и коэрцитивная сила, с увеличением содержания углерода и легирующих элементов.

Аустенит – твердый раствор углерода и легирующих элементов в γ -Fe. Эта фаза появляется в сталях при нагреве до высоких температур. В γ -фазе растворимость углерода высока (до 2,14 %) и при быстром охлаждении (закалке) большая часть углерода фиксируется в решетке образующегося при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении мартенсита. Однако не весь аустенит при закалке превращается в мартенсит. Сохранившийся при комнатной температуре аустенит называют **остаточным**. Аустенит парамагнитен, обладает высокой твердостью, но несколько меньшей, чем мартенсит.

Ледебурит – структурная составляющая, представляющая собой эвтектическую смесь аустенита и цементита (γ -Fe + Fe₃C), с концентрацией углерода 4,3 %, образующаяся при кристаллизации из жидкой фазы при температуре 1147 °С.

9.2. Основные сведения о магнитном структурно-фазовом анализе [1]

Различные фазы и структуры имеют различные механические, магнитные и электрические характеристики. Изменение структуры и фазового состава влечет за собой изменение большинства физических свойств и прочностных характеристик материала. Одной из ос-

новных задач неразрушающего структурно-фазового анализа является познание характера этих связей. Когда они будут известны, откроется возможность для решения обратных задач – по известным физическим свойствам или прочностным характеристикам определять фазовый состав материала и его структуру. Связь фазового состава и структуры с прочностными характеристиками изучена давно, поэтому в промышленности очень часто структура и фазовый состав оцениваются по каким – либо прочностным характеристикам. Из изложенного следует, что для оценки структуры и фазового состава могут быть использованы многие другие физические характеристики и собственно методы контроля. Действительно, для оценки структурно-фазового состояния материала используется ультразвуковые, магнитные, электрические, тепловые, рентгеновские и другие методы.

На практике для конструирования машин, сооружений и другой техники при расчетах используют прочностные или специальные характеристики, поэтому чаще всего неразрушающие физические методы применяют для оценки именно этих свойств на основании ранее установленных корреляционных связей. К выбору физического параметра контроля предъявляется ряд требований:

- он должен быть чувствителен к изменениям структуры или фазового состава;
- измерение должно быть экспрессным и желательно бесконтактным;
- он должен быть устойчив к влиянию внешних мешающих факторов (например, к зазору между преобразователем и изделием, колебанию температуры окружающей среды, промышленным помехам);
- должен позволять проводить измерения на любой форме и размерах изделия.

Из большого числа физических методов, которые могут быть использованы в структурно-фазовом анализе, наиболее удовлетворяют требованиям магнитные и электромагнитные методы, нашедшие широкое применение в мировой практике контроля качества ферромагнитных изделий металлургической и машиностроительной отраслей промышленности для:

- определения структурного состояния и механических свойств холодно и горячекатаного проката;
- контроля структурного состояния и прочностных характеристик объемно термически обработанных стальных и чугуновых изделий;
- определения фазового состава, пористости, выявления парамагнитных и ферромагнитных участков с различающимися физическими свойствами в литых, металлокерамических изделиях и сварных соединениях;

- оценки напряженного состояния и его изменений в материалах и конструкциях после термической обработки или пластической деформации, а также в процессе эксплуатации;
- выявления кристаллографической текстуры, анизотропии механических свойств при штамповке или деформации листового проката;
- контроля структуры, физико-механических свойств и толщины слоев поверхностно упрочненных изделий различными методами.

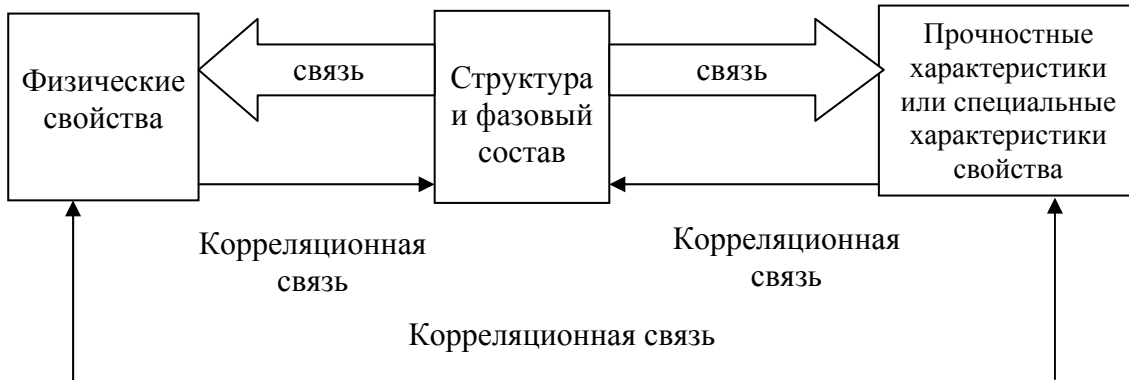


Рис. 9.1. Взаимосвязи структурного состояния и фазового состава (первичные свойства) с физическими и прочностными свойствами (вторичные свойства) материала

9.3. Основные способы термической обработки

Закалка – термическая обработка металлов, заключающаяся в их нагреве и последующем быстром охлаждении – возможна только для материалов с кристаллической структурой, у которых равновесное состояние при высокой температуре отличается от состояния при низкой температуре (металлы, сплавы, стекло). Закаленная сталь отличается большой хрупкостью, поэтому после закалки ее подвергают отпуску, после чего она становится более пластичной.

Отпуск – нагрев до температуры ниже нижней критической точки (910 °С для сталей) и последующее охлаждение – в результате достигается оптимальное соотношение твердости, пластичности и ударной вязкости. С повышением температуры отпуска твердость и прочность понижаются. Например, отпуск при температуре 300...400 °С – для термообработки пружин и рессор. Отпуск при температуре 450...650 °С – для деталей, испытывающих динамические и вибрационные нагрузки.

Отжиг – нагрев стали до определенной температуры, выдержка и медленное охлаждение. Цель – снижение твердости для улучшения обрабатываемости, улучшения структуры, снятие внутренних напряжений.

Полный отжиг – нагрев до температуры выше верхней критической температуры (1400 °С для стали) до полного превращения стали в аустенит и медленное охлаждение до 500...600 °С со скоростью 50...100 °С/час.

Нормализация – отжиг с охлаждением на воздухе, с естественной скоростью остывания.

Поскольку в данном разделе мы будем часто сталкиваться с понятием твердость, приведем краткие сведения об этом параметре конструкционных материалов. Твердость – характеристика прочности материала – оценивается различными способами. Неразрушающий способ измерения твердости – по высоте отскакивания ударного бойка от испытуемого материала (приборы такого типа называются **склероскопы**). Измерение происходит быстро, но обладает невысокой точностью. Чаще применяют способ вдавливания **индентора** (обладающего собственной высокой твердостью) в поверхность испытуемого материала и затем измеряют площадь или размер полученного отпечатка. Данный способ относят к разрушающим методам контроля, т. к. нарушается состояние поверхности детали либо требуется изготовление специально вырезанного образца с заданными размерами. В зависимости от типа индентора различают твердость по **Бринеллю**, **Роквеллу** и **Виккерсу**. Твердость по Бринеллю обозначается **НВ** и измеряется в кгс/мм². Мерой твердости служит отношение нагрузки (кгс) к площади поверхностного сферического отпечатка шарика (мм²). При измерении твердости шариком диаметром 10 мм с нагрузкой 3000 кгс с выдержкой 10 секунд твердость условно обозначается, например, НВ400.

Твердость по Роквеллу обозначается **HRA, HRB, HRC** и является величиной, обратной глубине вдавливания шарика или алмазного конуса с отсчетом по шкале прибора (шкалы А, В и С – для шарика или алмазного конуса).

Твердость по Виккерсу обозначается **HV** и определяется путем измерения длины диагоналей отпечатка от вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды (метод применяют для материалов с выраженной анизотропией механических свойств).

Основной вид термической обработки сталей – закалка и отпуск – сильно изменяют как структуру стали, так и ее электрические и магнитные свойства. На рис. 9.2 показан характер изменения остаточной индукции **V_r**, максимальной магнитной проницаемости **μ_{макс}**, коэрцитивной силы **H_c**, удельного электрического сопротивления **ρ** и твердости по Роквеллу **HRC** в зависимости от температуры закалки **T_{зак}** стали.

Изменение химического состава стали (содержание углерода и легирующих элементов) также может сильно изменять магнитные свойства стали. На рис. 9.3 видно что, например, при увеличении содержа-

ния углерода в стали на 1,5 % максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ может уменьшиться, а коэрцитивная сила H_c увеличиться почти в 10 раз, в то время как индукция насыщения B_s и остаточная индукция B_r изменяются незначительно.

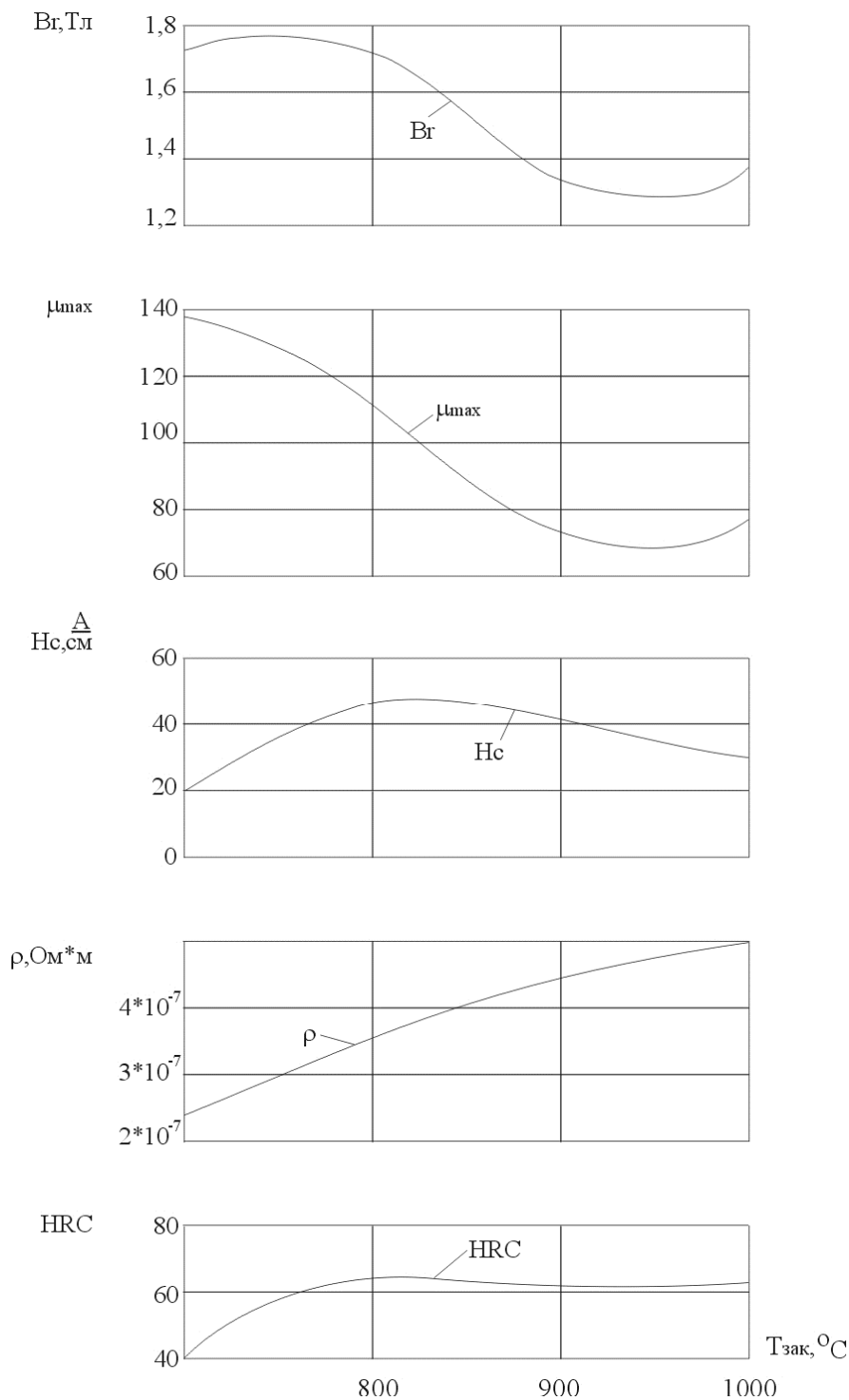


Рис. 9.2. Зависимость электрических, магнитных и механических свойств стали от температуры закалки

