

**В.А. БЕЛЕВИТИН, Е.Н. СМИРНОВ,
М.Л. ХАСАНОВА**

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ



**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет»

**В.А. БЕЛЕВИТИН, Е.Н. СМИРНОВ,
М.Л. ХАСАНОВА**

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

СПРАВОЧНОЕ ПОСОБИЕ

**Челябинск
2021**

УДК 629.017 (075)

ББК 34.2я73

Б43

Белевитин, В.А. Неразрушающий контроль металлических изделий : справочное пособие / **В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов, М.Л. Хасанова**. – Челябинск : Изд-во Южно.-Урал. гос. гуманитар.-пед. ун-та, 2021. – 59 с. – Текст непосредственный.

ISBN 978-5-907409-41-5

Справочное пособие посвящено описанию наиболее распространённых методов неразрушающего контроля металлических изделий применительно к деталям автомобильного транспорта. Пособие включает общие и специфические сведения о технологически обусловленных местах образования скрытых дефектов в процессах пирометаллургического производства и разливки стали, отливки и обработки стальных заготовок давлением в процессах прокатки,ковки и штамповки. Приводятся описания методов неразрушающего физического контроля металлических изделий применительно к деталям автомобильного транспорта: магнитного, ультразвукового и вихретокового с примерами, иллюстрирующими разновидности этих методов.

Рекомендуется студентам, обучающимся по программе бакалавриата профильной направленности «Транспорт» направления «Профессиональное обучение (44.03.04)».

Рецензенты: М.С. Дмитриев, д-р. техн. наук, доцент

К.Н. Семендяев, канд. техн. наук

ISBN 978-5-907409-41-5

© В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов,

М.Л. Хасанова, 2021

© Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПОНЯТИЯ О ДЕФЕКТАХ И ДЕФЕКТНОЙ ПРОДУКЦИИ НА СТАДИИ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	7
1.1. Общие сведения о дефектосопутствующих эффектах в процессе производства и разливки стали.....	7
1.1.1. Технологически обусловленные места образования скрытых дефектов в процессе производства стали.....	7
1.1.2. Технологически обусловленные места образования скрытых дефектов в процессе разливки стали и отливке заготовок металлических изделий.....	20
1.1.3. Технологически обусловленные места образования скрытых дефектов при обработке металлических заготовок давлением.....	23
Контрольные вопросы.....	27
ГЛАВА 2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....	28
2.1. Магнитный контроль.....	28
2.1.1. Феррозондовый метод контроля: основные понятия и технология.....	28
2.1.2. Магнитопорошковый метод контроля: основные понятия и технология.....	34
2.2. Ультразвуковой контроль	41
Контрольные вопросы.....	47
2.3. Вихретоковой контроль	48
Контрольные вопросы.....	52
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	53

ВВЕДЕНИЕ

Развитые страны ежегодно теряют (в т.ч. в авариях и катастрофах) 10 % своего национального дохода из-за низкого качества выпускаемой продукции. Потери только от дефектов усталости металла в США составляют более 100 млрд долл. в год, а от коррозии – более 200 млрд долл. в год. Убытки от низкого качества материалов и изделий в России значительно выше.

Производственные процессы, осуществляемые при изготовлении, эксплуатации и ремонте автотранспортных средств, их несовершенства и различные технико-технологические нарушения влияют на появление отказов узлов и деталей механизмов автотранспортных средств. На стадии изготовления и проектирования изделий (деталей) их узлов и механизмов возможны просчеты проектировщиков; использование недоброкачественного материала как результата несовершенств металлургического производства; проявления технико-технологических нарушений процессов термо- и металлообработки, сборки. На этапе эксплуатации происходят нарушения условий эксплуатации, технологии обслуживания, а также длительное нагружение деталей и узлов механизмов автотранспортных средств переменными нагрузками, приводящими к их усталостной прочности, а на стадии ремонта – нарушения технологических режимов выполнения ресурсовосстановительных работ с использованием несовершенных технологических процессов, ремонтного оборудования, технологической

оснастки и и пр. Различные нарушения на этих этапах в итоге приводят к появлению скрытых и явных дефектов.

В целях оценки качества и пригодности металлопродукции без нарушения ее состояния применяется неразрушающий контроль (НК) – эффективное, а в ряде случаев единственно возможное средство предотвращения нарушений гарантированно-безопасной эксплуатации подвижного состава автотранспортных средств.

В настоящее время чаще используют понятие «система НК», которое включает в себя совокупность технических средств, физических методов, технологий и условий проведения НК с целью обнаружения недопустимых дефектов в объекте контроля (ОК), а также персонала, осуществляющего НК и оценку качества ОК.

Цель учебного пособия – ознакомить студентов с методами НК: ультразвуковой дефектоскопии, магнитными и вихретоковыми как наиболее распространёнными методами неразрушающего контроля металлических изделий применительно к деталям автомобильного транспорта.

ГЛАВА 1. ПОНЯТИЯ О ДЕФЕКТАХ И ДЕФЕКТНОЙ ПРОДУКЦИИ НА СТАДИИ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сталь – это один из самых востребованных и важных конструкционных материалов, использующихся при конструировании автотранспортных средств. Ежегодный спрос на данный железоуглеродистый материал ($Fe-C$ -сплав) непрерывно растет. Сегодня производство стали – самого распространенного сплава в промышленности – развито достаточно хорошо. Производство стали – второй этап двухстадиальной схемы извлечения железа из руд путем пирометаллургического передела чугуна и металлоотходов (скрап, металлолом и пр. металлоотходы) в сталь, сочетающий в себе химические и технологические принципы, целый перечень специализированных операций, которые используются для получения качественного металла, дальнейший передел которого включает технологические процессы литья, обработки давлением и резанием на заключительной стадии производства металлических изделий – узлов и деталей механизмов автотранспортных средств. Эта отрасль металлургического машиностроения считается одной из самых сложных и трудоемких.

1.1. Общие сведения о дефектосопутствующих эффектах в процессе производства и разлива стали

1.1.1. Технологически обусловленные места образования скрытых дефектов в процессе производства стали

В целом пирометаллургические процессы получения стали включают извлечение железа из руд посредством доменной плавки с получением передельного чугуна и последующего его передела в сталь посредством преимуще-

ственно наиболее распространенным конвертерным способом (рис. 1.1) уменьшения в нем содержания углерода, удаления примесей и добавления необходимого количества легирующих добавок – строго определенных элементов, добавляемых в заданном количестве в обеспечение необходимых физико-механических, эксплуатационных и других свойств стали.

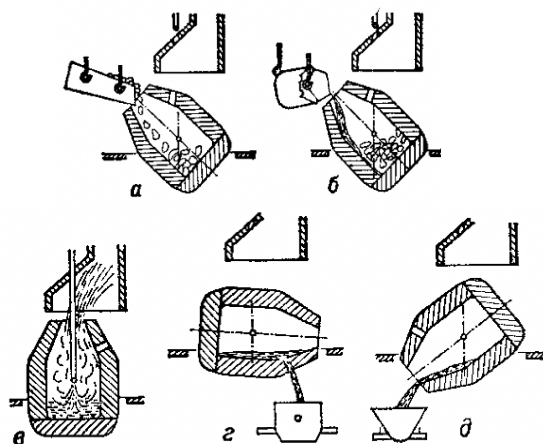


Рис. 1.1 – Схема производства стали в кислородном конвертере: а – загрузка металлолома; б – заливка чугуна; в – продувка; г – выпуск стали; д – слив шлака

Конвертерный способ включает передел в сталь чугуна и металлоотходов (скрапа и металлолома), последние из которых составляют $2/5$ доли железорудного сырья с реализацией следующих технологических операций:

1. Окисление углерода и примесей (кремния, марганца, фосфора, серы и др.). Окислителем является кислород, источником которого могут быть: воздух или технический кислород, оксиды железа, кислород, растворенный в металле. Таким же способом окисляются и примеси. Реакции

окисления углерода и примесей сильно экзотермичны, и их выделяющегося тепла с избытком хватает для проведения процесса получения стали.

2. Ошлакование окислившихся примесей. Оксиды примесей вступают во взаимодействие с другими оксидами (шлакующими) и образуют состоящий из легкоплавких соединений шлак, который скапливается на поверхности расплавленного металла. Источником шлакующих оксидов являются футеровка агрегата и добавляемые флюсы. Образующийся шлак по мере накопления удаляют с поверхности металла.

3. Раскисление стали. В результате окисления металл насыщается избыточным кислородом, и для его удаления (раскисления) в металл после удаления шлака добавляют кремний или алюминий (обычно в виде сплава с железом). Поскольку эти элементы имеют большое сродство к кислороду, они взаимодействуют с ним, образуют оксиды и шлакуются.

4. Легирование стали. В очищенный металл вводят необходимые легирующие добавки в требуемом количестве. Легирование стали осуществляется введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в расплав. Легирующие элементы, сродство к кислороду которых меньше, чем у железа (*Ni, Co, Mo, Cu*), подаются в печь в любое время, т.к. при плавке и разливке эти элементы практически не окисляются. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду больше, чем у железа (*Si, Mn, Al, Cr, V, Ti* и др.), вводят в металл в конце плавки после или одновременно с раскислителем, а иногда непосредственно в сталеразливочный ковш.

Все эти стадии пирометаллургического процесса получения стали из чугуна и металлоотходов обязательны независимо от способа получения стали. На каждой из этих стадий технологически обусловлены места образования скрытых дефектов.

Шихтовыми материалами конвертерного способа получения стали являются жидкий передельный чугун – основной продукт доменного производства, металлоотходы (стальной лом. не более 30%), известь для наведения шлака, железная руда, боксит Al_2O_3 и применяемый для разжижения шлака плавиковый шпат CaF_2 .

Состав примесей, попадающих в передельный чугун при доменной плавке, состоит, в основном, из таких элементов, как: кремний (Si), марганец (Mn), фосфор (P) и сера (S), количество которых зависит от состава перерабатываемой железо-содержащей руды.

Окислительные условия ведения плавки в кислородном конвертере, наличие окислительных шлаков, а также взаимодействие металла с атмосферой при выпуске и разливке являются предпосылкой к тому, что кислород, растворенный в стали, к моменту ее выпуска из агрегата имеет часто повышенную активность. Технологическую операцию снижения активности кислорода до требуемых пределов называют раскислением, а сталь, прошедшую такую обработку, раскисленной.

Раскисление – процесс удаления из расплавленных металлов (главным образом стали и других сплавов на основе Fe) растворённого в нём кислорода, который является вредной примесью, ухудшающей механические свойства стали. Для раскисления металла применяют элементы

(или их сплавы – ферросплавы), характеризующиеся бóльшим сродством к кислороду, чем основной металл.