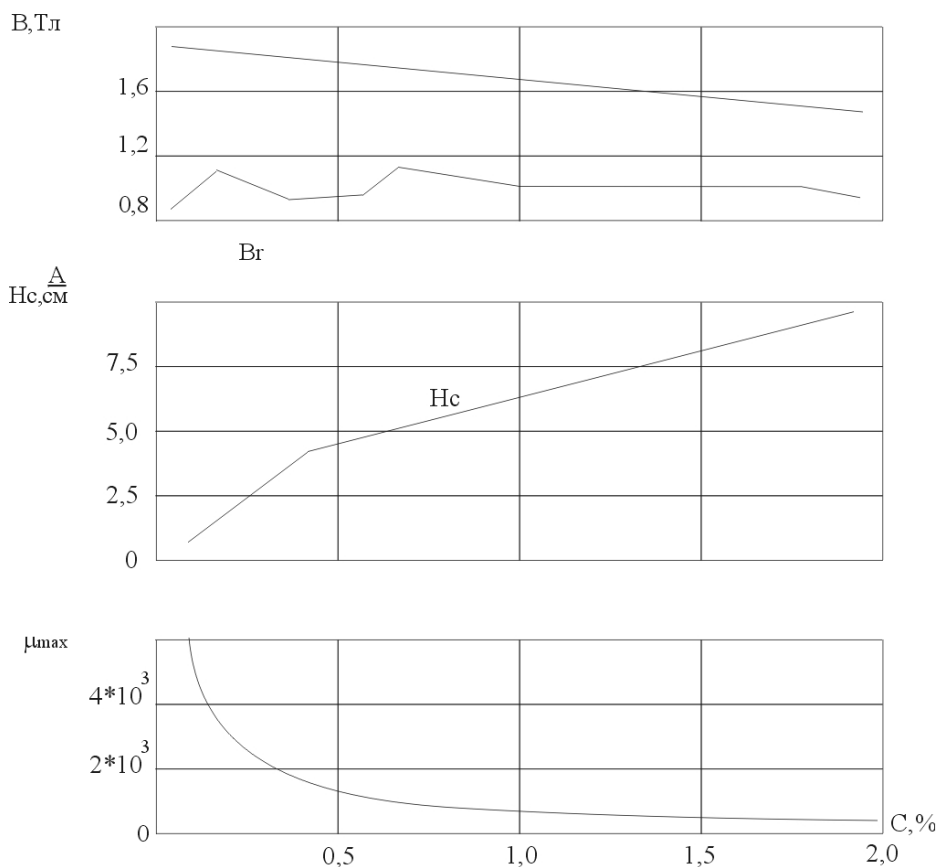


Рис. 9.3. Зависимость магнитных свойств стали от процентного содержания углерода

9.4. Некоторые закономерности магнитного структурно-фазового анализа

Основной задачей магнитного структурно-фазового анализа (МСФА) является замена разрушающих механических испытаний металлов (очень трудоемких и зачастую требующих подготовки специальных образцов для испытания) на неразрушающие измерения магнитных характеристик, которые можно проводить оперативно (несколько секунд на одно измерение) непосредственно на поверхности объекта контроля. Очевидно, что такая замена возможна в том случае, если магнитное измерение дает достоверность контроля не хуже, чем механическое испытание. В процессе МСФА в каждом конкретном случае решается вопрос о **наличии корреляционной связи** между подлежащей контролю структурно-механической характеристикой материала и какой-либо магнитной характеристикой. При этом очень важно проверить, соблюдается ли обнаруженная связь при колебаниях размера, химического состава и термообработки деталей в пределах допусков, установленных технологией производства.

При решении подобных задач важен выбор **структурочувствительных** магнитных характеристик, которыми могут быть:

- индукция насыщения B_s ;
- остаточная индукция B_r ;
- коэрцитивная сила H_c ;
- различные типы магнитных проницаемостей;
- площадь и форма петли гистерезиса.

При поиске корреляционных связей возможны различные варианты: несколько магнитных характеристик хорошо коррелируют с искомым структурным параметром; хорошо коррелирует только одна магнитная характеристика; ни одна из перечисленных характеристик удовлетворительно не коррелирует, т. е. задача неразрешима в пределах предложенных магнитных характеристик.

В целом опыт развития МСФА позволяет сформулировать несколько правил.

1. В аустенитных сталях индукция насыщения пропорциональна объему, занимаемому ферритной фазой

$$B_s = B_s^{(\Phi)} \frac{P}{100}, \quad (9.1)$$

где B_s – индукция насыщения аустенитной стали; $B_s^{(\Phi)}$ – индукция насыщения ферритной фазы; P – процентное содержание ферритной фазы в стали.

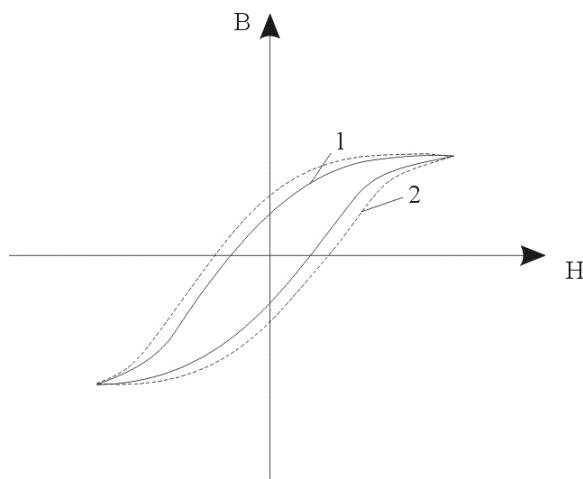


Рис. 9.4. Перемагничивание чистых ферромагнетиков (1) и сталей сложного химического состава (2)

2. Чистые и однородные по структуре ферромагнетики являются магнитомягкими. Они имеют крутую кривую основного намагничивания и узкую петлю гистерезиса с малой коэрцитивной силой H_c . С дру-

гой стороны, ферромагнитные стали сложного химического состава, с неоднородной микроструктурой и сложным фазовым составом имеют широкую петлю гистерезиса с большим значением H_c и B_r .

3. Твердость углеродистых и низколегированных сталей хорошо коррелируется с их коэрцитивной силой. На рис. 9.5 приведены примеры таких зависимостей для стали 30X13 (кривая 1) и для стали 12X17H2 (кривая 2).

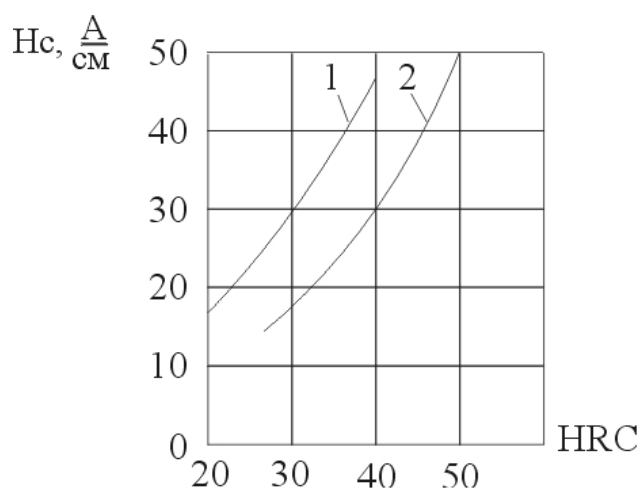


Рис. 9.5. Зависимость между коэрцитивной силой и твердостью углеродистых и низколегированных сталей

4. Короткие детали с большим коэффициентом размагничивания имеют петлю гистерезиса, сильно наклоненную к оси напряженности поля (рис. 9.6).

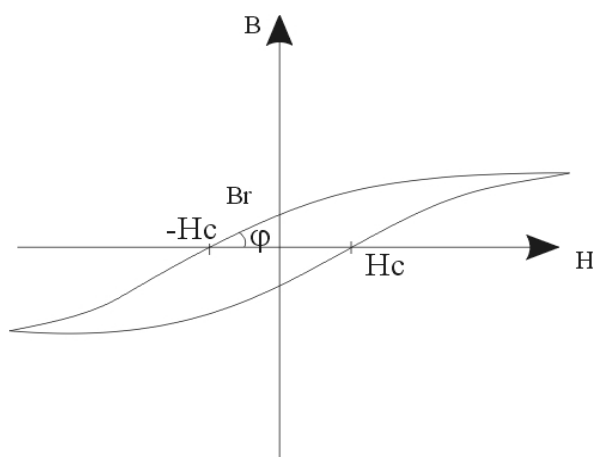


Рис. 9.6. Вид петли гистерезиса при сильном влиянии коэффициента размагничивания

При этом участок петли во втором квадранте ($-H_c$; B_r) становится близок к прямолинейному и соблюдается соотношение

$$\mathbf{B}_r = \operatorname{tg}\varphi \mathbf{H}_c. \quad (9.2)$$

Поэтому остаточная индукция становится структурочувствительной характеристикой материала. Аналогичное положение имеет место, когда участок детали намагничен локально с помощью цилиндрического постоянного магнита или электромагнита, при этом остаточная индукция участка детали становится мерой коэрцитивности материала.

9.5. Принцип измерения коэрцитивной силы.

Коэрцитиметры с приставным электромагнитом и коэрцитиметры с соленоидом

Для измерения коэрцитивной силы сначала необходимо довести объект контроля (или измеряемый участок объекта контроля) до технического насыщения, т. к. точка коэрцитивной силы находится на предельной петле гистерезиса. Затем, после выключения внешнего намагничивающего поля, состояние объекта контроля соответствует точке остаточной индукции \mathbf{B}_r . Для перехода из точки \mathbf{B}_r в точку \mathbf{H}_c по предельной петле гистерезиса к ферромагнетику необходимо приложить поле противоположного знака (по сравнению со знаком поля насыщения), причем плавно увеличивать его от нуля. В момент времени, когда состояние ферромагнетика соответствует точке \mathbf{H}_c , индукция и магнитный поток равны нулю. Следовательно, для измерения коэрцитивной силы, магнитная цепь измерительного устройства должна создавать сильное магнитное поле для насыщения объекта контроля и иметь индикатор магнитного потока магнитной системы, включающей в себя объект контроля. Коэрцитиметры по способу намагничивания делятся на две группы – с намагничиванием приставными электромагнитами и с намагничиванием соленоидами.

Коэрцитиметры с приставными электромагнитами позволяют измерять коэрцитивную силу материала локально (на площади в несколько см^2) в разных точках объекта контроля, при одностороннем доступе к объекту контроля и по криволинейной поверхности. На рис. 2.37 приведен пример конструкции преобразователя коэрцитиметра с приставным П-образным электромагнитом, на котором находятся намагничивающая $\mathbf{W}_н$ и размагничивающая $\mathbf{W}_р$ обмотки (название обмоток условно, т. к. фактически это одна и та же обмотка, разделенная на две секции). В верхней части магнитопровод разделен пополам (магнитный поток делится надвое) и на половинках магнитопровода намотаны обмотки феррозонда ФЗ, который в данной конструкции выполняет роль нуля-индикатора магнитного потока.

После намагничивания контролируемого участка изделия с помощью обмотки $\mathbf{W}_н$ и выключения тока в ней включается обмотка $\mathbf{W}_р$

и ток в ней плавно увеличивается до тех пор, пока измерительная схема феррозонда не покажет отсутствие магнитного потока в замкнутой магнитной цепи. В этот момент времени необходимо измерить значение размагничивающего тока I_{pc} .

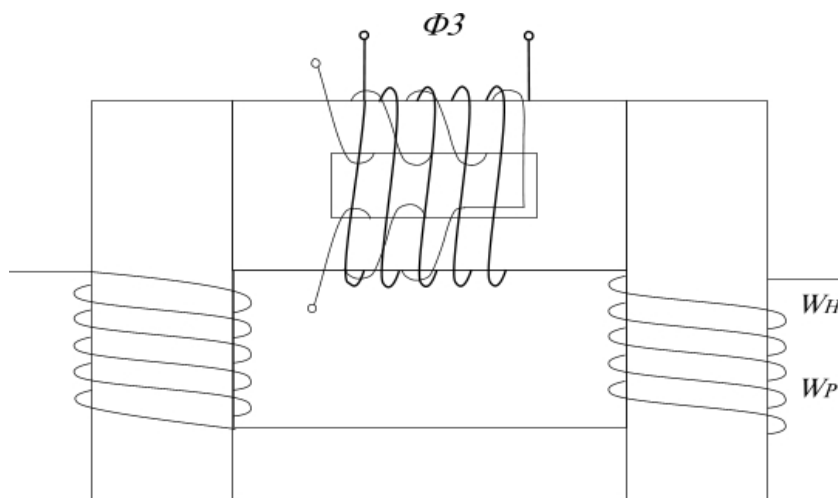


Рис. 9.7. Схема преобразователя коэрцитиметра с приставным электромагнитом

При конструировании приборов такого типа основной проблемой является то, что на результат измерения влияют поля рассеяния и собственные магнитные свойства магнитопровода (который изготавливают из очень магнитомягкой стали с коэрцитивной силой не более 1 А/см). В результате этого зависимость тока размагничивания I_{pc} от коэрцитивной силы H_c не проходит через начало координат, а сдвинута на некоторую величину, и угол наклона кривых $I_{pc}(H_c)$ также не является постоянной величиной. Так как сердечники приставного электромагнита трудно получить совершенно одинаковыми, то для каждого преобразователя приборов такого класса определяется уравнение регрессии

$$I_{pc} = bH_c + I_0, \quad (9.3)$$

т. е. осуществляется градуировка прибора по аттестованным образцам с известной коэрцитивной силой. Коэффициент регрессии b и размагничивающий ток магнитопровода датчика I_0 определяют методом наименьших квадратов на достаточно большом числе образцов. Чтобы линии регрессии $I_{pc}(H_c)$ для каждого преобразователя проходили через начало координат, необходимо иметь коэффициент $I_0 = 0$, т. е. можно ввести в электрическую схему прибора элементы, которые в некоторых пределах меняют наклон и сдвиг линий $I_{pc}(H_c)$ и тем самым обеспечивают взаимозаменяемость преобразователей в коэрцитиметрах с приставными электромагнитами.

К измерительным коэрцитиметрам с соленоидом относятся коэрцитиметр с вращающимся индукционным преобразователем и коэрцитиметр с феррозондом в качестве нуль-индикатора. Коэрцитиметр с вращающимся индукционным преобразователем (рис. 9.8) состоит из намагничивающей катушки 1 (соленоид с известной постоянной, т. е. коэффициентом, связывающим напряженность поля в центре катушки и ток в обмотке), приспособления для крепления образца 5 и электродвигателя 4, вращающего индукционный преобразователь 2. Сигнал с преобразователя 2 через коллектор подводится к вольтметру 3. Витки индукционного преобразователя 2 расположены так, что он не реагирует на магнитное поле, создаваемое катушкой 1, а реагирует только на составляющую магнитного поля образца, перпендикулярную полю катушки 1.

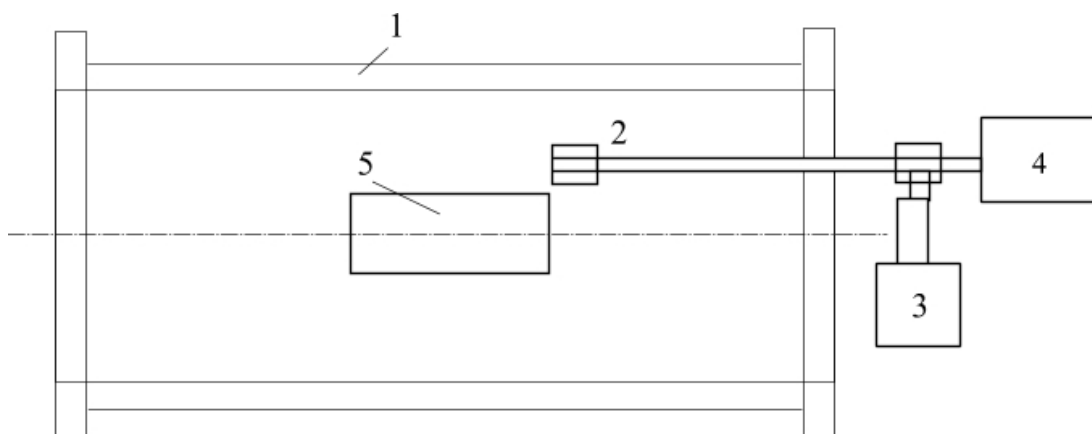


Рис. 9.8. Схема устройства коэрцитиметра с вращающимся индукционным преобразователем

Измеряемый образец намагничивается до технического насыщения, при этом в индукционном преобразователе, вращающемся у края намагниченного образца, наводится ЭДС, измеряемая вольтметром. Затем намагничивающий ток выключают и в катушку подают плавно нарастающий ток противоположного знака. В момент, когда магнитное поле катушки равно коэрцитивной силе образца, магнитный поток станет равным нулю, что будет соответствовать нулевым показаниям вольтметра. Учитывая (2.6) для напряженности поля в центре длинного соленоида для этого момента времени будет справедливо выражение

$$H_c = \frac{I_p W}{l}, \quad (9.4)$$

где H_c – коэрцитивная сила образца; I_p – размагничивающий ток в момент нулевого магнитного потока; W – число витков соленоида;

l – длина соленоида. Поскольку индукционный преобразователь в данной схеме служит лишь индикатором нуля, нет необходимости в его калибровке, он должен только обладать необходимой чувствительностью.

Феррозондовый коэрцитиметр (рис. 9.9) характеризуется тем, что индикатором равенства нулю намагниченности образца в нем служат феррозонды 2. Процедура измерения такая же, как в предыдущем случае, расчет коэрцитивной силы – по (9.4). Известны также варианты подобных коэрцитиметров, в которых индукционный преобразователь сдвигают с образца (сигнал с преобразователя поступает на электронный интегратор) либо используют вибрирующий индукционный преобразователь.

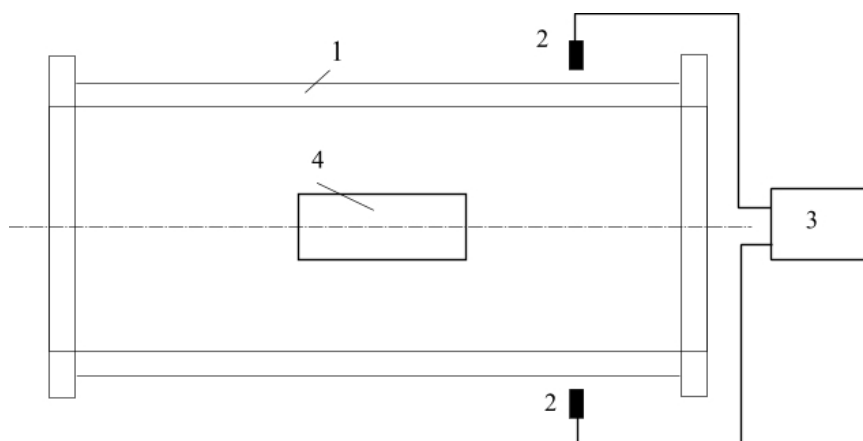


Рис. 9.9. Принципиальная схема феррозондового коэрцитиметра

В отличие от коэрцитиметров с приставными электромагнитами коэрцитиметры с соленоидами позволяют проводить более точные измерения, но только на деталях не очень больших габаритов и дают среднее значение коэрцитивной силы по всему объему детали. Поэтому для измерения локального значения коэрцитивной силы (особенно при измерениях на крупногабаритных объектах) применяют коэрцитиметры с приставными электромагнитами, которые выпускаются многими промышленно развитыми странами и обычно имеют диапазон измерения от 1 А/см до 50...100 А/см при погрешности измерения 3...5%. Основной вклад в снижение точности измерения вносит воздушный зазор и перекося при установке электромагнита на поверхность объекта контроля. При контроле криволинейных поверхностей допускается применение специальных насадок-башмаков на торцы электромагнита, повторяющих форму поверхности детали. Основным недостатком приборов этого класса является то, что измерение носит циклический характер и одно измерение занимает 5...10 секунд.

9.6. Приборы контроля механических свойств по остаточной индукции и магнитной проницаемости

При контроле по методу остаточной магнитной индукции изделий подразумевается не измерение остаточной магнитной индукции вещества \mathbf{B}_r , а остаточной индукции тела или, как иногда говорят, кажущейся остаточной индукции \mathbf{B}'_r . Короткие детали с большим коэффициентом размагничивания имеют петлю гистерезиса, сильно наклоненную к оси напряженности поля (рис. 9.6). При этом участок петли во втором квадранте плоскости становится прямолинейным. Отношение кажущейся остаточной индукции к коэрцитивной силе для таких деталей является величиной постоянной, зависящей только от коэффициента размагничивания, который практически определяется отношением длины детали к ее сечению. Многие типоразмеры изделий имеют небольшое отношение длины к поперечному размеру (не более 10). При этом проницаемость тела μ_r мала и выполняется соотношение

$$\mathbf{B}'_r = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}_c \quad (9.5)$$

Поэтому кажущаяся остаточная индукция становится также характеристикой коэрцитивности материала изделия, т. е. структурно-чувствительной характеристикой. Достоинство этого метода заключается в том, что измерение остаточной индукции можно провести за время, равное десятым долям секунды, в отличие от измерения собственно коэрцитивной силы, которое в силу присущего ему циклического характера занимает время не менее 5 секунд. Следовательно, измерение остаточной индукции предпочтительнее при организации высокопроизводительного контроля.

При локальном намагничивании массивных изделий перпендикулярно их поверхности («точечное» намагничивание) коэффициент размагничивания весьма велик и соотношение (9.5) также справедливо. Таким образом, методы контроля по остаточной магнитной индукции очень тесно примыкают к коэрцитиметрическим. Для контроля малогабаритных изделий по величине кажущейся остаточной индукции \mathbf{B}'_r чаще всего используют разомкнутую магнитную цепь.

Один из способов определения остаточной магнитной индукции заключается в измерении максимального значения двуполярного импульса ЭДС, возникающего при поступательном движении изделия с фиксированной скоростью через измерительную катушку. Это высокопроизводительный способ, но пропорциональность величины сигнала

скорости движения изделий служит источником больших погрешностей в определении величины магнитной индукции. Точность измерения остаточной индукции движущихся изделий можно повысить, если измерять не амплитуду, а интегрировать по времени однополярный импульс наводимой ЭДС.

Контроль малогабаритных изделий в разомкнутой магнитной цепи методом измерения максимального значения ЭДС рассмотрим на примере установки, приведенной на рис. 9.10. Деталь попадает в воронку входного бункера 1 и замыкает контакт 2 или фотореле пускового устройства. После этого в намагничивающий соленоид 3 подается намагничивающий ток. Деталь останавливается под действием магнитного поля соленоида и успокоителя У, выполненного из магнитомягкой стали. Далее ток отключается и деталь под действием своей массы проходит через измерительные катушки 4...5, индуцируя в них импульсы, пропорциональные величине остаточной индукции. Каждая измерительная катушка через свой усилитель связана с соответствующим реле. В зависимости от измеряемой величины остаточной индукции срабатывают реле «твердая деталь» или «годная деталь» и заслонки 6 или 7, связанные с этими реле, направляют деталь в соответствующий бункер. Годные детали при выходе из измерительного устройства размагничиваются в переменном магнитном поле соленоида 8.