Так, сталь раскисляют алюминием, который образует весьма прочный окисел Al_2O_3 , выделяющийся в жидком металле в виде отдельной твёрдой фазы. Для эффективно-го раскисления металла необходимо, чтобы продукты раскисления не оставались в стали в виде неметаллических включений, представляющих собой главным образом химические соединения металлов с кислородом, серой, азотом и др. неизбежными неметаллическими примесями, присутствующими в виде обособленной фазы (рис. 1.2). Неметаллические включения ухудшают качество металла, скорость их всплывания на поверхность жидкой ванны зависит от температуры и вязкости металла, плотности включений, интенсивности потоков внутри расплава. Удалению неметаллических включений благоприятствует присутствие жидкого шлака, ассимилирующего окислы.

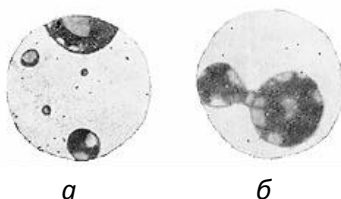


Рис. 1.2 – Оксисульфидные включения в литой стали (а) и их коагуляция (б) $\times 600$: светлая составляющая – сульфидная фаза $FeS-MnS$, темная – окисная фаза $FeO-MnO-SiO_2$

Раскисление стали нередко обеспечивается также введением некоторого количества элементов-раскислителей, а именно – марганца в виде ферромарганца, иногда в металл вводят также небольшие количества кремния в виде ферросилиция и др.), так как марганец – сравнительно

слабый раскислитель и не обеспечивает снижения окисленности металла до требуемых пределов. Бóльшее или мéньшее количество марганца вводится в металл при раскислении стали многих марок, что объясняется рядом достоинств марганца: 1) положительная роль в борьбе с вредным действием серы; 2) положительное влияние на прокаливаемость стали и ее прочность; 3) малое значение межфазного натяжения на границе «металлообразующееся включение MnO », в результате чего облегчаются условия выделения включений и возрастает скорость раскисления.

Не менее важной задачей доводки стали перед разливкой является организация такого процесса её рафинирования, как десульфурация – перевода серы (вредной примеси), обладающей неограниченной растворимостью в жидком железе, в соединения, нерастворимые в металле и хорошо растворимые в шлаке. Таким соединением является CaS . Процесс десульфурации стали является самой «медленной» технологической операцией внепечной обработки стали, т.к. он протекает в диффузионной области, скорость взаимодействия ограничена массопередачей веществ в объеме металла или шлака. Железо и сульфид железа образуют низкоплавкую эвтектику (температура плавления $988\text{ }^{\circ}\text{C}$), которая в присутствии кислорода из-за образования окисульфидов плавится при еще более низких температурах. Межзеренные прослойки (обычно на микрошлифе они имеют вид нитей) фазы, богатой серой (рис. 1.3), при нагревании металла перед прокаткой или ковкой размягчаются и сталь теряет свои свойства, происходит разрушение металла (красноломкость). Присутствие в стали Mn , имеющего бóльшее сродство к S , чем Fe , и обра-

зующего с серой тугоплавкое соединение MnS (сульфид марганца) с температурой плавления $1620\text{ }^{\circ}\text{C}$, практически исключает явление красноломкости. Практикой металлургического производства установлено, что отношение концентраций $Mn/S > 7-10$ обеспечивает горячую обработку давлением без возникновения красноломкости стали с содержанием $S < 0,05\%$.

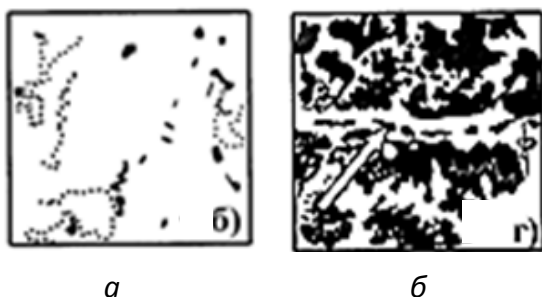


Рис. 1.3 – Цепочки сульфидных фаз FeS , MnS (а) и $FeS \times 600$ (показаны стрелкой \Rightarrow)

Существенное влияние на степень десульфурации оказывает эффективность отсечки печного шлака на сталевыпускных желобах. При отсечке шлака на выпуске металла из сталеплавильной печи при помощи специальных выпускных желобов (рис. 1.4) степень десульфурации в 1,75 раза превышает степень десульфурации металла, выпускаемого из печи в сталеразливочный ковш без отсечки.

Одним из эффективных способов уменьшения вредного влияния серы является изменение состава сульфидных неметаллических включений модифицированием при помощи элементов, образующих с серой тугоплавкие соединения, не растворимые в жидком железе. В первую очередь к таким элементам относятся щелочноземельные и редкоземельные металлы.

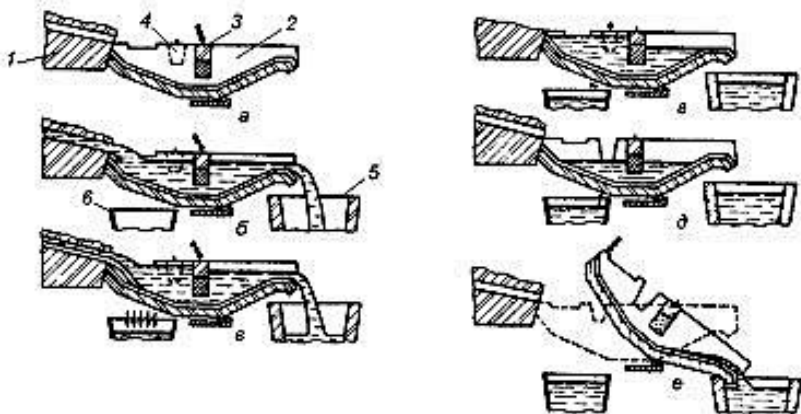


Рис. 1.4 – Схема отделения шлака от металла при помощи качающегося желоба:
 1 – желоб мартеновской печи; 2 – качающийся желоб;
 3 – огнеупорная перегородка; 4 – огнеупорная заслонка;
 5 – сталеразливочный ковш; 6 – шлаковая чаша

В настоящее время имеется большой набор научно-обоснованных способов десульфурации металла, позволяющих получать практически любое остаточное содержание серы в стали, включая и ультранизкое ($< 0,005\%$). Но использование многих из этих способов, как правило, вызывает чрезмерное повышение себестоимости стали.

Ограниченные возможности регулирования физических и физико-химических условий протекания процессов плавки стали в сталеплавильных агрегатах, повышение требований к качеству стали, а также необходимость разработки технологии и производства стали принципиально нового качества привели к созданию новых сталеплавильных процессов, соответствующих современному уровню развития техники. Одним из элементов таких технологий является внепечная обработка стали.

Внепечная обработка стали – промежуточный передел между выплавкой стали и её разливкой. Она позволяет вынести часть процессов рафинирования из сталеплавильного агрегата в сталеразливочный ковш, существенно улучшить качество стали (механические свойства, коррозионную стойкость, электротехнические показатели и др.) что способствует росту работоспособности автотранспортных средств с уменьшением их массы. Важным фактором, обеспечившим этот результат, явилась также возможность гарантированно получать и контролировать сталь с узкими пределами содержания легирующих элементов, высокой их однородностью, низким содержанием включений [1–47]. Это позволило уменьшить коэффициент запаса прочности, учитываемый при проектировании узлов и агрегатов автомобилей, в частности, с обычных 1,5–3,0 до 1,2–1,4.

Наилучшие результаты воздействия на качество стали достигаются при использовании комбинированных способов внепечной обработки стали, когда в одном или нескольких агрегатах осуществляется ряд операций: механического перемешивания металла падающей струей, вибрационным воздействием, использованием мешалок (рис. 1.5), обработка металла вакуумом (рис. 1.6); продувка инертным газом; обработка стали синтетическим шлаком в ковше; введение реагентов вглубь металла; продувка порошкообразными материалами.

В процессе выплавки стали в металле всегда имеется некоторое количество газов – O , N , H . Кислород и азот присутствуют в стали в виде твердого раствора или, находясь в свободном виде, располагаются в дефектных участках металла (трещинах, раковинах и т.п.), а также в виде

хрупких НВ, например: окислов FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , нитридов Fe_4N и др., которые, в основном, являются продуктами раскисления.

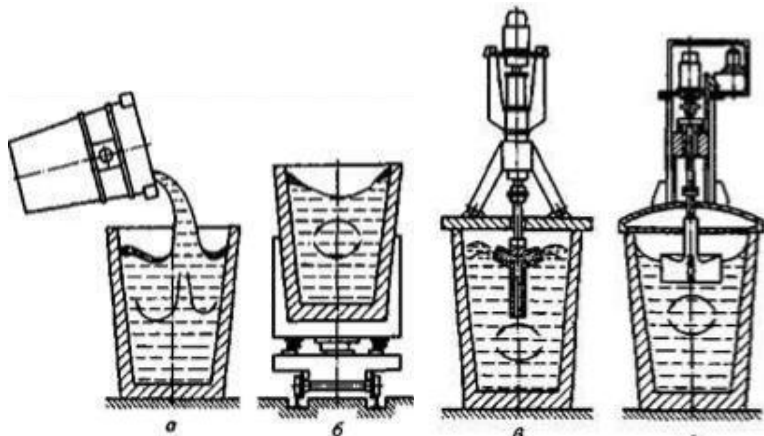


Рис. 1.5 – Виды механического перемешивания металла: *а* – падающей струей; *б* – вибрационным воздействием; *в, з* – использованием мешалок

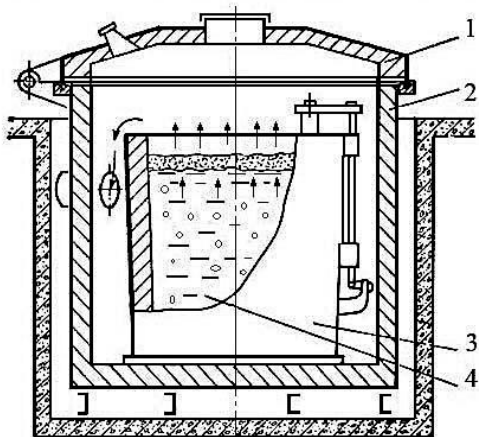


Рис. 1.6 – Схема вакуумной дегазации стали в сталеразливочном ковше

Очень вредным является растворенный в стали водород, который сильно охрупчивает сталь. Поглощенный при выплавке стали водород приводит также к образованию в подвергнутых горячему деформированию заготовках флокенов, которые представляют собой очень тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Флокены резко ухудшают свойства стали. Для снижения H в стали применяют процессы вакуумирования ($\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} мм. рт. ст.) или нагрева при 150–180 °С.