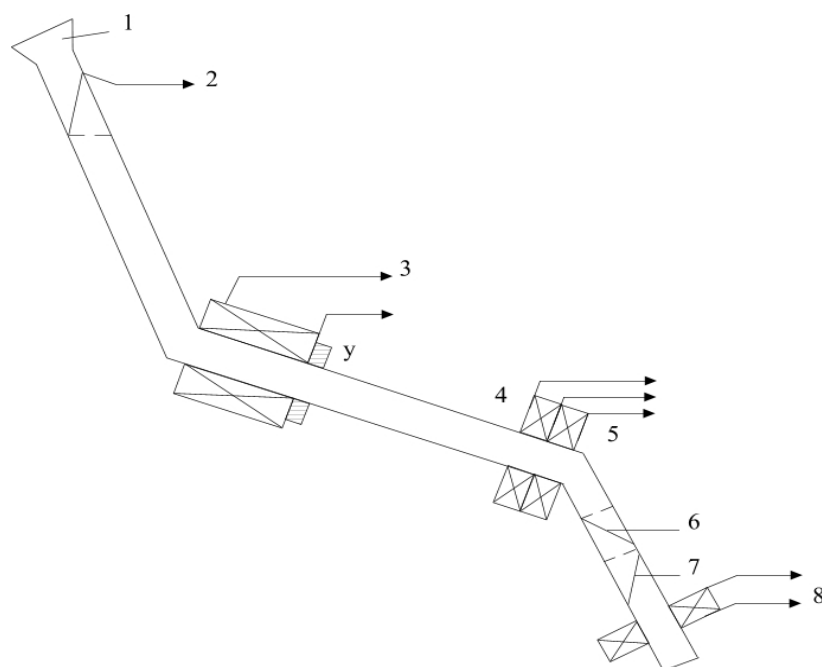


Рис. 9.10. Установка для измерения кажущейся остаточной индукции

Контроль массивных изделий осуществляется **методом локального намагничивания**. Для намагничивания используют постоянный

магнит, электромагнит или соленоид с импульсным током. Разработанный Ф. Фёрстером (Германия) метод локального намагничивания осуществляется путем соприкосновения и последующего удаления от изделия постоянного магнита стержневого, чашечного или подковообразного вида. На рис. 9.11, а представлен один из наиболее распространенных преобразователей подобного типа.

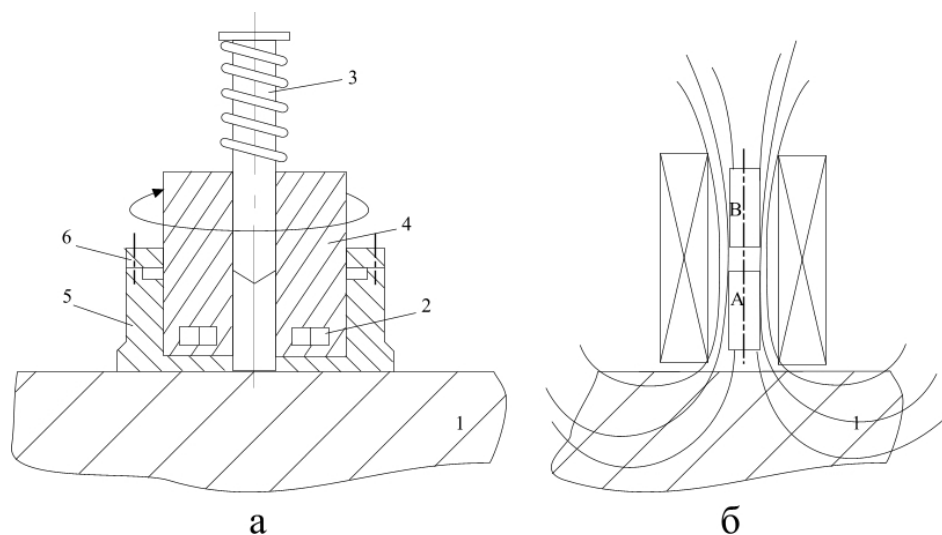


Рис. 9.11. Контроль методом локального намагничивания при помощи цилиндрического постоянного магнита с выдвигаемым сердечником (а) и при помощи соленоида с феррозондами (б)

Подпружиненный цилиндрический постоянный магнит вводится в соприкосновение с поверхностью изделия и создает точечный полюс. Кажущуюся величину остаточной индукции «магнитного пятна» определяют по измеренной феррозондами величине тангенциальной составляющей полей рассеяния. Вращение преобразователя с феррозондом вокруг оси позволяет дополнительно оценить анизотропию магнитных свойств в электротехнических сталях или механических свойств в тонколистовом прокате, например в прокате для автомобильной промышленности. Размер детали и ее форма оказывают влияние на показания прибора. Если преобразователь установлен вблизи кромки изделия или установлен на неровной поверхности. Для уменьшения влияния краевого эффекта используют постоянный магнит не цилиндрической формы, а в виде чашки.

Для намагничивания изделий могут использоваться различные конструкции электромагнитов. В некоторых приборах намагничивание осуществляется катушкой с выдвигаемым сердечником. Импульс тока от разряда конденсатора, проходя по катушке, выдвигает сердечник до соприкосновения с поверхностью изделия и намагничивает его, а далее

остаточный магнитный момент регистрируют с помощью феррозондовых преобразователей.

Для контроля качества термической обработки изделий сложной формы применяют метод локального намагничивания малогабаритным соленоидом (рис. 9.11, б). Соленоид 3 устанавливается перпендикулярно поверхности контролируемого участка 1. Нормальную составляющую полей рассеяния от остаточного намагниченного «пятна» измеряют градиентометрически включенными феррозондами А и Б. Исследования условий намагничивания изделий методом разряда конденсатора на обмотку соленоида показали, что для обеспечения необходимой повторяемости результата при контроле необходимо затрачивать не менее 5 Дж энергии на каждый импульс намагничивания. Достоверность контроля и повторяемость результатов может быть повышена за счет многократного импульсного намагничивания изделий (до 12 раз).

9.7. Приборы для контроля физико-механических свойств материала, действие которых основано на измерении магнитной проницаемости

Менее распространены, хотя в некоторых случаях такие измерения более производительны и дают лучшие корреляционные связи. Индукционный метод измерения магнитной (динамической) проницаемости основан на том, что если поддерживать неизменной амплитуду напряженности намагничивающего поля, то амплитудная (или динамическая) проницаемость будет пропорциональна амплитуде индукции в контролируемой детали (если ее размеры останутся неизменными). Обычно в практических установках используют дифференциальную схему, с помощью которой определяют изменение магнитной проницаемости контролируемой детали по сравнению с магнитной проницаемостью образца (рис. 9.12).

В приборе имеются индукционные преобразователи 1 и 2, включенные дифференциально и питающиеся от блока питания 3 (используют низкую частоту, возможно сетевую частоту 50 Гц). В преобразователи 1 и 2, представляющие собой катушки с намагничивающей и измерительной обмотками, помещают образец и контролируемую деталь. Намагничивающие обмотки преобразователей включены последовательно-согласно, амплитуда переменного тока в них постоянна и не зависит от параметров образца и контролируемой детали (т. е. применяют режим генератора тока). Для уравнивания преобразователей при помещении в них идентичных изделий (в начале измерений в преобразователи помещают образцы со свойствами, максимально близкими к норме) служит компенсирующее устройство 4. В случае, если в процессе контроля изме-

ряется образец, свойства которого отклоняются от нормы, появляется разностная ЭДС, пропорциональная разности динамических магнитных проницаемостей образца и контролируемой детали, которая усиливается усилителем 5 и далее обрабатывается при помощи фазовых или амплитудно-фазовых детекторов (на рисунке не показаны). Выходной измеритель может быть отградуирован, например, в единицах твердости.

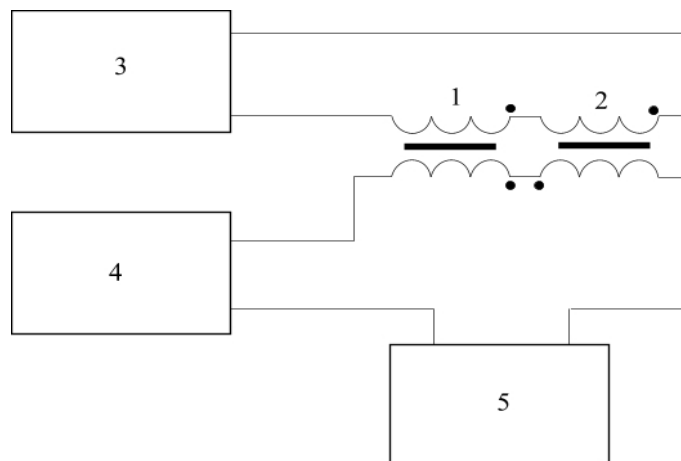


Рис. 9.12. Дифференциальная схема контроля детали по измерению магнитной проницаемости

9.8. Метод высших гармоник

При контроле структурного состояния ферромагнетиков методом высших гармоник (МВГ) создают переменное магнитное поле с амплитудой напряженности, достаточной для проявления нелинейных свойств материала объекта контроля. Из-за нелинейной связи напряженности намагничивающего поля с магнитной индукцией возникают искажения формы кривой индукции. Вихревые токи, наведенные в металле, оказывают экранирующее действие и внешнее переменное поле (а также соответствующая индукция) затухает с удалением от поверхности внутрь объекта контроля. Наводимая потоком индукции ЭДС измерительной катушки преобразователя несет информацию о нелинейных искажениях усредненного (по сечению) потока индукции. Взаимосвязь между намагничивающим полем $\mathbf{H} = \mathbf{f}(t)$, магнитными свойствами вещества, характеризуемыми петлей гистерезиса $\mathbf{B} = \mathbf{f}(\mathbf{H})$, средним (по сечению) потоком индукции $\mathbf{B} = \mathbf{f}(t)$ и ЭДС, наведенной в измерительной обмотке преобразователя $\mathbf{e} = \mathbf{f}(t)$, показана на рис. 9.13. ЭДС, наведенная в измерительной катушке, может быть представлена в виде ряда синусоидальных колебаний (ряда Фурье):

$$\mathbf{E}(t) = E_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + E_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + E_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots \quad (9.6)$$

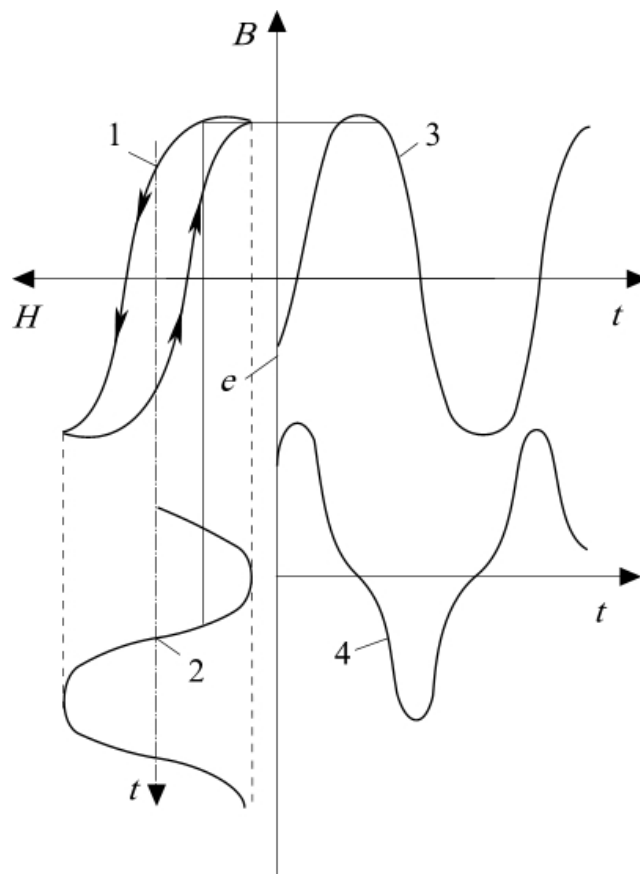


Рис. 9.13. Взаимосвязь между магнитными свойствами вещества, характеризуемыми петлей гистерезиса $B = f(H)$ (кривая 1), намагничивающим полем $H = f(t)$ (кривая 2), усредненным (по сечению) потоком индукции $B = f(t)$ (кривая 3) и ЭДС, наведенной в измерительной обмотке преобразователя $e = f(t)$ (кривая 4)

Члены этого ряда называются **гармониками** (гармоническими составляющими сигнала). Коэффициенты E_1, E_2, E_3 – амплитуды гармоник, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – их фазы. В зависимости от номера гармоники их принято делить на четные и нечетные. Специфическая особенность МВГ состоит в том, что в качестве информативных составляющих сигнала преобразователя (параметров сигнала, по которым оценивается структурное состояние объекта контроля) используются высшие гармонические составляющие (начиная со второй гармоники).