Снижение содержания водорода в сталеразливочном ковше – основная цель вакуумирования стали, положительным результатом чего являются следующие процессы:

1) всплывание гидридных неметаллических включений (в сплавах при содержании в них гидридообразующих элементов);

2) выделение пузырей водорода, зарождающихся из-за создания условий, необходимых для преодоления сил поверхностного натяжения и ферростатического давления;

3) десорбция газа с открытой (или открывающейся при перемешивании) поверхности зеркала металла, к которой атомы газа перемещаются в результате диффузии или конвекции;

4) десорбция водорода с поверхности пузырей CO внутрь их и выноса из жидкого металла в пузырьках CO (в случае образования CO при вакуумировании);

5) десорбция водорода с поверхности пузырей инертного газа внутрь и выноса из жидкого металла в случае его продувки инертным газом.

Снижение содержания азота в сталеразливочном ковше при вакуумировании является положительным в итоге

результатом протекания, прежде всего, следующих процессов:

1) всплывания нитридных неметаллических включений в сталях и сплавах, содержащих нитридообразующие элементы;

2) выделения пузырей азота, зарождающихся вследствие создания условий, необходимых для преодоления сил поверхностного натяжения и ферростатического давления;

3) десорбции газа с открытой (или открывающейся при перемешивании) поверхности зеркала металла, к которой атомы газа перемещаются в результате диффузии или конвекции;

4) десорбции азота с поверхности пузырей CO внутрь и выноса из жидкого металла вместе с этими пузырями;

5) десорбции азота с поверхности пузырей инертного газа внутрь и выноса из жидкого металла в случае его продувки инертным газом.

Внепечная обработка стали и сплавов в установке «печь – ковш» (рис. 1.7) позволяет предотвратить восстановление фосфора из шлака в металл, снизить содержание кислорода (на 40–50 %) и неметаллических включений в металле, уменьшить содержание серы, усреднить (гомогенизировать) металл по химическому составу и температуре, произвести доводку стали по её химическому составу и температуре.

На рисунке 1.8 показан вариант установки типа «печь – ковш», предусматривающий возможность перемешивания металла аргоном под слоем синтетического шлака, вдувание порошкообразных реагентов и подогрев расплава одновременно.

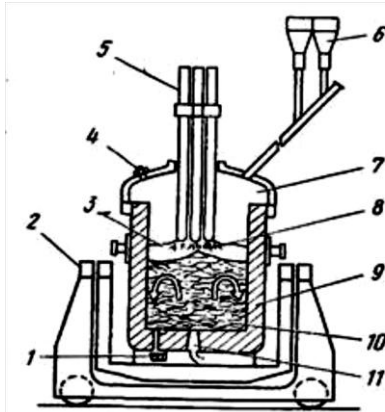


Рис. 1.7 – Схема типичной конструкции установки «печь – ковш»:

1 – шиберный затвор; 2 – тележка; 3 – основной шлак; 4 – смотровое окно; 5 – электроды; 6 – бункеры для хранения легирующих добавок; 7 – инертная атмосфера внутри печи; 8 – нагрев погруженной дугой; 9 – жидкая сталь; 10 – перемешивание инертным газом; 11 – пористая пробка

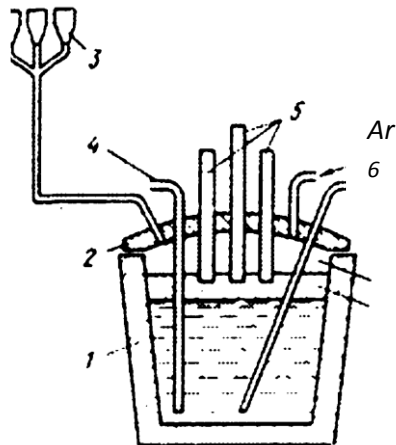


Рис. 1.8 – Схема установки АР (Arc-Process):

1 – ковш; 2 – крышка-свод; 3 – бункера для ферросплавов и флюсов; 4 – фурма для подачи в металл аргона или азота; 5 – электроды; 6 – подача аргона; 7 – фурма для вдувания порошка силикокальция в струе аргона; 8 – безокислительная атмосфера; 9 – шлак ($\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$)

1.1.2. Технологически обусловленные места образования скрытых дефектов в процессе разливки стали и отливке заготовок металлических изделий

Разливка стали и отливка заготовок металлических изделий является важным и весьма ответственным этапом сталеплавильного производства. Технология и организация как разливки стали, так и отливки заготовок из неё часто определяют качество готового изделия.

Ряд нежелательных последствий, ухудшающих качество стали и даже порой приводящих к браку, вызывает вторичное окисление струи жидкой стали воздухом при её разливке. Следствием такого окисления является не только повышение общего содержания кислорода в стали в результате увеличения содержания в ней оксидных включений, но и появление ряда дефектов у слитков и непрерывнолитых заготовок, что негативно сказывается на надёжности и работоспособности как важных составляющих безопасности использования годных изделий в узлах и агрегатах технических устройств, к которым относятся автотранспортные средства.

Для обеспечения свойств металлических изделий, удовлетворяющих современным требованиям, необходимо не только обеспечивать высокую чистоту металла по оксидным неметаллическим включениям, что, в свою очередь, достигается глубоким раскислением металла, но и удержанием необходимого уровня окисленности металла на всех последующих этапах передела, в первую очередь при его разливке. Вторичное окисление струи металла воздухом при разливке вызывает ряд нежелательных последствий, ухудшающих качество стали и даже порой приводящих к браку. При контакте жидкого металла с атмосферой, помимо окисления, протекают реакции взаимо-

действия с атмосферной влагой и азотом воздуха. Огромное (почти десять порядков) различие окислительного потенциала воздуха и раскисленного металла определяет трудность защиты металла от вторичного его окисления. Сложность защиты струи металла при выпуске и разливке от азота и влаги воздуха объясняется парадоксальным фактом: чем чище от примесей металл (в результате внепечной обработки), чем меньше в нем таких, например, поверхностно-активных примесей, как сера, «блокирующих» поверхность, тем больший вред качеству может нанести контакт с атмосферой. Поэтому предотвращение такого контакта струи металла, подвергнутого внепечной обработке, является обязательным.

Защита струи металла на разливке с применением погружных стаканов и надежной изоляцией стыков их с шиберными затворами инертным газом позволяет практически устранить вторичное окисление стали: общее содержание кислорода в 1,5–2,0 раза ниже, чем при обычной разливке; прирост содержания азота в стали очень небольшой. Защита струи является совершенно необходимой операцией после внепечной обработки стали с целью понижения содержания в ней оксидных включений и регулирования их природы.

Сложность технологического процесса изготовления отливок, влияние на него множества факторов и их взаимного влияния приводит к появлению литейных дефектов, число которых составляет несколько десятков, классификация которых отражена в ГОСТ 19200–80:

- 1) несоответствие по геометрии – 14 дефектов;
- 2) дефекты поверхности – 13 дефектов;
- 3) несплошности в теле отливки – 16 дефектов;

4) включения – 3 дефекта;

5) несоответствие по структуре – 4 дефекта.

Среди вышеупомянутых литейных дефектов два их вида из которых в виде пороков поверхности (засоры, ужирины, трещины, спаи или неслитины, плены, складчатость или морщинистость и др.) относятся к поверхностным, достаточно незатруднительно обнаруживаются визуальным НК по классификации стандарта ГОСТ 18353-79. Что касается НК внутренних несплошностей в теле отливки (металлических и неметаллических включений, газовых раковин, внутренней пористости и рыхлости, усадочных раковин – рис. 1.9), как не только наибольшего вида по количеству дефектов, но и доступного для обнаружения лишь с использованием специальных физических методов НК – радиационного, в частности, или ультразвукового, то такая их идентификация и отнесение к браку литья, как отдельного несоответствия изделия установленным требованиям, сопряжена с определёнными затруднениями в части дополнительных затрат.

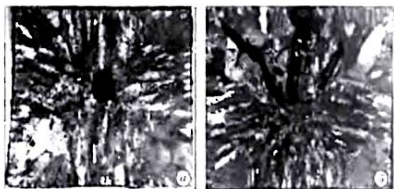


Рис. 1.9 – Усадочные раковины в стальных отливках: сосредоточенная (а) и рассредоточенная (б)

При условии соблюдения норм проектирования, состава смесей и технологических режимов литья производство получит качественную отливку, сведя вероятность брака литья к минимуму.

Особо важное значение НК внутренних несплошностей приобретает для ответственных отливок из специальных высоколегированных сплавов. На ряд ответственных отливок общего машиностроения (головки, блоки, гильзы цилиндров и др.) разработаны специальные ГОСТы, в которых установлены допустимые нормы по дефектности отливок, даны рекомендации по набору методов контроля.

1.1.3. Технологически обусловленные места образования скрытых дефектов при обработке металлических заготовок давлением

Обработка металлов давлением (ОМД) – это технологические процессы формоизменения заготовок без нарушения их сплошности в результате пластической деформации под действием внешних сил. Существует большое количество различных способов ОМД: свободная ковка, прессование, штамповка, высадка, волочение, прокатка и др., позволяющих получать изделие требуемого сортамента, заваривать некоторые дефекты литья исходных заготовок, измельчать структуру, улучшать механические свойства изделий.

Процессы ОМД по назначению подразделяют на два вида:

– для получения заготовок постоянного поперечного сечения по длине, а именно – прутков, проволоки, лент, листов, уголков и др. изделий) и переменного сечения (рис. 1.10), применяемых в машиностроении в качестве заготовок для последующего изготовления из них деталей только обработкой резанием или с использованием предварительного пластического формоизменения;

– для получения деталей или заготовок (полуфабрикатов), имеющих приблизительно формы и размеры готовых деталей (рис. 1.11 и 1.12) и требующих механической обработки для придания им окончательных размеров и получения поверхности заданного качества.

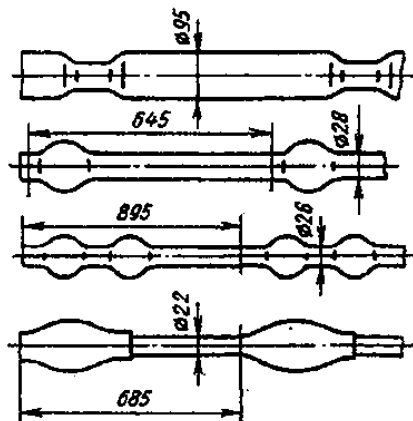


Рис. 1.10 – Примеры профилей проката фасонной формы

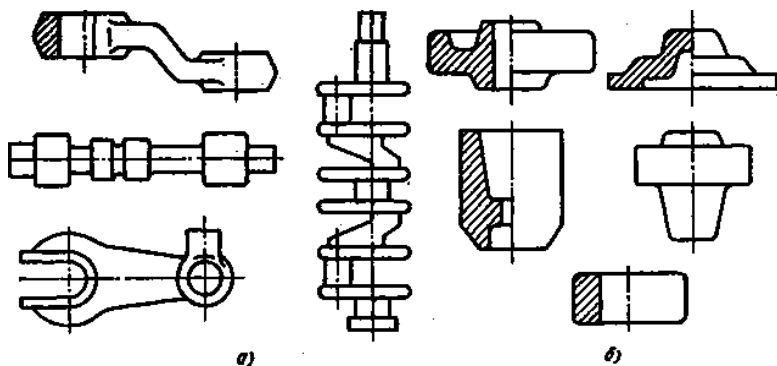


Рис. 1.11 – Штампованные поковки рычагов, коленчатого вала, заготовок изделий шестерен и др.

Обобщенная схема производства сортового и листового проката представлена на рисунке 1.13.

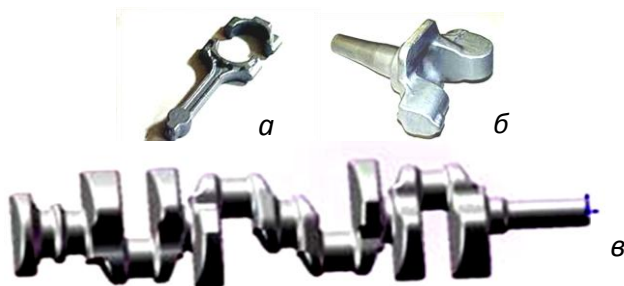


Рисунок 1.12 – Полуфабрикаты отштампованных заготовок :
а – шатуна; б – поворотного кулака; в – коленчатого вала; г – элементов кузова автомобиля

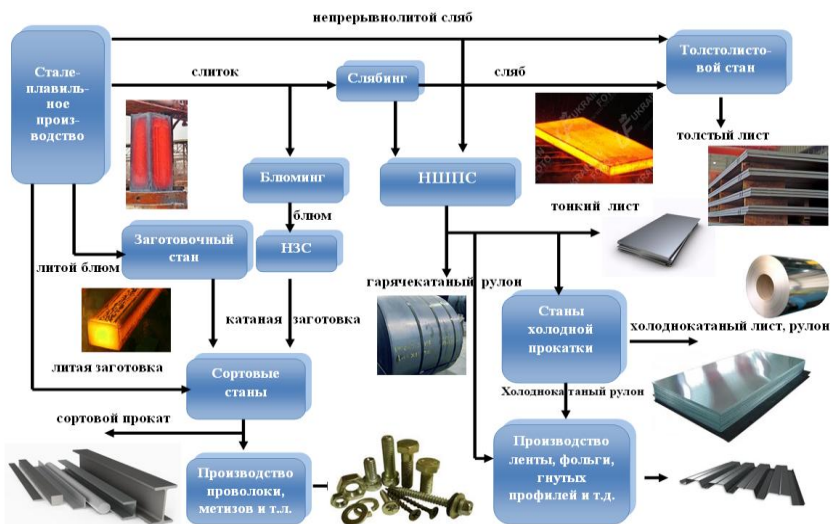


Рисунок 1.13 – Обобщенная схема производства сортового и листового проката

Дефекты изделий после ОМД подразделяют на две группы: связанные с дефектами литья и вызываемые ОМД. К первым относят газовые поры и шлаковые включения, ликвации по составу, плены, поверхностные и внутренние трещины, флокены и др. Ко вторым относят грубые наружные дефекты, полученной ОМД (вмятины, рванины, сквозные несплошности, плены и др.), выявляют визуально.

При поперечной и поперечно-винтовой прокатке заготовок тел вращения постоянного диаметра, шаров и периодических профилей (рис. 1.14) имеют место скрытые дефекты – флокены, осевая рыхлость и вскрытие осевой полости [1–2] (рис. 1.15) вследствие появления в зоне деформации растягивающих напряжений. Данные дефекты обнаруживаются ультразвуковым просвечиванием.

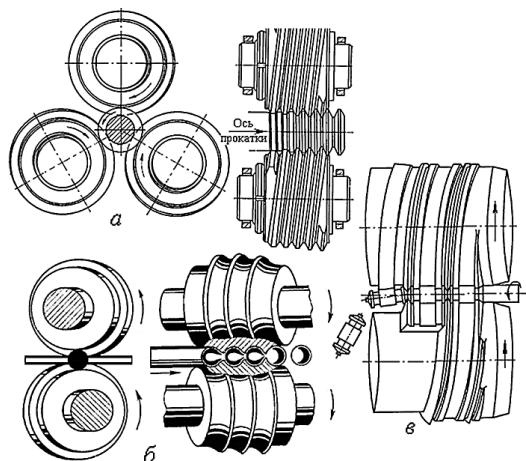


Рис. 1.14 – Схемы поперечно-винтовой прокатки: *а* — винтовой поверхности; *б* — шаров; *в* — коротких валиков

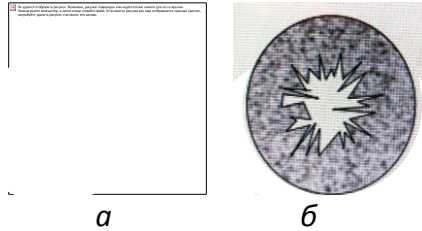


Рис. 1. 15 – Дефекты прокатки заготовок тел вращения постоянного диаметра (круглого поперечного сечения) [2]

Контрольные вопросы

1. Назовите основные элементы в составе примесей, попадающих в передельный чугуи при доменной плавке.
2. Дефекты какого вида нивелируются при внепечной обработке стали?
3. Поясните достоинства марганца при раскислении стали многих марок.
4. В чём опасность выпуска стали из плавильного агрегата в сталеразливочный ковш без отсечки шлака?
5. Перечислите скрытые дефекты при поперечно-винтовой прокатке.
6. Поясните обстоятельства и величину снижения коэффициента запаса прочности, учитываемого при проектировании узлов и агрегатов автомобилей, за счёт комбинированной технологии внепечной обработка стали.
7. Какие эффекты достигаются при вакуумировании стали?
8. Какие нежелательные последствия, ухудшающие качество стали и даже порой приводящие к браку, вызывает вторичное окисление струи жидкой стали воздухом при её разливке?
9. Перечислите скрытые литейные дефекты стальных отливок.

ГЛАВА 2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

На практике заслуженно используется классификация дефектов металлических изделий в зависимости от места их расположения на внутренние, поверхностные и подповерхностные (на некоторой глубине). При любом методе НК о наличии дефекта судят по косвенным признакам (характеристикам), свойственным данному методу. Так, при необходимости идентификации и распознавания внутренних дефектов у металлических изделий выбирают радиационный или акустический метод НК. При необходимости обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов выбор методов НК существенно расширяется за счёт капиллярного, вихретокового и магнитного контроля [3].

2.1. Магнитный контроль

Магнитный НК базируется на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля [4]. По способу получения первичной информации применительно к идентификации и распознаванию исключительно поверхностных и подповерхностных дефектов изделий из ферромагнитных материалов различают методы магнит-

ного НК на: магнитопорошковый (МП), феррозондовый (ФЗ) и магниторезисторный (МР).

2.1.1. Феррозондовый метод контроля: основные понятия и технология

Феррозондовый метод контроля основан на измерении феррозондовым прибором градиента напряженности магнитного поля рассеивания (рис. 2.1), созданного дефектом в намагниченном изделии [7].

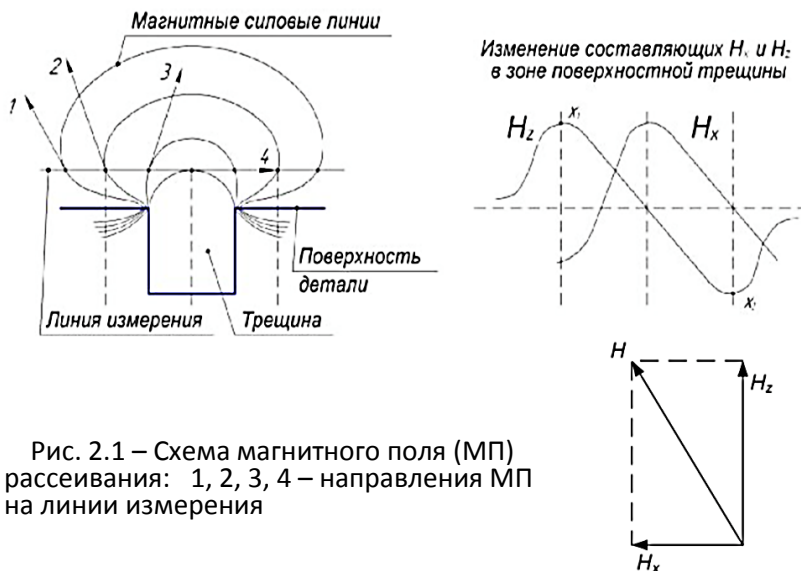


Рис. 2.1 – Схема магнитного поля (МП) рассеивания: 1, 2, 3, 4 – направления МП на линии измерения

В феррозондовой дефектоскопии применяются феррозондовые преобразователи (ФП, рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Феррозондовый преобразователь

ФП имеет два параллельно расположенных сердечника на расстоянии Δx . Расстояние Δx между сердечниками называется базой ФП. Для большинства деталей $\Delta x = 4$ мм. Сердечники выполнены из магнитомягкого сплава. Эти стержни имеют одинаковые обмотки, соединенные последовательно. При прохождении тока создается переменное магнитное поле, совпадающее по величине и направлению. При перемещении ФП над дефектом происходит сложение напряжений магнитного поля катушек с напряжением магнитного поля рассеивания от дефекта, что меняет величину магнитной индукции катушек. ФП реагирует на резкое пространственное изменение напряженности магнитного поля над дефектами и преобразует градиент напряженности поля (НП) в электрический сигнал. Внешний вид измерителя НП МФ-109 представлен на рисунке 2.2, а его технические характеристики даны в таблице 2.1.