В методе высших гармоник достаточно четко сформировалось три основных направления, отличающиеся режимами возбуждения преобразователей:

- одночастотное возбуждение магнитного поля синусоидальным током;
- двухчастотное возбуждение синусоидальными токами разных частот (двухчастотный метод);

- возбуждение постоянным и синусоидальными токами (комбинированный режим возбуждения).

При одночастотном возбуждении магнитного поля синусоидальным током в качестве информативных составляющих используются нечетные гармоники (четные гармоники в спектре сигнала отсутствуют). С увеличением номера анализируемой гармонической составляющей уменьшается ее амплитуда. Это создает технические трудности при выделении гармоник для последующего анализа. Поэтому контроль при синусоидальном возбуждении проводится обычно с использованием третьей, реже пятой и седьмой гармоник.

В простейшем варианте анализируется амплитуда одной из гармоник, наиболее чувствительной к контролируемому параметру, однако при этом не достигается отстройка от мешающих факторов. Одна из особенностей МВГ – принципиальная возможность многопараметрового контроля, основанного на измерении нескольких гармонических составляющих. Одновременное использование нескольких гармонических составляющих сигнала существенно усложняет аппаратуру и методику настройки. Поэтому в МВГ обычно анализируется амплитуда и фаза выделенной гармонической составляющей (амплитудно-фазовый способ отстройки).

В сравнении с контролем по основной (первой) гармонической составляющей МВГ имеет ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при использовании и разработке аппаратуры, реализующей этот метод, так, например, на результаты контроля влияет наличие высших гармоник в намагничивающем токе (обусловленных не идеальностью применяемого генератора и усилителя мощности).

На амплитудно-фазовые соотношения гармонических составляющих большое влияние оказывают геометрические размеры объектов контроля (отношение длины l к диаметру d). При помещении цилиндрического тела во внешнее магнитное поле на его торцах образуются полюса, создающие внутри образца поле обратного направления по отношению к внешнему полю. С уменьшением отношения l/d размагничивающее поле увеличивается. Хотя из-за экранирующего действия вихревых токов влияние полюсов на краях образца меньше, чем в постоянных полях, уменьшение длины детали приводит к уменьшению напряженности поля на ее поверхности и качественно изменяет условия перемагничивания. В случае простого уменьшения напряженности поля можно было бы, увеличивая намагничивающий ток, добиться неизменной напряженности поля на поверхности, но при этом гармонический состав прежним не получается. Поэтому выбор режима тока возбуждения должен осуществляться с учетом отношения l/d объекта контроля.

9.9. Метод магнитных шумов

При перемагничивании ферромагнетиков наряду с плавными процессами изменения магнитного состояния материала значительную роль играют процессы скачкообразного изменения намагниченности. Это явление открыто в 1919 г. Баркгаузенем и носит его имя. Суть явления заключается в том, что один из основных процессов намагничивания заключается в смещении доменных границ между доменами. Для того, чтобы произошло смещение границ, необходимо преодолеть некоторый энергетический уровень - поле старта-, который различен для отдельных групп доменов. Поэтому при изменении намагничивающего поля доменные границы изменяются скачками. Объем ферромагнитного материала, перемагничиваемого за один скачок Баркгаузена, равен $10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ см}^3$. На рис. 9.14 показан участок основной кривой намагничивания, увеличенный в 10^6 раз, позволяющий увидеть ступенчатый характер кривой.

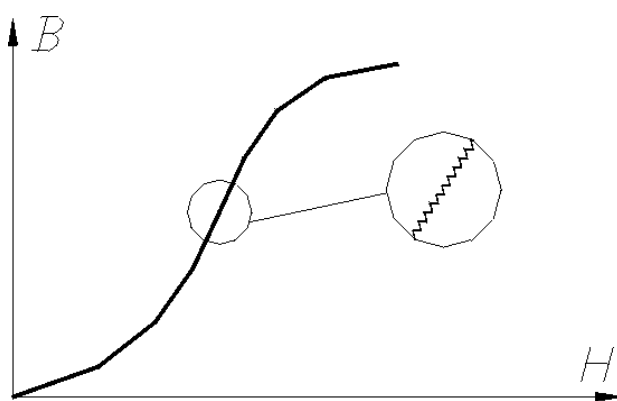


Рис. 9.14. Скачки Баркгаузена на кривой намагничивания

Параметры скачков Баркгаузена связаны с качеством материала, механической и термической обработкой, наличием микродефектов, включений, внутренних напряжений.

К исследуемым параметрам скачков Баркгаузена относятся:

1. Число скачков N за интервал времени.
2. Временные интервалы τ между скачками.
3. Форма и длительность скачков.
4. Спектральное распределение скачков.

Контроль по параметрам скачков Баркгаузена называется методом магнитных шумов. Достоинствами метода магнитных шумов является:

1. Возможность квазистатического намагничивания.
2. Возможность получения информации на уровне микроструктуры ферромагнитного изделия.

Блок-схема установки для определения параметров эффекта Баркгаузена показана на рис. 9.15. Генератор треугольного напряжения низкой частоты ГТН подключен к возбуждающей обмотке ω_B , выполненной в виде соленоида. Измерительные обмотки ω_{H1} и ω_{H2} включены дифференциально, напряжения с частотой тока возбуждения в них вычитаются, а спектры магнитных шумов суммируются, т. к. они обусловлены различными участками контролируемого изделия. Сигнал с измерительных обмоток поступает на фильтр высоких частот ФВЧ, который подавляет сигнал тока возбуждения (обычно частотой не выше 100 Гц) и пропускает сигналы магнитных шумов в частотном диапазоне $10^3 \dots 10^6$ Гц. Сигнал с выхода ФВЧ усиливается широкополосным услителем ШУ и анализируется осциллографом, спектральным анализатором СА. После прохождения через формирователь Ф, счетчик Сч считает количество импульсов за период перемагничивания.

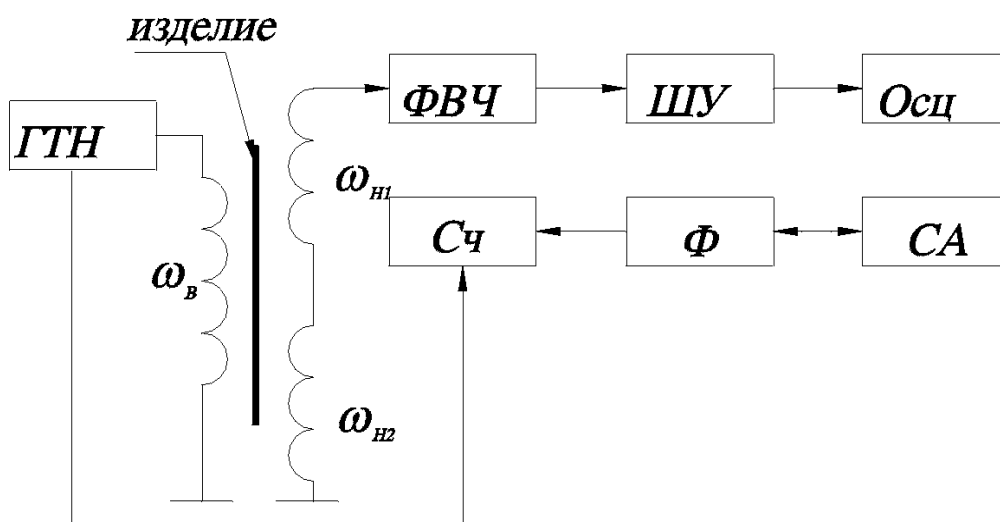


Рис. 9.15. Блок-схема установки для определения параметров шумов Баркгаузена

Современный магнитошумовой анализатор напряжений и структуры металлов Интроскан предназначен для перемагничивания объектов из ферромагнитных материалов и приема магнитного шума (шума Баркгаузена), возникающего в процессе их перемагничивания, обработки и вывода информации о спектральной плотности принимаемого магнитного шума.



Область применения анализатора: машиностроительная, авиа-

ционная, автомобильная, судостроительная и другие отрасли промышленности.

Анализатор используется для контроля внутренних механических напряжений, толщины упрочненного слоя, выявления шлифовальных прижогов, зон термического влияния и других физико-механических параметров ферромагнитных материалов и изделий при наличии корреляционной связи между шумами Баркгаузена и физико-механическими свойствами.

Достоинства:

- анализатор автоматически определяет тип подсоединённого датчика и подключает адекватное программное и аппаратное обеспечения;
- анализатор обеспечивает работу в комплекте с двухполюсным датчиком и осуществляет стабилизацию установленных параметров перемагничивания в одном из двух режимов:

а) $V = V_m \sin(\omega t)$

б) $I = I_m \sin(\omega t)$

При стабилизации в режиме а) достигается уменьшение влияния зазора между преобразователем и контролируемой поверхностью на результаты измерений;

- анализатор обеспечивает диапазон задания величин V_m и I_m от нуля до 200 относительных единиц, что обеспечивает генерацию магнитного шума практически во всех конструкционных материалах;
- анализатор позволяет задавать постоянную времени измерения от 0,1 до 10 сек. С увеличением постоянной времени измерения достигается повышение повторяемости результатов измерений;
- анализатор отображает на жидкокристаллическом цветном графическом дисплее все задаваемые параметры режима измерения, результаты измерения и тип подключенного к нему датчика;
- анализатор сохраняет все параметры последнего режима измерения и автоматически восстанавливает их при включении питания;
- анализатор позволяет сохранять результаты измерений (в том числе профиль сканирования поверхности) в энергонезависимой памяти, просматривать их и передавать в IBM совместимый компьютер. Связь обеспечивается по каналу RS-232 с помощью инфракрасного адаптера;
- анализатор обеспечивает компенсацию начального уровня сигнала, уменьшая тем самым влияние паразитных шумов;
- анализатор позволяет формировать калибровочные кривые и сохранять их в памяти при выключенном питании;
- управление работой анализатора производится с помощью клавиатуры и системного меню;

- анализатор может комплектоваться датчиками различных типов, обеспечивающих возможность контроля изделий с различной геометрией поверхности;
- анализатор обеспечивает как автоматическую, так и ручную адаптацию к уровню измеряемого шума.

9.10. Контроль напряженно-деформированного состояния металла

9.10.1. Внутренние напряжения, классификация и влияние на прочность материалов

Наиболее коварной причиной внезапных разрушений объектов являются **внутренние остаточные механические напряжения**, возникающие в детали, сварном соединении или конструкции в целом. Эти напряжения в сталях могут достигать предела текучести, а в алюминиевых и титановых сплавах 70...80 % предела текучести и часто оказываются более опасными в отношении снижения прочности, чем некоторые типы дефектов.

Остаточными напряжениями принято называть такие напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела, жесткого агрегата материалов, сборной или сварной конструкции после устранения причин вызвавших их появление. Эти напряжения всегда внутренние и их образование всегда связано с неоднородными линейными или объемными деформациями в смежных объемах материала, агрегата или конструкции.

Остаточные напряжения делят на три рода, классифицируя их по протяженности создаваемого ими силового поля:

- *первого рода* – возникающие в макроскопических объемах (в пределах детали или конструкции);
- *второго рода* – возникающие в микрообъемах (в пределах кристаллитов структуры металла);
- *третьего рода* – возникающие в ультрамикроскопических объемах (в пределах кристаллической решетки). Как сказано выше, остаточные напряжения относятся к внутренним напряжениям материала. Внутренние напряжения – это проявление процессов взаимодействия собственной внутренней энергии материала с энергией внешнего поля (силового, теплового и др.), воздействующего на материал, оформленный в виде конкретной детали или конструкции. Поэтому к внутренним напряжениям относятся также напряжения, которые возникают в материале эксплуатируемой детали или конструкции под действием внешних полей и определяют сопротивляемость материала внешним воздействиям – его

прочность. При этом, изменение и перераспределение внутренней энергии материала между ее составляющими под действием эксплуатационной нагрузки приводит к появлению «новых» остаточных напряжений.