Рисунок 2.3 – Внешний вид измерителя

напряженности поля МФ-109:
 1 – кнопка включения питания; 2 – индикатор включения питания; 3 – индикатор разряда батареи; 4 – дисплей; 5 – индикатор полярности поля; 6 – индикатор режима измерения нормальной составляющей поля H_n ; 7 – индикатор режима измерения тангенциальной составляющей поля H_t ; 8 – кнопка переключения режимов измерений; 9 – гнездо соединителя для подключения ФП; 10 – звуковой индикатор

Таблица 2.1
 Технические характеристики измерителя МФ-109

Характеристика	Значение
Диапазон показаний H_t или H_n , А/м	$\pm (0-19\ 999)$
Диапазон измерений H_t или H_n , А/м	$\pm (40-19\ 000)$
Пределы допускаемой основной относительной погрешности δ_d измерения напряженности магнитного поля, % (H_k – конечное значение диапазона измерений, H – измеренное значение напряженности магнитного поля)	$\pm \left[5 + 0,05 \left(\left \frac{H_k}{H} \right - 1 \right) \right]$;
Продолжительность непрерывной работы измерителя от АКБ, емкостью 0,55 А/ч, входящей в комплект поставки, ч.	8
Габаритные размеры в чехле, мм, не более	145×196×80
Масса, кг, не более	1,25

Технологический процесс феррозондовой дефектоскопии включает:

1. Подготовку ФП, его настройку с помощью стандартного образца на определенный уровень чувствительности.
2. Подготовку подвергаемой феррозондовым методом контроля детали:
 - очистку детали от загрязнений, коррозии;
 - осмотр и отбраковку по внешним признакам негодных к контролю феррозондовым методом деталей, при необходимости применяют лупу.
3. Намагничивание контролируемой детали способом *остаточной намагниченности* (СОН) или способом *приложенного* магнитного поля (СПП).
4. Обнаружение дефекта.

ФП устанавливается перпендикулярно контролируемой поверхности, его продольная ось должна быть направлена вдоль линии сканирования (рис. 2.4).

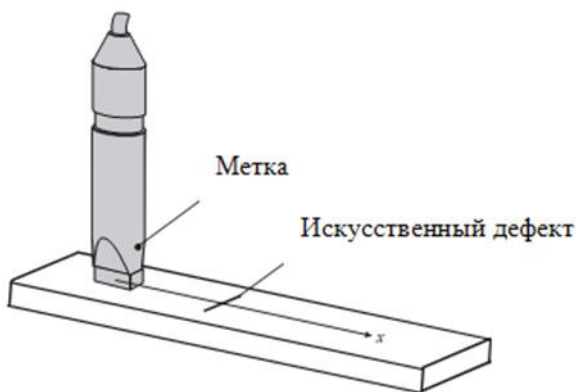


Рис. 2.4 – Схема установки ФП

Сканирование осуществляют без перекосов, наклонов и отрывов ФП от поверхности контролируемой детали. Расстояние между линиями сканирования находится в пределах от 3 до 15 мм и определяется инструкцией по

дефектоскопии. Скорость сканирования не более 8 см/с. При выявлении дефекта место дефекта должно проверяться более тщательно. Дефект (трещина) имеет протяженность, поэтому при параллельных проходах по срабатыванию индикаторов дефекта можно оценить направление развития и длину трещины. Если при параллельных проходах срабатываний индикаторов дефекта не происходит, трещина отсутствует.

Контрольные вопросы

1. На чем основан феррозондовый метод контроля?
2. Какие технические характеристики регламентируются для измерителя напряженности поля феррозондовой дефектоскопии?
3. Назовите способы намагничивания контролируемой детали перед её феррозондовой дефектоскопией.
4. Как устанавливается феррозондовый преобразователь на поверхности контролируемой детали?
5. Назовите операции технологического процесса феррозондовой дефектоскопии.

2.1.2. Магнитопорошковый метод контроля: основные понятия и технология

Магнитопорошковый контроль (МПК) основан на притяжении магнитных частиц силами неоднородных магнитных полей, возникающих над дефектами в намагниченной детали, подвергаемой МПК, с образованием индикаторных рисунков в зонах дефектов в виде скоплений магнитных частиц (рис. 2.5). Наличие и протяженность индикаторных рисунков регистрируют визуально, с помощью оптических приборов или автоматическими устройствами обработки изображения.

Основные положения МПК приведены в ГОСТ 21105-87. МПК позволяет обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты типа нарушения сплошности металлических изделий: трещины различного происхождения, флокены, закаты, надрывы, волосовины, расслоения, дефекты сварных соединений в деталях, изготовленных из ферромагнитных материалов.

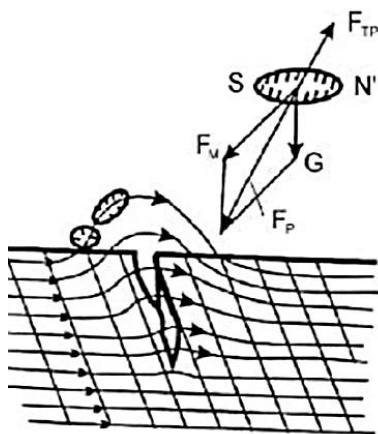


Рис. 2.5 – Магнитопорошковый метод контроля: упрощённая схема сил, действующих на частицу в поле дефекта

Необходимым условием применения МПК для выявления дефектов является наличие доступа к объекту контроля для намагничивания, обработки индикаторными материалами и оценки дефектности подвергаемого МПК изделия (детали).

Для обнаружения дефектов данным методом на контролируемые участки намагниченной детали наносят порошок имеющих удлиненную форму ферромагнитных частиц (ФЧ) размером от 1 мкм. ФЧ могут быть подкрашены активным пигментом – люминофором (люминесцентный

магнитный порошок). Основу порошка составляют ФЧ железа/никеля или их окислов. «Железный» порошок состоит из частиц на основе окиси железа Fe_2O_3 или закись-окиси железа Fe_3O_4 . По ГОСТ 9849-86 их подразделяют по: химическому составу (марки ПЖВ1 – ПЖВ5, отличающихся количественным содержанием примесей углерода *C*, *Si*, *Mn*, *S*, *P* и кислорода); гранулометрическому составу (максимальноу размеру зерна); насыпной плотности, характеризующейся массой порошка на единицу объема, например, для 22-го – 2,3, для 32-го – 3,0 г/см³. Основные типы магнитных индикаторов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Основные типы магнитных индикаторов

Наименование индикатора	Цвет индикатора	Способ нанесения индикатора	Назначение	Состав суспензии
Порошок железный ПЖВ5-160	Темно-серый	«Сухой»	Контроль деталей со светлой поверхностью и шероховатостью Rz160	–
Порошок железный ПЖВ5-71	Темно-серый	«Мокрый» (масло, смесь масла с керосином) «Сухой»	Контроль деталей со светлой поверхностью любой шероховатости Контроль деталей со светлой поверхностью и шероховатостью Rz160	(180+20)г/л
КМС «ДИАГМА 1100»	Черный	«Мокрый» (вода)	Контроль деталей со светлой поверхностью любой шероховатости	(40+5)г/л
КМС «ДИАГМА 1200»	Красно-коричневый	«Мокрый» (вода)	Контроль деталей с темной поверхностью любой шероховатости	(30+5)г/л

В магнитном поле каждая ФЧ намагничивается и становится диполем с четко выраженными магнитными полюсами N и S на концах. Вдали от дефекта магнитное поле однородно. Это означает, что в каждой его точке напряженность *H* одинакова по величине и направлению, и

взаимодействие полюсов N и S каждой ФЧ с напряженностью поля дефекта образует пару сил, момент которых разворачивает частицу и устанавливает ее ось по направлению напряженности H.

В зоне дефекта (по обе стороны и над дефектом) поле искажено (см. рис. 2.5), оно неоднородно, т.е. напряженность у обращенных к краям дефекта полюсов ФЧ имеет большее значение, чем у других, поэтому на ФЧ, кроме вращающих моментов, действуют магнитные силы F_M , стремящиеся втянуть их в область с более высоким значением напряженности, что перемещает ФЧ к краям дефекта, где концентрация магнитных линий наибольшая. Совокупное действие магнитной силы F_M и силы тяжести G частицы образует результирующую силу F_r . Действие этих сил для перемещения ФЧ порошка является необходимым и достаточным условием их подвижности, которая зависит от сил трения $F_{тр}$.

Для выявления дефектов металлических изделий посредством применения МПК на их контролируемую поверхность предварительно осуществляют нанесение дефектоскопического материала – ферромагнитного порошка «сухим» или «мокрым» способом в виде магнитной суспензии или магнитогуммированной пасты, у которых силы трения значительно меньше по сравнению с нанесением ферромагнитного порошка «сухим» способом. Чаще всего, в МПК используют готовую магнитную суспензию – взвесь ФЧ. В качестве основы для взвеси выбирают, в зависимости от условий контроля и типа используемого оборудования, масло (например, Элитест МЛ1) или воду. Выявляющая способность наиболее широко применяемых магнитных индикаторов приведена в таблице 2.3.

При «сухом» способе ферромагнитный порошок наносят распылением или способом воздушной взвеси, когда частицы находятся в воздухе и образуют воздушную взвесь. Последний способ рекомендуется применять при выявлении подповерхностных дефектов, а также дефектов под слоем немагнитного покрытия толщиной от 100 до 200 мкм. ФЧ порошка наносят в камерах с отсасывающим вентиляционным устройством, обеспеченным фильтром для улавливаемого отсасываемого порошка.

Таблица 2.3

Выявляющая способность наиболее широко применяемых магнитных индикаторов

Тип магнитного индикатора	Значение намагничивающего тока, мА	Длина индикаторного рисунка по шкале прибора, мм	
		ИД шириной 50 мкм	ИД шириной 100 мкм
Суспензия на основе КМС «ДИАГМА 1100» (ТУ 2662-003-41086427-97)	100	65	–
Суспензия на основе КМС «ДИАГМА 1200» (ТУ 2662-003-41086427-97)	100	65	–
Суспензия на основе порошка магнитного черного (ТУ-6-36-05800165-1009-93)	80	85	–
Порошок железный в сухом виде ПЖВ5-160 (ГОСТ 9849-86)	70	–	70
Порошок железный ПЖВ5-71 (ГОСТ 9849-86)	70	–	70

В магнитной суспензии при «мокроем» способе ФЧ взвешены в жидкости, которую наносят поливом, распылением или погружением в ванну. Рекомендуется обеспечивать условия для стекания магнитной суспензии с контролируемой поверхности. Магнитогумированную пасту готовят и применяют в соответствии с рекомендациями поставщика.

В процессе применения МПК ФЧ порошка, перемещаясь к дефекту, накапливаются у его краев, формируя изо-

бражение дефекта, которое выявляется при визуальном осмотре подвергаемой контролю детали в ультрафиолетовом освещении (люминесцентный контроль), либо при обычном освещении (в этом случае в качестве фона может использоваться грунтовочная краска).

Наиболее контрастные изображения индикаторных рисунков у усталостных поверхностных трещин. Ширина валика из осевших ФЧ порошка значительно превышает ширину (раскрытие) трещины. Потенциально МПК позволяет выявлять трещины с раскрытием 1 мкм, глубиной 10 мкм и более и протяженностью 0,5 мм. Отличают МПК высокая чувствительность, наглядность, простота реализации и относительно высокая производительность проведения контроля. Чувствительность МПК характеризуется условными уровнями чувствительности по ГОСТ 21105-87 (таблица 2.4).

При выявлении подповерхностных дефектов, а также при $R_a > 10,0$ мкм условный уровень чувствительности не нормируется. Практика применения МПК свидетельствует о том, что использование условных уровней чувствительности недостаточно оправдывает себя.

Таблица 2.4

Условные уровни чувствительности МПК

Условный уровень	Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мкм	Максимальная протяженность условного дефекта, мкм	Шероховатость контролируемой поверхности R_a , мкм, не более
А	2,0	0,5	2,5
Б	10,0	0,5	10,0
В	25,0	0,5	10,0

Выявляемость дефектов снижается при обследовании следующих объектов: а) плоскости которых составляют

угол менее 30° с контролируемой поверхностью или с направлением магнитной индукции; б) подповерхностных; в) на поверхности объекта с параметром шероховатости $Ra > 10$ мкм; г) при наличии на поверхности объекта немагнитных покрытий толщиной более 40 мкм (краски, нагара, продуктов коррозии, шлаков, термообмазок). В этих случаях чувствительность МПК не нормируется.

Подвергнутые МПК детали размагничивают с обязательной проверкой качества их размагничивания, т.к. магнитные поля неразмагниченных деталей могут создать ситуации, ведущие к отказу технических средств, в составе которых эти детали используются. Размагничивания деталей производят нагреванием детали до точки Кюри; однократным приложением встречного магнитного поля; воздействием на деталь полем уменьшающейся амплитуды от максимального значения до нуля.

Недостатками МПК являются невозможность определения глубины и ширины поверхностных дефектов, размеров подповерхностных дефектов и глубины их залегания, а также трудность автоматизации и влияние субъективных качеств оператора-дефектоскописта.

Контрольные вопросы

1. На чем основаны магнитные методы контроля?
2. В чем разница «сухого» и «мокрого» способа нанесения порошка?
3. Что называют «суспензией»?
4. Какие методы входят в магнитный неразрушающий контроль?
5. Что показывает индикаторный рисунок?
6. Что составляет основу ферромагнитного порошка?
7. Как подразделяются ферромагнитные порошки?

8. В каких случаях выявляемость дефектов при обследовании объектов магнитного контроля снижается?

9. Почему подвергнутые магнитному контролю детали размагничивают?

2.2. Ультразвуковой контроль

При выборе конкретного метода НК важной характеристикой является возможность обнаружения дефекта. Сопоставление сравнительной выявляемости методов НК, представленное на рисунке 2.6 [8–9], свидетельствует о более, чем в два раза, превосходстве одного из самых распространенных методов неразрушающего контроля – метода ультразвукового контроля (УЗК), как разновидности акустического вида НК, над рентгенографическим методом НК в части обнаружения и идентификации внутренних (скрытых) дефектов, причём с реальной возможностью определения координат (местоположения) дефекта, его размеров и площади. В ультразвуковой дефектоскопии на её чувствительность, тождественной минимальным размерам обнаруживаемых дефектов, влияет длина УЗ-волны: если дефект контролируемого объекта меньше длины УЗ-волны, то она огибает этот дефект, и он не идентифицируется как дефект.

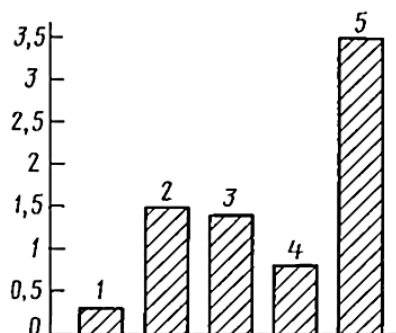


Рис. 2.6 – Сравнительная выявляемость дефектов различными методами контроля:

1 – визуально-оптическим; 2 – рентгенографическим; 3 – магнитным; 4 – капиллярным; 5 – ультразвуковым

Акустический вид НК основан на применении упругих колебаний, которые возбуждаются в подвергаемом контролю объекте. Может использоваться широкий диапазон частот, однако наиболее часто применяют ультразвуковые волны (УЗ-волны), поэтому акустический контроль часто называют ультразвуковым. Чаще всего упругие волны в объекте контроля возбуждают с помощью пьезопреобразователей, реже используются электромагнитно-акустические преобразователи и лазеры [5–6]. Параметры распространения волн зависят от акустических свойств материала и наличия различных дефектов. При применении ультразвукового НК анализируется амплитуда импульсов, прошедших через изделие, либо отраженных от поверхности изделия или дефекта, их фаза, частота и скорость распространения.

В серийно выпускаемых ультразвуковых дефектоскопах для излучения и приема УЗ-волн чаще всего используют пьезопластины, обладающие пьезоэлектрическим эффектом, т.е. метод УЗК базируется на использовании физи-

ческих явлений прямого и обратного пьезоэффекта. На основе пьезоэффекта были разработаны и изготовлены многочисленные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), которые служат не только в качестве излучателя УЗ-волн, но и в качестве их приемника. Прямой пьезоэффект состоит в появлении электрических зарядов на обкладках вырезанной, например, из кристалла кварца, пьезопластины в результате её деформации, обратный заключается в деформации пьезопластины под действием приложенного электрического поля. Обратный пьезоэффект, вызывающий такую деформацию, служит для излучения продольных УЗ-волн, а прямой, связанный с деформацией по толщине, – для их приёма. Возникающий потенциал от появления электрического заряда на обкладках пьезопластины, вмонтированной в ПЭП, используется для определения месторасположения и величины дефекта.

Пьезопластины изготавливаются из титаната бария, кристалла кварца или других материалов и размещаются в корпусе 1 ПЭП (рис. 2.7) [8]. На неё наносится токопроводный слой 3, на который подается ток высокой частоты (от 0,5 до 10 МГц). При определенном значении частоты тока наступает явление резонанса, когда пьезопластина начинает колебаться особенно сильно. Ультразвук этой частоты вводится в объект (деталь) ультразвукового контроля. Демпферы из текстолита или эпоксидной смолы с наполнителем (сажа, свинцовый сурик) применяются для гашения колебаний пьезопластины 2 и уменьшения продолжительности импульсов УЗ-волн.

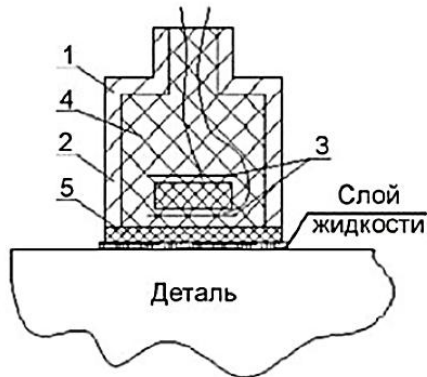


Рис. 2.7 – Устройство ПЭП:

1 – корпус; 2 – пьезопластина; 3 – токопроводящий слой, нанесённый на пьезопластину; 4 – демпфер; 5 – протектор

В настоящее время в основном эксплуатируются аналоговые отечественные дефектоскопы УД2-12, Рельс-6, УДС2-РДМ-3 и фирм Krautkramer (ФРГ), Sonotest (Великобритания), Тосомас (США) и др. [8]. Качество подготовленной поверхности объекта НК оценивают по параметрам шероховатости (ГОСТ 2789–73). Оптимальной считается поверхность с шероховатостью Rz 20–40.

Принципиально новые возможности дает применение цифровой техники. Создание мощных ПЭП малых размеров обеспечило активное совершенствование УЗ-дефектоскопов, обеспечивающих решение широкого спектра задач идентификации скрытых дефектов металлических изделий, но и анализа физико-механических свойств металла.

Для ультразвуковой дефектоскопии изделий в промышленности наибольшее распространение получили следующие разновидности УЗК: эхо-метод, теневой метод, зеркально-теневой метод.

Эхо-метод

Эхо-метод имеет наибольшее распространение. ПЭП объединяет в себе функции и источника, и приёмника УЗ-колебаний. В контролируемое изделие излучаются короткие УЗ-колебания (рис. 2.8).

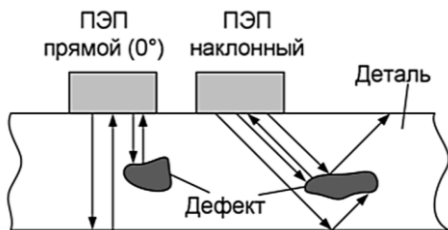


Рис. 2.8 – Схема прохождения УЗ-сигнала при использовании эхо-метода

В промежутках между короткими импульсами УЗ-колебаний ПЭП принимает отраженные от дефектов и противоположных стенок контролируемых деталей сигналы УЗ-волн. При использовании ПЭП 0° на экране дефектоскопа будет виден зондируемый импульс ЗИ, донный сигнал, эхо-сигналы от дефектов. При использовании наклонного ПЭП на экране дефектоскопа будут видны зондирующий импульс ЗИ, эхо-сигналы от дефектов, сигнал от помех и донный сигнал (рис. 2.9).

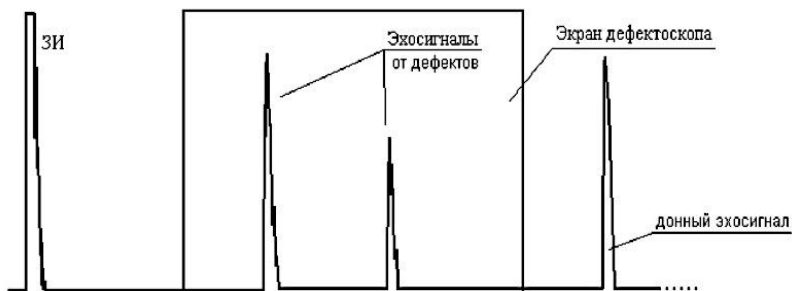


Рис. 2.9 – Типичное изображение сигналов

на индикаторе дефектоскопа:
1 — зондирующий импульс; 2 — помехи ПЭП; 3 — стробирующие импульсы; 4 — структурные помехи материала контролируемой детали; 5 — эхо-сигнал от дефекта; 6 — донный сигнал

В настоящее время трудно найти такую отрасль промышленности, где бы не применялся ультразвуковой эхо-метод для оценки качества сварных соединений, листового проката [10].