Во избежание путаницы *целесообразно ввести следующую классификацию внутренних напряжений:*

- *технологические остаточные напряжения* – это напряжения, являющиеся следствием физических и физико-химических процессов, начинающихся в материале при изготовлении детали или конструкции и продолжающихся после изготовления;
- *нагрузочные напряжения* – это напряжения, возникающие в материале эксплуатируемой детали или конструкции как упругая реакция материала на внешнюю нагрузку, нагрузочные напряжения исчезают при снятии внешнего воздействия;
- *эксплуатационные остаточные напряжения* – это напряжения, являющиеся следствием процессов взаимодействия собственной внутренней энергии материала детали или конструкции с энергией внешнего поля, возникающие и накапливающиеся в материале в течение всего срока эксплуатации детали или конструкции;
- *рабочие напряжения* – это векторная сумма технологических, нагрузочных и эксплуатационных напряжений;
- *фактические напряжения* – это векторная сумма технологических и эксплуатационных напряжений, сложившаяся на момент проведения измерений.

Таким образом, *прочность, надежность и степень пригодности* сварных конструкций для использования по эксплуатационному назначению во многом определяются *наличием, характером и величиной рабочих и фактических внутренних напряжений*. Во многом, но далеко не во всем, и виной тому деградация материала в процессе длительной эксплуатации.

На стадии проектирования и строительства объектов механические свойства используемых конструкционных материалов известны с необходимой точностью, а при возможности экспериментального определения остаточных напряжений можно оценить и начальный ресурс прочности объекта. Причем, точность и достоверность оценки ресурса объекта на стадии его сооружения иногда недооценивается, ведь есть предпусковые испытания, а 15 или 20 лет ресурса не так важно – это еще далеко.

Но когда приблизился, а в ряде случаев уже наступил срок предполагаемого физического износа оборудования и конструкций, точность и достоверность оценки остаточного ресурса становятся, в пря-

мом смысле слова, жизненно важными. Вот здесь и приобретают острейшую актуальность методы определения остаточного ресурса ответственных объектов и методы продления сроков их безопасной эксплуатации с учетом реальных условий, часто приводящих к непредсказуемым изменениям свойств материала, к его деградации. А конечная стадия деградации материала – это уже вновь появившиеся дефекты, процесс «подрастания» которых в условиях эксплуатации конструкции из деградирующего материала слабо изучен и часто развивается лавинообразно, так что время, оставшееся до разрушения конструкции, оказывается неизвестным и часто слишком малым для предотвращения катастрофы.

Поэтому для получения достоверных результатов расчета остаточного ресурса прочности объектов, эксплуатируемых длительное время, *необходимо знать в первую очередь фактические механические характеристики материала и характеристики его напряженно-деформированного состояния*, сложившегося к настоящему времени в результате эксплуатации объекта. Без их знания бессмысленно требовать получения абсолютных величин внутренних напряжений, – их не с чем сравнивать.

Итак, при решении проблемы надежности объектов ответственного назначения последовательно возникали следующие задачи:

- определение остаточных напряжений;
- определение характера внутренних напряжений и величин составляющих;
- определение фактических механических характеристик материала и характеристик его напряженно-деформированного состояния.

Совершенно очевидно, что обеспечить такую возможность должны неразрушающие методы диагностики состояния конструкционных материалов.

Практически все методы диагностики напряженного состояния материалов или являются косвенными, или применяются как косвенные.

Идеологической основой косвенных методов является использование неких аппроксимирующих функций, полученных чаще экспериментальным и иногда теоретическим путем и отражающих объективно существующую связь регистрируемых изменений параметров используемого поля с фактически произошедшими изменениями состояния материала, обычно выражаемого отдельными механическими характеристиками или некой совокупностью его характеристик. Но поскольку эта связь, являясь следствием вторичных явлений преобразования внутренней энергии материала, сопровождающих процесс изменения его состояния, определяется многими факторами, то область право-

мерного применения косвенных методов, ограничивается адекватностью применяемых аппроксимирующих функций исследуемым процессам. При этом определить границы этой области если и возможно, то лишь качественно.

Главным и самым неприятным недостатком всех неразрушающих методов является то, что, позволяя с той или иной (пусть даже большой) погрешностью оценить величину напряжения, не дают возможности определить характер деформаций, вызываемых напряжениями, фактически существующими в материале, т. е. определить состояние материала (хрупкое или пластичное) и оценить насколько близко оно к критическим состояниям материала (текучести или разрушению). Причина в ограниченных информативных возможностях методов, традиционно использующих для измерений не более 4-х независимых информативных параметров физических полей, применяемых для диагностики.

9.10.2. Метод магнитной памяти металла [2,3]

Метод магнитной памяти металла – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПП), возникающих на изделиях и оборудовании в зоне концентрации напряжений (ЗКН) и дефектов металла. При этом СМПП отображают необратимое изменение намагниченности в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, а также структурную и технологическую наследственность деталей и сварных соединений после их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле, как правило, в поле Земли. В методе МПМ используются естественная намагниченность и последствие, которое проявляется в виде магнитной памяти металла к фактическим деформациям и структурным изменениям в металле изделий и оборудования.

Физические основы метода МПМ:

- магнитоупругий и магнитомеханические эффекты;
- эффект формирования доменов и доменных границ на скоплениях дислокаций в зонах концентрации напряжений (магнитопластика);
- эффект рассеяния магнитного поля структурными и механическими неоднородностями в условиях естественной намагниченности металла.

Магнитные параметры, используемые при контроле методом МПМ:

- нормальная и/или тангенциальная составляющая СМПП – H_p ;
- градиент магнитного поля по длине (dH_p/dx) или по базе между каналами измерений.

В металле и сварных соединениях методом МПМ контролируют НДС, неоднородность структуры и развивающиеся дефекты.

Методом МПМ определяют:

- зоны концентрации напряжений – основные источники развития повреждений;
- микро и макро-дефекты на поверхности и в глубинных слоях металла.

Достоинства и преимущества метода МПМ:

- не требуется какая-либо подготовка объекта контроля (зачистка и т. п.);
- не требуется специального намагничивания, т. к. используется естественная намагниченность, сформировавшаяся при изготовлении и эксплуатации изделий;
- метод МПМ может применяться как при работе объекта контроля, так и при его ремонте;
- метод МПМ – единственный метод НК, позволяющий в режиме экспресс-контроля определять с точностью до 1 мм зоны концентрации напряжений и дефекты на поверхности и в глубинных слоях металла изделий;
- при контроле методом МПМ используются малогабаритные приборы, имеющие автономное питание, регистрирующее устройство, микропроцессор и блок памяти до 32 Мб;
- для изделий машиностроения метод МПМ позволяет обеспечить 100 % контроль качества и их сортировку в поточном производстве;
- повышение эффективности и достоверности контроля в сочетании метода МПМ с традиционными методами НК

Отличия от традиционных методов НК (УЗК, МПД, рентген и др.):

- МПМ – это метод ранней диагностики усталостных повреждений и «преддефектного» состояния металла.
- МПМ – единственный метод, отвечающий на вопрос: «Откуда брать пробу металла?», при оценке ресурса оборудования.
- МПМ – это второй после АЭ пассивный метод, при котором используется информация излучения конструкций. При этом МПМ, кроме раннего обнаружения дефекта, дополнительно дает информацию о фактическом НДС и позволяет выявить причину развивающегося повреждения.

При контроле методом МПМ измеряются параметры собственных магнитных полей рассеяния от скоплений дислокаций в зонах концентрации напряжений в отличие от других известных магнитных методов, при использовании которых измеряют рассеяния на дефектах искусственно созданных магнитных полей.

Область применения метода ММП:

- контроль качества металла и сварных соединений изделий на заводах машиностроения;
- трубопроводы, сосуды, оборудование, любые конструкции и изделия (из ферромагнитного и парамагнитного аустенитного материала) во всех отраслях промышленности при изготовлении, ремонте и эксплуатации;
- грузоподъемные и вращающиеся механизмы;
- исследование механических свойств металла в лабораторных условиях.

ММП-контроль решает одновременно две практические задачи:

- выполняет оценку напряженно-деформированного состояния сварного соединения с выявлением зон концентрации остаточных напряжений – основных источников развития повреждений;
- сокращает объем контроля традиционными методами (УЗД, рентген) и повышает эффективность неразрушающего контроля сварных соединений.

Во многих отраслевых документах (тепловая и атомная энергетика, химическое машиностроение и другие отрасли) имеется требование о контроле остаточных сварочных напряжений, например, до и после термической обработки. Однако из-за отсутствия методов контроля, пригодных для практики, это требование, как правило, не выполняется. ММП-контроль направлен на решение указанной задачи.

Из анализа известных магнитных методов вытекают следующие обязательные условия их применения. Во-первых, обязательно используются намагничивающие устройства, и, во-вторых, известные магнитные методы могут применяться эффективно лишь при условии, что места концентрации напряжений и дефектов в объекте контроля заранее известны. Кроме того, известные магнитные методы контроля, как правило, требуют зачистки металла и других подготовительных операций. Очевидно, что использование традиционных магнитных методов контроля в протяжённых конструкциях и на оборудовании при таких условиях практически невозможно. Например, специально намагнитить трубную систему, общая протяжённость которой на современном энергетическом котле достигает 500 км, задача нереальная. Знать заранее места концентрации напряжений (основные источники развития повреждений) на каждой трубе котла не представляется возможным из-за влияния на их образование различных технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов.

В тоже время известно, что большинство металлоконструкций и оборудования, изготовленных из ферромагнитных материалов, под

действием рабочих нагрузок подвержены «самонамагничиванию» во внешнем магнитном поле (рис. 9.16).

Если в каком-то месте конструкции действует циклическая нагрузка σ , и есть внешнее магнитное поле (например, поле Земли), то в этом месте происходит рост остаточной индукции и остаточной намагниченности.

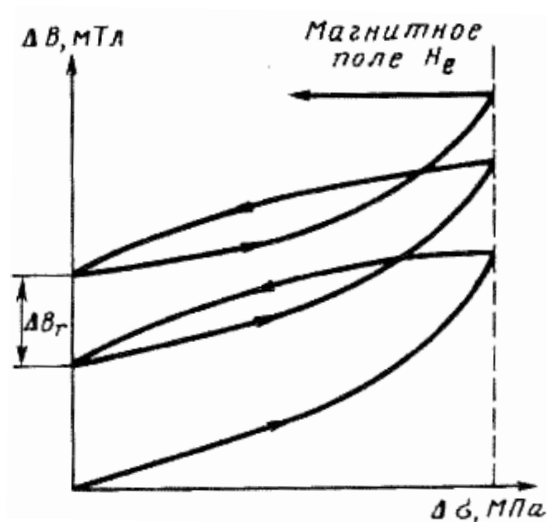


Рис. 9.16

Схема действия магнитоупругого эффекта: ΔB_r – изменение остаточной индукции; $\Delta \sigma$ – изменение циклической нагрузки; H_e – внешнее магнитное поле

С явлением «самонамагничивания» оборудования и конструкций повсеместно борются (судостроение, энергетика, шарикоподшипниковая и другие отрасли). Изучив это явление намагничивания на примере работы котельных труб, было впервые предложено использовать его для целей технической диагностики. При «самонамагничивании» оборудования и конструкций проявляются различные эффекты магнитострикции. Однако используется при новом методе контроля последствие (во всех разновидностях эффектов магнитострикции), которое проявляется в виде магнитной памяти металла к фактическим деформациям и структурным изменениям в металле оборудования.

9.10.3. Приборы для проведения контроля методом МПМ

ИКН – система измерения, регистрации и обработки данных диагностики НДС оборудования и конструкций с использованием метода МПМ.

Приборы типа ИКН (рис. 9.17 и 9.18) выпускаются серийно. По принципу работы они являются специализированными многоканаль-

ными феррозондовыми магнитометрами. Напряженность магнитного поля H_p на шкалах приборов проградуирована в амперах на метр. Длина регистрируемого перемещения датчика проградуирована в миллиметрах. В этой линейке приборов есть еще две модели – ИКН-3М-12 и ИКН-4М-16. Сравнительные характеристики приборов типа ИКН приведены в табл. 9.1.



Рис. 9.18. Измеритель концентрации напряжений ИКН-2М-8



Рис. 9.17. Измеритель концентрации напряжений ИКН-1М-4

Приборы типа ИКН являются средствами измерений и имеют ряд существенных отличий от производимых в России и за рубежом изме-

рителей напряженности магнитного поля (магнитометров) на основе феррозондовых преобразователей.