К преимуществам эхо-метода относятся:

- односторонний доступ к контролируемому изделию;
- высокая чувствительность при выявлении внутренних несплошностей в контролируемых объектах (изделиях);
- высокая точность определения координат месторасположения дефектов и его размера.

Теневой метод

Теневой метод заключается в сквозном прозвучивании изделия импульсами ультразвуковых колебаний. Этот метод одним из первых стал применяться для контроля металлоизделий. Для излучения и приема ультразвука используют два соосно-расположенных ПЭП, а о наличии дефектов судят по уменьшению амплитуды принимаемых УЗ-колебаний. Теневой метод применяется при двухстороннем доступе к контролируемой детали (рис. 2.10).

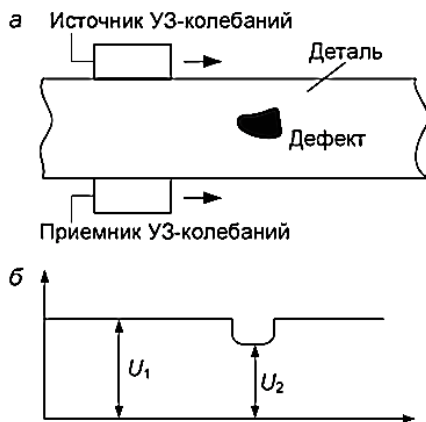


Рис. 2.10 – Формирование сигналов при использовании теневого метода: а – движение ПЭП; б – график приема сигналов

Излучатель УЗ-волн, проверяемая деталь и приёмник образуют «акустический тракт», по которому распространяется УЗ-волна. Решение о дефектности проверяемой детали принимают по величине амплитуды принятого сигнала на выходе принимающего ПЭП. Если на пути УЗ-волн от излучателя до приёмника нет препятствий (несплошностей), отражающих или рассеивающих УЗ-волны, то уровень принятого сигнала на экране U_1 (см. рис. 2.10) максимален. Однако он резко уменьшается или падает почти до нуля U_2 , если на пути УЗ-волны есть несплошность (дефект). Решение принимается при соблюдении требований соосного расположения преобразователей и стабильного их акустического контакта с контролируемой деталью.

Теневым методом наиболее часто применяют для контроля тонкостенных изделий, т.к. при его использовании отсутствуют мертвые зоны. Недостатками метода являются необходимость двустороннего соосного доступа к изде-

лию, соосное расположение ПЭП, низкая чувствительность при контроле изделий средней и большой толщины и невозможность определения глубины залегания дефекта.

Зеркально-теневой метод

Зеркально-теневой метод принципиально не отличается от теневого, но удобен, когда к детали имеется только односторонний доступ (рис. 2.11).

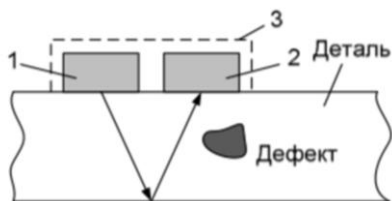


Рис. 2.11 – Прохождение сигнала при использовании зеркально-теневого метода

При контроле этим методом используют один или два ПЭП, размещенные на одной поверхности контролируемого изделия. Признаком дефекта является ослабление амплитуды (уровня УЗ-волны), прошедшей через контролируемое изделие и отражённой от его противоположной поверхности. Размеры дефекта оценивают по уменьшению амплитуды «донного» сигнала. Этот метод применяется при одностороннем доступе к детали. Обычно источник 1 и приёмник 2 объединены в один блок 3 (см. рис. 2.11). Количественно выявляемость дефектов оценивается с помощью коэффициента ослабления донного сигнала K_d .

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются эхо-метод от теневого метода ультразвукового контроля?
2. Расскажите о зеркально-теневом методе.

3. Что называют аналоговым УЗ-дефектоскопом?
4. Какие типы волн используются при УЗ-контроле?
5. Какие материалы используют в ПЭП для возбуждения и приема ультразвука?
6. От чего зависит скорость распространения ультразвука в материале?
7. Как измеряют чувствительность УЗ-дефектоскопа?

2.3. Вихретоковой контроль

Методы НК, основанные на использовании вихревых токов, могут быть применены во время контроля электропроводящих изделий при выявлении дефектов, расположенных вблизи поверхности контролируемого изделия, а также неоднородностей их структуры и отклонений от химического состава [7–10]. В практике производства и восстановительного ремонта деталей механизмов, узлов и агрегатов автомобильной техники, преимущественно двигателей и трансмиссии, использовании метода НК вихревых токов имеет особенно важное значение с позиции обеспечения их надёжности по безопасной эксплуатации.

Когда к поверхности металлического изделия подносится катушка, по которой протекает переменный электрический ток с наведенным в ней переменным магнитным потоком Φ_0 , то в металле контролируемого объекта возбуждаются вихревые токи. Величина возбуждаемых (наведенных) вихревых токов зависит от величины и частоты переменного тока, электропроводности, магнитной проницаемости и формы изделия, а также от наличия в изделии неоднородностей или несплошностей. Чем больше частота возбуждения, электропроводимость или магнитная проницаемость материала, тем меньше глубина, на

которой могут быть наведены вихревые токи в металле контролируемого объекта (изделия, детали). Информацию о свойствах изделия датчик получает через магнитный поток Φ_B , образуемый вихревыми токами с плотностью тока j_B . Векторы напряженности возбуждающего поля H_0 и поля вихревых токов H_B направлены навстречу друг другу. ЭДС в обмотке датчика в каждый момент времени пропорциональна разности потоков $\Phi_0 - \Phi_B$. Регистрируя приращение комплексного сопротивления параметрической катушки или приращение комплексного напряжения на выходе трансформаторного преобразователя, судят о результатах испытаний. Нарушение сплошности является препятствием для вихревых токов, их действие эквивалентно увеличению сопротивления поверхностного слоя металла и приводит к изменению сигнала датчика [8].

Методика НК металлического изделия методом вихревых токов (рис. 2.12) включает в себя следующие операции:

- внешний осмотр изделия и устранение наружных дефектов, мешающих проведению контроля;
- установление ползадающей системы 1 на контролируемое изделие 2 и пропускание тока через возбуждающую катушку;
- сканирование датчика 3 и регистрирующих приборов 4 и 5 вдоль поверхности контролируемого объекта;

– расшифровку результатов контроля и оценку качества изделия.

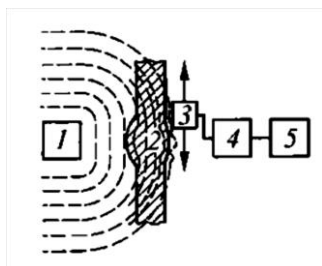


Рис. 2.12 – Схема электромагнитного контроля при использовании вихретокового метода

На чувствительность вихретокового метода значительно влияют зазор между датчиком и поверхностью контролируемого изделия, их взаимное расположение, форма и размеры. С увеличением зазора резко падает чувствительность метода. Допускаемый максимальный зазор составляет 2 мм. Структурная неоднородность тоже снижает чувствительность вихретокового метода к обнаружению дефектов. Этим методом удастся выявить поверхностные и подповерхностные трещины глубиной 0,1–0,2 мм и протяженностью более 1 мм, расположенные на глубине до 1 мм. Перечисленные геометрические факторы обусловили ряд новых возможностей вихретокового метода: измерение толщины слоя гальванических, лакокрасочных, теплоизоляционных покрытий и пленок, определение толщины труб, пустотелых деталей и других тонколистовых изделий при одностороннем доступе к ним, измерение диаметра прутков и проволоки [8].

На рис. 2.13 [11] приведена схема вихретокового преобразователя (датчика) для обнаружения поверхностных дефектов на круглом прокате. Как видно, магнитные сило-

вые линии, проходя через дефект, изменяют траекторию магнитной силовой линии, что фиксируется соответствующим устройством.

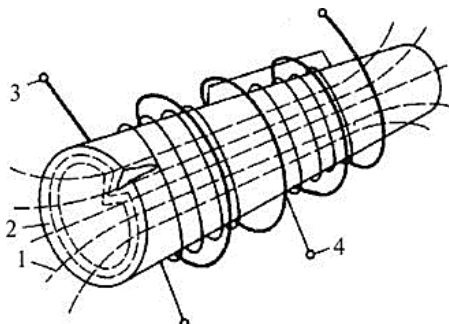


Рис. 2.13 – Схема вихретокового преобразователя для контроля круглого проката:

1 – магнитные силовые линии; 2 – траектории вихревых токов; 3 – первичная обмотка; 4 – вторичная обмотка

Несколько иначе работает дефектоскоп Rotoflux (Германия (рис. 2.14). Благодаря наведению переменного магнитного поля повышенной частоты (несколько кГц) и большой напряженности при вращающемся магнитопроводе удалось значительно повысить чувствительность дефектоскопа Rotoflux, у которого наблюдается почти линейная зависимость между амплитудой сигнала и его глубиной, что увеличивает точность определения глубины залегания дефекта. Кроме того, на данной установке не наблюдается остаточной намагниченности проката после контроля, как на предыдущей.

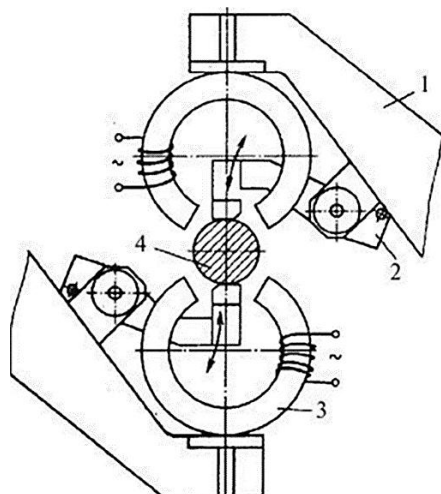


Рис. 2.14 – Принципиальная схема дефектоскопа Rotoflux

Конструктивно два зонда и два магнитопровода 3 для намагничивания прутка 4 закреплены на подвижных и регулируемых рычагах 1 и 2, причем сканирующие зонды располагаются внутри каждого магнитопровода. На каждом рычаге размещено шесть сканирующих зондов, что позволяет получить узкую спиральную дорожку и обнаруживать дефекты, встречающиеся на этой дорожке. При скорости проката до 90 м/мин обеспечивается 100 %-ное выявление дефектов длиной более 17 мм. В процессе контроля сигналы от зондов индуцируются на мониторе и регистрируются самописцем. Выявленные дефекты маркируются краской, выбрасываемой из пистолета.

Представляет интерес портативный переносной вихретоковой дефектоскоп ВД-70 (НПК «Луч»), предназначенный для ручного и оперативного выявления и оценки величины поверхностных трещин и др. Прибор работает по

черновой горячекатаной поверхности с вторичной окалиной. Вихретоковой дефектоскоп ВД-70 (НПК «Луч») может быть использован стационарно в установках, контролирующих дефекты на круглом и плоском прокате.

Контрольные вопросы

1. Как графически изображают импеданс электромагнитной катушки?
2. Какие материалы не могут быть объектами токовихревого контроля?
3. Когда применяется амплитудный способ выделения информации при вихревом контроле?
4. Каким способом можно повысить отношение сигнал/шум при УЗ-дефектоскопии объектов контроля?
5. Расскажите о преимуществах и недостатках магнитного контроля.
6. Расскажите о преимуществах и недостатках УЗ-контроля.
7. Расскажите о преимуществах и недостатках токовихревого контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богатов, А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 164 с. — ISBN 978-5-7996-2031-8.
2. Кокорин, В.Н. Специальные способы обработки металлов давлением: учеб. пособие / В.Н. Кокорин, Ю.А. Титов, В.Н. Таловеров и др. — Ульяновск: УлГТУ, 2006. — 36 с. — ISBN 5–8914 6–700–0.
3. Толмачев, И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учеб. пособие / И.И. Толмачев. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — 216 с. — URL.: <https://docplayer.ru/27897614-Magnitnye-metody-kontrolya-i-dagnostiki.html>.
4. ГОСТ Р 55612-2013 Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. — URL.: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55253/>.
5. Электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП). Новое направление в УЗ-контроле. — URL.: <https://ntcexpert.ru/component/content/article/59-raznoe/562-jelektromagnit-no-akusticheskie-preobrazovateli>.
6. Петров, К.В. Зеркально-теневой метод контроля цилиндрических изделий с использованием электромагнитноакустических преобразователей: дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук / К.В. Петров. — Ижевск, 2020.
7. Лаптева, И.И. Неразрушающий контроль деталей вагонов: учеб. пособие / И.И. Лаптева, М.А. Колесников. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2012. — 103 с.: ил. — URL.: http://static.scbist.com/scb/uploaded/1_1347944641.pdf.
8. Ивасев, С.С. Методы неразрушающего контроля: учеб. пособие / С.С. Ивасев, А.В. Гирн, Д.В. Раводина. Сиб. гос.

аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – 112 с. – URL.: <https://www.sibsau.ru/sveden/edufiles/69666/>.

9. ГОСТ 56542-2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – URL.: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293725/4293725706.pdf>.

10. Кашубский, Н.И. Методы неразрушающего контроля. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий: электрон. учеб. пособие / Н.И. Кашубский, А.А. Сельский, А.Ю. Смолин, А.А. Кузнецов, В.И. Афанасов. – Красноярск, ИПК СФУ, 2009. – ISBN: 978-5-7638-1765-2.

11. Дефекты сортового проката и методы их обнаружения https://ozlib.com/854800/tehnika/defekty_sortovogo_prokata_metody_obnaruzheniya.

12. Белевитин, В.А. Научно-исследовательская работа магистранта: теория и практика организации и проведения: учеб. методич. пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. – Челябинск, 2017. – 122 с. – ISBN: 978-5-906908-86-5.

13. Белевитин, В.А. Материаловедение: свойства металлов и сплавов: учеб. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2012. – 236 с. – ISBN 978-5-85716-917-9

14. Белевитин, В.А. Упрочнение и восстановление деталей машин: справоч. пособие / В.А. Белевитин, А.В. Суворов. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2015. – 251 с.: ил. – ISBN 978-5-906777-38-6.

15. Бражников, А.И. Об ультразвуковом контроле скорости потока жидкости без расстыковки трубопровода по методу Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников и [др.] // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79. – № 2. – С. 131–138. – ISSN: 0021-0285.

16. Минаев, А.А. Расчет параметров пластического формоизменения сортовых заготовок / А.А. Минаев., В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1990. – № 12. – С. 26–28.
17. Воронцов, В.К. К постановке и решению объемной задачи пластического течения методами экспериментальной механики / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1976. – № 4. – С. 75–80.
18. Воронцов, В.К. К решению объемной задачи стационарного пластического течения металла методом координатной сетки / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1976. – № 9. – С. 77–80.
26. Бражников, А.И. Ультразвуковой спектральный метод технологического контроля концентрации электролита Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников и [др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 3. – С. 54–56. – ISSN: 2073-0004.
27. Голубчик, Р.М. О выборе оптимального соотношения диаметров валков и заготовки для винтовой прокатки / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин // Сталь. – 1982. – № 8. – С. 64–66.
28. Бражников, Н.И. Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин и [др.]. – Москва, 2008. – ISBN 5-98457-056-4.
29. Belevitin, V.A. The Study of Three-Dimensional Flow of Metal under Free Forming / V.A. Belevitin, V.F. Obesnyuk, E.R. Logunova // Металлы. 2003. – № 1. – С. 26–32. – ISSN: 0036-0295.

30. Белевитин, В.А. Операционно-зачетные работы по общеслесарной производственной практике: сб-к лаб. работ / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Е.П. Меркулов. – Челябинск: ЧГПУ, 2015. – 184 с. – ISBN 978-5-906777-44-7.
31. Карпенко, А.Г. Автомобильные эксплуатационные материалы: сб-к лаб. работ / А.Г. Карпенко, К.В. Глемба, В.А. Белевитин. – Челябинск: ЧГПУ, 2014. – 124 с. – ISBN 978-5-906777-00-3
32. Воронцов, В.К. Исследование полей перемещений при прокатке квадратной полосы в овальном калибре / В.К. Воронцов, Ю.С. Атеф, В.В. Бринза и [др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1977. – № 5. – С. 101–105.
33. Бражников, А.И. Бесконтактный одноканальный времяимпульсный расходомер жидкости / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова и др. // Метрология. – 2004. – № 11. – С. 16. – ISSN: 0132-4713.
34. Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль качества кованых валов / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 47–48. – ISSN: 0038-920X.
35. Гнатышина, Е.А. Профессионально-педагогическое образование на рубеже веков: коллективная монография / Гнатышина Е. А., Герцог Г. А., Савченков А. В. и др. – Челябинск, 2014. – 304 с.: ил., табл. – ISBN 978-5-9905576-6-6.
36. Карпенко, А.Г. Материаловедение. Расходные материалы автотранспортной техники: учеб. пособие / А.Г. Карпенко, В.А. Белевитин. – Челябинск: ЧГПУ, 2013. – 227 с.: ил. – ISBN 978-5-85716-959-9.
37. Smyrnov, Y.N. Physical and Computer modeling of new soft reduction Process of continuously cast blooms / Y.N. Smyrnov, V.A. Belevitin, et all // Journal of Chemical Tech-

nology and Metallurgy, 2015. – 50. – № 6. – pp. 12–17. – ISSN: 1314-7471.

38. Belevitin, V.A. Simulation of the macrostructure influence of forging ingots on the potential capabilities of obtaining highquality forgings / V.A. Belevitin, Ye.N. Smyrnov, S.Y. Kovalenko, et all // Metallurgical and Mining Industry, Ukrmetallurginform “Scientific and Technical Agency”. Ltd., – 2016. – № 7. – pp. 18–23. – ISBN 2310-306X.

39. Smyrnov, Y.N. Defect Healing in the Axial Zone of Continuous-Cast Billet / Y.N. Smyrnov, V.A. Skliar, V.A. Belevitin // Steel in Transiation, Allerton Press. 2016. – Vol. 46. – No. 5. – pp. 325–328. – ISSN: 0967-0912.

40. Серов, А.И. Промышленные испытания мелющих шаров повышенной твердости при измельчении железистых кварцитов / А.И. Серов, Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр [и др.] // Обогащение руд. – Москва: Издательский дом "Руда и металлы", 2017. – № 3. – С. 15–20. – ISSN: 0202-3776.

41. Смирнов, А.Н. Вопросы использования непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката из конструкционных сталей / А.Н. Смирнов, Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр и [др.] // Сталь. – Москва: Изд-во: ООО "Интермет Инжиниринг", 2018. – № 4 (369). – С. 7–12. Smirnov, A.N. PRODUCING STRUCTURAL-STEEL BAR FROM CONTINUOUS-CAST BILLET / A.N. Smirnov, E.N. Smirnov, V.A. Sklyar, et all Steel in Translation. 2018. – Т. 48. – № 4. – С. 233-239. – ISSN: 0038-920X.

42. Belevitina, I.P. An Ultrasound Method for Controlling the Quality of Shaped Forgings / I.P. Belevitina, N.I. Brashnikov, V.A. Belevitin // Metallurgist : Изд-во: Springer New York Consultants Bureau, 1996. – Т. 39. № 10. – С. 198. – ISSN: 0026-0894.

43. Белевитин, В.А. Влияние тернарности представления учебной информации на повышение креативности обучающихся / В.А. Белевитин, Е.А. Гафарова, Ю.В. Корчемкина и [др.] // European Social Science Journal. – Москва: Изд-во: Автономная некоммерческая организация "Междун. иссл. институт", 2017. – № 6. С. 194-200. – ISSN: 2079-5513.
44. Белевитин, В.А. Магистерская диссертация: рекомендации по подготовке к защите: учеб. пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. – Челябинск, 2016. – 158 с. – ISBN 978-5-906777-87-4.
45. Смирнов, Е.Н. Исследование формоизменения и напряженно-деформированного состояния непрерывнолитой заготовки с дефектом формы «ромбичность» в процессе прокатки в прямоугольных калибрах / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, С.А. Снитко и [др.]. // Современные проблемы горнометаллургического комплекса: наука и производство. – Старый Оскол, 2016. – С. 147–152. – Elibrary.ru/item.asp?id=27563772id=-27563772.
46. Смирнов, Е.Н. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, В.А. Белевитин и [др.]. // Известия высших учебных заведений. – Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 322-327. – ISSN: 0368-0797.
47. Смирнов, Е.Н. Технология конструкционных материалов: производство горячекатаных блюмов и сортовых заготовок / Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин, В.А. Скляр и [др.]. – Челябинск, 2016. – 187 с.: ил. – ISBN 978-5-906777-62-1.

Справочное издание

**Белевитин Владимир Анатольевич, Смирнов Евгений Николаевич,
Хасанова Марина Леонидовна**

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Справочное пособие

ISBN 978-5-907409-41-5

Работа рекомендована РИС университета
Протокол № 22 от 2021 г.
Издательство ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор Е.М. Сапегина
Компьютерный набор В.А. Белевитин

Подписано в печать 26.03.2021 г.
Формат 60x84/16 Объем _____ уч.-изд. л.

Бумага типографская. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ЮУрГГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69