Таблица 9.1

Сравнительные характеристики приборов типа ИКН

	ИКН-1М-4	ИКН-2М-8	ИКН-3М-12	ИКН-4М-16
Количество каналов измерения H_p	2...4	2...8	2...12	2...16
Микропроцессор	8 бит	16 бит	16 бит	16 бит
Оперативная память	128 Кб	1 Мб	1 Мб	1 Мб
Flash-память	4 Мб	32 Мб	32 Мб	32 Мб
Клавиатура	45 кнопок	14 кнопок	45 кнопок	45 кнопок
Экран	ЖК, 128×64 точек	ЖК, 320×240 точек	ЖК, 320×240 точек	ЭЛ, 320×240 точек
Габаритные размеры	230×105×40 мм	243×120×40 мм	230×110×23 мм	290×205×55 мм
Масса с аккумуляторными батареями	0,5 кг	0,6 кг	0,6 кг	2,0 кг
Питание от аккумуляторов	DC 4,8В = = 4×1,2В	DC 7,2В = = 6×1,2В	DC 12В	DC 9,6В = = 8×1,2В

На рис. 9.19 показан образец записи магнитограмм на экране прибора ИКН-1М-4 по результатам контроля 2-й ступени пароперегревателя котла № 7 Томской ГРЭС-2 методом магнитной памяти. Была выявлена труба, в сварном соединении которой обнаружился резкий изменения напряженности магнитного поля по длине.

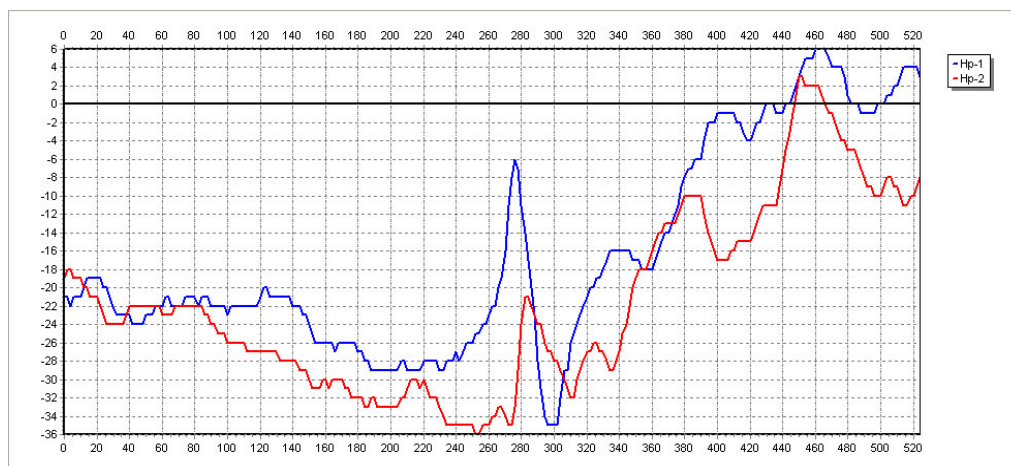


Рис. 9.19. Пример записи магнитограмм на экране прибора ИКН-1М-4

При расшифровке радиографических снимков опасной зоны установлено, что в стыке трубы имеется непровар корня шва длиной около 20 мм, что и явилось причиной намагниченности этого участка трубы.

Список литературы к главе 9

1. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: УрОРАН, 1996. ISBN 5-7691-0655-7.
2. Дубов А.А., Дубов Ал. А., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти (ММП) металла и приборы контроля: учебное пособие. – М.: ЗАО «Тиссо», 2003. – 320 с. – С. 3–4, 290–297.
3. Дубов А.А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 112 с.: ил. – С. 3–65.

ГЛАВА 10. АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПО РОССИЙСКИМ И МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ

10.1. 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»[1]. 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 положе-

ний 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 мегапаскаля или при температуре нагрева воды более 115 градусов Цельсия;
- 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 [2]. 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) Правилах аттестации персонала в области неразрушающего контроля;
- 2) Правилах аттестации лабораторий неразрушающего контроля;
- 3) Правилах аттестации методических документов по неразрушающему контролю;
- 4) Правилах аттестации средств неразрушающего контроля.

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

10.2. Аттестация специалистов в области неразрушающего контроля по правилам Ростехнадзора (ПБ 03-440-02) [3]

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 расширился 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 уровни с оформлением соответствующих протоколов.

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

10.2.1. 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, спе-

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 состоит 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.

10.2.2. Квалификационные требования к персоналу в области неразрушающего контроля

10.2.2.1. 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.

10.2.2.2. 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.

10.2.2.3. 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.

10.2.2.4. 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 следующих вопросах:

- 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 аппара-

туры, 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.

10.2.2.5. 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.

10.2.2.6. 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.

10.2.2.7. Специалист III уровня квалификации должен уметь

- определить 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.

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

10.2.4. 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 и 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 и 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.

10.2.5. 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.

10.3. Аттестация специалистов по международному стандарту EN473 [4]

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 и ISO 9712 [5], 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 деления 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 (manufacturing);
- контроль в процессе изготовления, эксплуатации, ремонта (pre and in service testing, which includes manufacturing);
- железнодорожное оборудование (railway maintenance);
- аэрокосмическая промышленность (aerospace).
- так и **сектора продукции**:
- **c** – отливки (castings);
- **f** – поковки (forgings);
- **t** – трубы (tube and pipes);
- **w** – сварные соединения (welds);
- **wp** – прокат (wrought products).

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

Для подготовки к аттестации на международный уровень по магнитному контролю, необходимо знание общих нормативных документов и документов в области магнитного контроля, которые действуют на сегодняшний день в странах Евросоюза. Европейский стандарт EN 1330-1: 1998 [6] и EN 1330-2: 1998 [7] содержит список основных терминов и определений в области неразрушающего контроля на английском, немецком и французском языках. Европейский стандарт EN 1369: 1996 [8] описывает общую технологию контроля, классификацию дефектов по их геометрии и принятую систему буквенных обозначений дефектов. Общая технология магнитопорошкового контроля описана в серии из трех стандартов серии ISO. Первый из них – ISO 9934-1 [9] рассматривает методы и процедуру намагничивания. Второй – ISO 9934-2 [10] рассматривает технологию применения порошков и суспензий и требования к ним. Третий – ISO 9934-3 [11] также посвящен процедурам намагничивания (включая применение портативных электромагнитов) и размагничивания. В стандарте EN 10228 -1: 1999 [12] даны условия магнитного контроля стальных поковок.

Контрольные вопросы к главе 10

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 градусов Цельсия?
 - 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 выше указанных.
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 %.

Список литературы к главе 10

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2001. – 28 с.
2. Система неразрушающего контроля. Аттестация лабораторий: Сборник документов. Серия 28. Выпуск 01/ Колл. Авт. – 2-е изд. Испр. и доп. – М.: ГУП «НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 104 с.
3. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля. ПБ 03-440-02.
4. EN473. Qualification and certification of NDT personnel – General principles.
5. ISO 9712. Nondestructive testing – Qualification and certification of personnel. ISO 2005.
6. EN 1330-1: 1998. Non-destructive testing – terminology. Part 1: List of general terms.
7. EN 1330-2: 1998. Non-destructive testing – terminology. Part 1: List of general terms.
8. EN 1369: 1996. Founding – Magnetic particle inspection.
9. ISO 9934-1: 2002. Non – destructive testing – Magnetic particle testing. Part 1: General principles.
10. ISO 9934-2: 2002. Non – destructive testing – Magnetic particle testing. Part 2: Detection media.
11. ISO 9934-3: 2002. Non – destructive testing – Magnetic particle testing. Part 3: Equipment.
12. EN 10228 -1: 1999. Non-destructive testing of steel forgings.

ГЛАВА 11. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

При проведении работ по дефектоскопии должны соблюдаться общие требования к безопасности проведения магнитопорошкового контроля по **ГОСТ 12.3.002-75** [1] и требования электробезопасности по **ГОСТ 12.2.007.0-75** [2], **ГОСТ 12.1.019-79** [3] соответственно «Правилам устройства электроустановок потребителей» и «Правилам технической эксплуатации электроустановок и правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденных Госгортехнадзором. При организации работ по дефектоскопии должны соблюдаться требования по защите от пожаров по **ГОСТ 12.1.004-91** [4] и от взрывов по **ГОСТ 12.1.010-76** [5].

Требования по защите от вредного воздействия постоянных магнитных полей должны соответствовать «Предельно допустимым уровням воздействия постоянных магнитных полей при работе с магнитными устройствами и магнитными материалами» **№ 1742-77**, утвержденными Минздравом СССР. Предельно допустимые уровни магнитных полей промышленной частоты нормируются по **СН № 3206-85** «Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц».

При проведении контроля должны соблюдаться: требования безопасности по содержанию вредных веществ, температуре, влажности, подвижности воздуха в рабочей зоне по **ГОСТ 12.1.005-88** [6] и **ГОСТ 12.1.007-76** [7]; требования к вентиляционным системам по **ГОСТ 12.4.021-75** [8]; требования к индивидуальным средствам защиты по **ГОСТ 12.4.068-79** [9].

При проведении контроля способом циркулярного намагничивания (методом пропускания тока через изделие) запрещено использовать керосиновую и керосино-масляную суспензию. Включение и выключение намагничивающего тока производится только при надежном контакте электродов с поверхностью изделия с целью исключения искрений и образования поверхностных дефектов в зоне искрений. Во избежание попадания искр на лицо и руки контролера, необходимо одевать очки и перчатки.

Перед включением дефектоскопа контролер визуальным способом должен убедиться в наличии заземления (**ГОСТ 12.1.030-81** [10]). Необходимо обратить внимание что, в отличие от большинства слаботочных приборов и установок, сечение медного провода для заземления магнитопорошковых дефектоскопов должно быть не менее 10 мм². При обнаружении неисправности дефектоскопического оборудования

или в случае замыкания тока на корпус, работу по контролю прекратить и вызвать дежурного электрика для ликвидации неисправности.

При работе во влажных помещениях напряжение питания источника намагничивания и осветительных ламп не должно превышать 36 вольт, а при работе внутри металлических сосудов – 12 В. Работающие внутри сосуда контролеры должны быть изолированы от металлических поверхностей резиновым ковриком.

Опасными и вредными производственными факторами при проведении магнитопорошкового контроля являются:

- перемещение заготовок, полуфабрикатов;
- повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей среды;
- повышенная напряженность магнитного поля;
- ультрафиолетовое излучение.

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны установлены по **ГОСТ 12.1.005-88** [11]:

- ацетон – 200 мг/м³;
- керосин – 300 мг/м³;
- железа окись (порошок) – 6 мг/м³;
- катализатор ЭО-41 – 5 мг/м³.

Указанные вещества оказывают вредное воздействие на органы дыхания, органы зрения, незащищенные участки кожных покровов работающих контролеров, если их концентрация выше предельно допустимой. Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны должно периодически контролироваться. Места отбора проб воздуха, а также периодичность контроля, должны быть установлены графиком, согласованным с местными органами санитарного надзора. Основные требования, предъявляемые к производственным помещениям для проведения магнитопорошковой дефектоскопии, приведены в табл. 11.1

К работе по проведению магнитопорошковой дефектоскопии допускаются лица, не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование в соответствии с приказом Министерства здравоохранения № 700, обученные по специальной программе и прошедшие аттестацию в соответствии с Правилами аттестации персонала в области неразрушающего контроля **ПБ 03-440**, а также обученные и инструктированные в соответствии с действующим «Положением о порядке проведения инструктажа и обучения работающих безопасности труда», аттестованных не ниже второй группы по электробезопасности.

К самостоятельной работе контролеры допускаются после обучения и стажировки в течении пяти смен. К работе, связанной с осмотром и разбраковкой изделий, допускаются лица, не имеющие противопоказаний, указанных в приказе Министра здравоохранения № 700.

Таблица 11.1

Наименование работы, операции	Группа санитарной характеристики по СНиП П-92-76	Категория производственного процесса по СН-463-74	Класс производственного помещения по ПУЭ-76, СНиП П-90-81
Подготовка поверхности объекта к контролю (удаление масла, пыли, грязи и т. д.)	Шб	В	В1б
Намагничивание	Шб	А	В1б
Нанесение суспензии на объект контроля	Шб	В	В1б
Осмотр и оценка результатов контроля	Пг	Д	–

При проведении люминесцентного магнитного контроля все работники должны руководствоваться «Гигиеническими требованиями к конструированию и эксплуатации установок с искусственными источниками ультрафиолетового излучения для люминесцентного контроля качества промышленных изделий».

Магнитопорошковые дефектоскопы следует устанавливать в отдельном помещении площадью не менее 15 м² или в общем технологическом потоке, защищенном от попадания пыли, стружки и т. д. Рабочие места контролеров на участке контроля должны быть снабжены диэлектрическими ковриками, поверяемыми в соответствии с требованиями безопасности по **ГОСТ 21105-87** [12].

Все участки должны быть оборудованы общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией. Забор воздуха производится из нижней зоны.

Рабочие места для приготовления магнитогуммированной массы МГМ-2, сушильные камеры для изделий со вставками из массы МГМ-2 должны быть оборудованы местной вытяжной вентиляцией. Устройство, эксплуатация общеобменной и местной вытяжной вентиляции должны отвечать требованиям **СНиП П-33-75**. Вентиляция при работе с керосиновой суспензией должна обеспечивать пятикратный обмен воздуха.

При размещении оборудования должны соблюдаться следующие требования:

- соленоид размагничивания должен быть ориентирован в направлении запад-восток;
- участки магнитного контроля должны быть расположены друг от друга на расстоянии, обеспечивающем напряженность магнитного поля не более 400 А/м (5 Э);
- детали и заготовки из магнитомягких материалов (например, трансформаторное железо и др.) должны находиться на расстоянии не менее 1 м от дефектоскопов.

Дефектоскопист должен проводить работы на дефектоскопах таким образом, чтобы максимальная напряженность постоянных магнитных полей, воздействующих на организм человека, не превышала 80 А/см (100 Э). Кнопки управления магнитными установками должны быть вынесены за пределы зоны, имеющей напряженность магнитного поля более 80 А/см.

Для транспортирования деталей в зону намагничивающих устройств, напряженность магнитного поля в которых превышает 80 А/см, необходимо использовать специальные тележки, диэлектрические клещи и дистанционные манипуляторы, исполнительный орган которых (захват) должен быть выполнен из неферромагнитных материалов. Изделия, поступающие на контроль, и проверенные изделия должны быть размещены на стеллажах, выполненных из немагнитных материалов. Тележки, применяемые для транспортировки деталей, проверяемых СОН, должны быть выполнены из немагнитных материалов.

Рабочие столы и стеллажи для осмотра проверенных деталей должны иметь гладкие прочные покрытия для надежного удаления остатков масла, керосина и пыли. Количество материалов, отпускаемых на рабочие места, не должно превышать нормы, установленной технологическим процессом на одну рабочую смену.

Отработанные реактивы должны утилизироваться в специально отведенные органами санитарного надзора емкости. Жидкие и твердые отходы следует собирать раздельно в специально изготовленную тару из неискрящих и негорючих материалов. Тара должна иметь плотно закрываемые крышки с обозначением вида отходов (жидкости, твердые отходы) и быть окрашена в оранжевый цвет.

Контролеры, применяющие магнитопорошковый метод контроля, должны быть обеспечены специальной одеждой и защитными средствами в соответствии с «Типовыми нормами бесплатной выдачи спецодежды, спецобуви и других средств индивидуальной защиты».

При использовании сухого способа магнитопорошковой дефектоскопии контролеров необходимо обеспечить:

- очками типа «0» по **ГОСТ 12.4.013-97** [13];

- респираторами ШБ-1 «Лепесток» по **ГОСТ 12.4.028-76** [14];
- хлопчатобумажными халатами;
- перчатками резиновыми техническими типа II по **ГОСТ Р 50435**, анатомическими по **ТУ 38-106140-76** или дерматологические средства индивидуальной защиты (защитные мази и пасты) в соответствии с **ГОСТ 12.4.068**;
- обувью по **ГОСТ 12.4.103-83** [15].

Контролеры, применяющие суспензии магнитного порошка, кроме спецодежды и средств защиты должны быть обеспечены фартуками из непроницаемого материала по **ГОСТ 12.4.029-76** [16].

При осмотре контролируемой поверхности в ультрафиолетовом излучении, в случае отсутствия встроенных устройств, обеспечивающих защиту контролера от вредного воздействия ультрафиолетовых лучей, следует применять защитные очки типа 38 по **ГОСТ 12.4.013-97** [13] со светофильтрами из цветного оптического стекла типа Ж-4 толщиной не менее 2 мм по **ГОСТ 9411-81** [17].

Периодичность очистки вентиляционных выбросов устанавливается в зависимости от их количества по согласованию с местными органами санитарного надзора.

В технологической документации, разработанной предприятием-изготовителем, необходимо указывать требования безопасности в соответствии со стандартом.

Участки магнитопорошкового контроля должны быть обеспечены следующим оборудованием и приспособлениями:

- механизмами для перевозки, подъема и поворота контролируемой детали;
- распределительным электрическим щитом, имеющим предохранительные устройства и измерительные приборы;
- местной приточной и вытяжной вентиляцией;
- общим и местным освещением;
- поддонами из нержавеющей стали для сбора пролитой и отработанной суспензии;
- дефектоскопом;
- комплектом контрольных образцов;
- стеллажами для хранения образцов и проверяемых деталей, шкафом для хранения дополнительной дефектоскопической аппаратуры и оснастки;
- столом для оформления и хранения документации;
- комплектом плакатов по технике безопасности;
- респиратором ШБ-1 «Лепесток» по **ГОСТ 12.4.028-76** [14];
- шкафом для хранения специальной одежды и обуви.

Литература к главе 11

1. ГОСТ 12.3.002-75. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности.
2. ГОСТ 12.2.007.0-75. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.
3. ГОСТ 12.1.019-79. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
4. ГОСТ 12.1.004-91. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.
5. ГОСТ 12.1.010-76. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность. Общие требования.
6. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
7. ГОСТ 12.1.007-76. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
8. ГОСТ 12.4.021-75. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования.
9. ГОСТ 12.4.068-79. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты дерматологические. Классификация и общие требования.
10. ГОСТ 12.1.030-81. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
11. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
12. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
13. ГОСТ Р 12.4.013-97. Система стандартов безопасности труда. Очки защитные. Общие технические условия.
14. ГОСТ 12.4.028-76. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Респиратор ШБ-1 «Лепесток». Технические условия.

15. ГОСТ 12.4.103-83. Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация.
16. ГОСТ 12.4.029-76. Межгосударственный стандарт. Фартуки специальные. Технические условия.
17. ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия.

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	22
1.4. Дефекты усталостного происхождения	25
Контрольные вопросы к главе 1	33
Список литературы к главе 1	34
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ	35
2.1. Основные параметры магнитного поля	35
2.2. Магнитные свойства материалов	37
2.3. Физические основы магнитной дефектоскопии	46
2.3.1. Общие положения	46
2.3.2. Соотношение с другими методами контроля	47
2.3.3. Физические основы магнитной дефектоскопии	48
2.3.4. Выявление магнитного поля рассеяния дефекта с помощью ферромагнитных частиц	49
Контрольные вопросы к главе 2	51
Список литературы к главе 2	52
ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТО-ПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ	53
3.1. Методы создания и расчета магнитных полей	53
3.1.1. Магнитное поле. Закон Био-Савара-Лапласа (Biot-Savart-Laplace)	53
3.1.2. Поле прямого провода с током	54
3.1.3. Поле кругового тока	55
3.1.4. Поле на оси соленоида	56

3.1.5.	Поле проводника конечного сечения	58
3.2.	Намагничивание тел. Поле рассеяния дефекта	59
3.2.1.	Намагничивание тел	59
3.2.2.	Особенности поведения ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях	59
3.2.3.	Размагничивающее действие полюсов образца	60
3.2.4.	Поле рассеяния дефекта (Leakage Field Of Flaw)	64
3.2.5.	Способы намагничивания тел	68
3.2.6.	Способы размагничивания (methods of demagnetizing) тел	75
3.3.	Магнитопорошковая дефектоскопия	78
3.3.1.	Технология магнитопорошковой дефектоскопии	78
3.3.2.	Технология контроля сварных соединений	87
3.4.	Магнитопорошковые дефектоскопы	91
	Контрольные вопросы к главе 3	94
	Список литературы к главе 3	97
ГЛАВА 4. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ		
МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ		
		98
4.1.	Общие сведения	98
4.2.	Контроль качества магнитных порошков и суспензий	99
4.3.	Контроль параметров намагничивающих устройств	101
4.3.1.	Измерение напряженности магнитного поля	101
4.3.2.	Измерение тока циркулярного намагничивания	102
4.4.	Контроль параметров осветительных устройств	103
4.5.	Метрологическое обеспечение магнитопорошковых дефектоскопов	103
	Контрольные вопросы к главе 4	113
	Список литературы к главе 4	116
ГЛАВА 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ		
И ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО		
ПРОЦЕССА МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ		
		117
5.1.	Общие положения	117
5.2.	Технологические карты в неразрушающем контроле	117

5.3. Программа «Эксперт» для автоматизированной разработки технологических карт магнитопорошковой дефектоскопии	119
Список литературы к главе 5	122
ГЛАВА 6. ИНДУКЦИОННАЯ И ФЕРРОЗОНДОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ	123
6.1. Основы индукционного контроля	123
6.1.1. Индукционные преобразователи	123
6.1.2. Способы намагничивания деталей в индукционном контроле	127
6.2. Основы феррозондового контроля	133
6.2.1. Конструкция феррозондового преобразователя	133
6.2.2. Формирование и преобразование сигнала в феррозондовых дефектоскопах	136
Список литературы к главе 6	139
ГЛАВА 7. МАГНИТОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ	140
Список литературы к главе 7	146
ГЛАВА 8. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ	147
8.1. Общие положения	147
8.2. Пондеромоторные магнитные толщиномеры	149
8.3. Магнитостатические толщиномеры	150
8.4. Индукционные толщиномеры	151
Список литературы к главе 8	153
ГЛАВА 9. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ	154
9.1. Общие положения	154
9.2. Основные сведения о магнитном структурно-фазовом анализе	156
9.3. Основные способы термической обработки	158
9.4. Некоторые закономерности магнитного структурно-фазового анализа	161
9.5. Принцип измерения коэрцитивной силы. Коэрцитиметры с приставным электромагнитом и коэрцитиметры с соленоидом	164

9.6.	Приборы контроля механических свойств по остаточной индукции и магнитной проницаемости	168
9.7.	Приборы для контроля физико-механических свойств материала, действие которых основано на измерении магнитной проницаемости	171
9.8.	Метод высших гармоник	172
9.9.	Метод магнитных шумов	175
9.10.	Контроль напряженно-деформированного состояния металла	178
9.10.1.	Внутренние напряжения, классификация и влияние на прочность материалов	178
9.10.2.	Метод магнитной памяти металла	181
9.10.3.	Приборы для проведения контроля методом МПМ	184
	Список литературы к главе 9	187
ГЛАВА 10. АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ПО РОССИЙСКИМ И МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ		188
10.1.	Общие положения. Понятие об опасном производственном объекте	188
10.2.	Аттестация специалистов в области неразрушающего контроля по правилам Ростехнадзора (ПБ 03-440-02)	190
10.2.1.	Требования к общей и специальной подготовке персонала в области неразрушающего контроля	192
10.2.2.	Квалификационные требования к персоналу в области неразрушающего контроля	193
10.3.	Аттестация специалистов по международному стандарту EN473	199
	Контрольные вопросы к главе 10	200
	Список литературы к главе 10	203
ГЛАВА 11. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ		204
	Литература к главе 11	209

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 10

№ вопроса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

Учебное издание

ТОЛМАЧЕВ Игорь Иванович

МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Учебное пособие

Научный редактор профессор, д.т.н.,
заведующий кафедрой физических методов
и приборов контроля качества ТПУ *О.А. Сидуленко*

Издано в авторской редакции


Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки *О.Ю. Аршинова*

Подписано к печати 28.09.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 12,56. Уч.-изд. л. 11,36.
Заказ ___-11. Тираж 35 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru