

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

О.М. ЛЕВКО

**ДІАГНОСТИКА ТА ДЕФЕКТОСКОПІЯ
МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ**

**Частина 2. Методи та засоби неруйнівного
контролю якості продукції**

Дніпропетровськ НМетАУ 2015

УДК 539.51 (075.8)

Левко О.М. Діагностика та дефектоскопія матеріалів і виробів. Частина 2. Методи та засоби неруйнівного контролю якості продукції: Навч. посібник (російською мовою). – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – 58 с.

Системно та послідовно розглянуто металографічні методи та засоби контролю якості продукції, методи неруйнівного контролю якості продукції, методи визначення твердості матеріалів і виробів.

Призначений для студентів напрямку 6.050403 – інженерне матеріалознавство усіх форм навчання.

Іл. 8. Табл. 1. Бібліогр.: 12 найм.

Друкується за авторською редакцією.

Відповідальна за випуск С.Й. Пінчук, д-р техн. наук, проф.

Рецензенти: Н.Є. Калініна, д-р техн. наук, проф. (ДНУ ім. О. Гончара)
О.В. Бекетов, канд. техн. наук, доц. (ПДАБА)

©Національна металургійна академія
України, 2015

©Левко О.М., 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ.....	5
1.1. Методы выявления дефектов.....	7
1.2. Средства контроля качества продукции.....	19
2. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ.....	31
3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ.....	44
Вопросы для самоконтроля.....	50
ЛИТЕРАТУРА.....	57

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Диагностика и дефектоскопия материалов и изделий» состоит из двух частей. Часть 1 – «Техническая диагностика. Дефекты металлических материалов и изделий». Часть 2 – «Методы и средства неразрушающего контроля качества продукции».

В части 2 учебного пособия «Методы и средства неразрушающего контроля качества продукции» рассмотрены физические методы контроля качества металлов и изделий из них, не требующие вырезки образцов или разрушения готовых изделий. Основные достоинства этих методов контроля выявляются при использовании их в серийном производстве.

Широкое применение неразрушающих методов контроля позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, а также обеспечить полную или частичную автоматизацию операций контроля с одновременным значительным повышением качества и надежности изделий. Важность развития неразрушающих методов контроля обусловлена также теми новыми задачами, которые ставит перед ними стремительный прогресс науки и техники. Ни один технологический процесс получения ответственной продукции не рекомендуется для внедрения в промышленность без соответствующей системы неразрушающего контроля.

Все это объясняет то огромное внимание, которое уделяется дефектоскопии в нашей стране и за рубежом.

Дисциплина «Диагностика и дефектоскопия материалов и изделий» включает вопросы металловедческого анализа и исследования качества стали и сплавов, применения физических методов в практике работы специалистов-материаловедов и статистических методов количественной металлографии, изучение комплексного исследования природы дефектов, причины разрушения, контроля металла, слитков и сварных соединений.

1. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Контролю технологических процессов и качеству прокатной продукции уделяется большое внимание. Контроль осуществляется качественными и количественными методами визуально или при помощи приборов и инструментов.

Основными требованиями, предъявляемыми к методам испытаний контроля качества продукции, являются их надежность, которая выражается в повторяемости результатов при многократных испытаниях одного и того же материала, и доступность, т.е. возможность их использования в производственных условиях без применения сложных дорогостоящих установок или уникальных приборов. Кроме того, время испытания качества продукции должно быть таким, чтобы обеспечить возможность проверки поставляемой прокатной продукции в условиях поточного производства.

В процессе *приемочного контроля* осуществляются оценка качества поверхности прокатной продукции, наличия внутренних дефектов, механических свойств металла, проводятся его технологические испытания.

Оценка качества поверхности металла.

Грубая оценка предусматривает осмотр поверхности полупродукта и готового проката с местной зачисткой ее (светлением) в виде колец, зигзагообразной шлифовкой наждачным кругом или без нее.

При повышенных требованиях к качеству поверхности осуществляют травление изделий в водных растворах кислот для полной очистки их поверхности от окалины. Простая визуальная оценка выявляет число и характер расположения дефектов, но не позволяет определить глубину их залегания.

Для выявления глубины залегания поверхностных дефектов и выявления подповерхностных дефектов применяют ступенчатую обточку круглых и строганных квадратных образцов до 3 – 5-й ступеней.

Оценка внутренних дефектов осуществляется макроисследованием проката, которое может производиться двумя путями:

– способом излома. В этом случае темплет толщиной 15 – 30 мм подвергают термообработке и ломают по оси под молотом. Излом рассматривают невооруженным глазом или через лупу. По балльной системе

оценивают следы усадочной раковины и рыхлости, неметаллические включения, расслой, флокены, пузыристость, волокнистость, прокаливаемость, величина зерна.

– способом макротравления.

На рисунке 1.1 приведен пример оценки величины зерна в баллах.

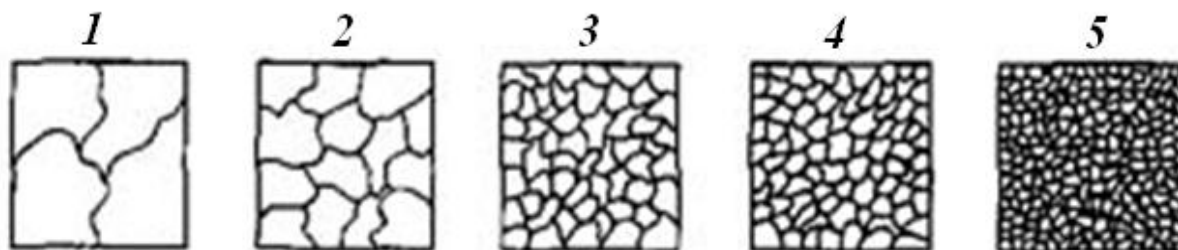


Рис. 1.1. Оценка величины зерна в баллах, 1÷5

Темплеты шлифуют и травят в водных растворах кислот. По балльной шкале оценивают дефекты макроструктуры: центральную пористость, подкорковые пузыри, межкристаллитные трещины и др.

Микроисследования проката осуществляют на полированных шлифах под микроскопом с балльной оценкой следующих дефектов:

- глубины обезуглероженного слоя;
- количества и величины неметаллических включений;
- структуры стали;
- карбидной неоднородности или цементной сетки и др.

При исследовании механических свойств применяют следующие виды испытаний.

1. *Испытание на растяжение* производят на стандартных и натурных термообработанных образцах при комнатной и высокой температурах на разрывных машинах в специальных лабораториях. Имеются основные стандарты на методы испытаний растяжением и стандарты на методы испытаний тонких листов и полос толщиной от 3 до 0,5 мм.

2. *Испытание на ударную вязкость* на специальном копре характеризует хрупкость стали при ударной нагрузке. Применяют образцы квадратного сечения 10x10 мм длиной 55 мм, испытываемые на изгиб на двух опорах. Ударная вязкость определяется отношением величины работы,

расходуемой на ударный излом, к рабочей площади поперечного сечения образца в месте надреза.

3. *Испытание на твердость* осуществляют вдавливанием стального шарика (испытание по Бринеллю), алмазного конуса (испытание по Роквеллу) или пирамиды (испытание по Виккерсу) под определенной нагрузкой.

Для получения технологических характеристик металла в практике производства проката используют технологические испытания:

- на загиб и перегиб;
- на расплющивание (двойной кровельный замок);
- на выдавливание, штампуемость (проба Эриксона);
- на удар; на усталость; на кручение;
- на осадку;
- на сплющивание и др.

Условия проведения испытаний отражены в соответствующих стандартах.

1.1. Методы выявления дефектов

Макроскопический анализ. Макроанализ заключается в определении строения металла путем осмотра его излома или специально подготовленной поверхности невооруженным глазом или через лупу при небольших увеличениях (до 30 раз). При этом может осматриваться одновременно большая поверхность и удастся получить общее представление о строении металла и о наличии в нем определенных дефектов.

Макроскопический анализ не отражает подробностей строения металла и часто является предварительным видом исследования. Характеризуя ряд особенностей строения металла, макроанализ позволяет выбрать те участки изделия, которые требуют дальнейшего микроскопического исследования.

С помощью макроанализа можно определить:

- нарушение сплошности металла: усадочную рыхлость, газовые пузыри и раковины, пустоты, образовавшиеся в литом металле, трещины, возникшие при горячей механической или термической обработке, флокены, дефекты сварки (в виде непровара, газовых пузырей, пустот);
- дендритное строение и зону транскристаллизации в литом металле;

- химическую неоднородность сплава (ликвацию);
- неоднородность строения сплава, вызванную обработкой давлением (полосчатость), а также линии скольжения (сдвигов) в наклепанном металле;
- неоднородность, созданную термической или химико-термической обработкой.

Поверхность, подлежащую макроанализу, изучают непосредственно (по виду излома) или шлифуют и подвергают травлению специально подготовленными реактивами. На шлифованной поверхности не должно быть загрязнений, следов масла и т. п., поэтому ее перед травлением протирают ватой, смоченной в спирте. Подготовленный образец называют макрошлифом.

Для успешного выполнения макроанализа большое значение имеет правильный выбор наиболее характерного для изучаемой детали сечения или излома.

Способы макроанализа различны в зависимости от состава сплава и задач, поставленных в исследовании.

1. Для выявления дефектов, нарушающих сплошность металла, флокенов, строения литой стали, волокон катаной стали применяют реактивы глубокого либо поверхностного травления.

Глубокое травление заключается в обработке поверхности макрошлифа растворами неорганических кислот, в результате чего участки, неоднородные по составу, обладающие более развитой и активизированной поверхностью, протравливаются различно. Образуется макрорельеф с участками поверхности большей и меньшей высоты, которые при большей глубине резкости невооруженного глаза или малых увеличениях могут быть идентифицированы. Составы наиболее распространенных реактивов для глубокого травления стали представлены в таблице 1.1.

После травления макрошлиф приобретает рельефную поверхность с отчетливо видимыми осями дендритов (литая сталь), ликвационной зоной и трещинами (если они были в изломе или если в металле обнаружился флокены). Для этих целей чаще применяют поперечные макрошлифы (темплеты).

Травление производят в вытяжном шкафу. Макрошлифы вынимают из реактива щипцами или рукой, защищенной резиновой перчаткой.

Таблица 1.1

Рекомендуемые реактивы и режимы глубокого травления стали

Вид стали	Состав реактива	Температура, °С	Длительность травления, мин.
Все марки сталей, кроме приведенных ниже	50 % -ный водный раствор HCl	60 – 80	5 ÷ 45
Коррозионностойкие, жаростойкие и другие стали аустенитного класса	100 мл HCl; 10 мл H ₂ SO ₄ ; 100 мл H ₂ O	60 – 70	5 ÷ 10

Для *поверхностного травления* применяют реактив Гейна, содержащий 53 г хлористого аммония NH₄Cl, 85 г хлористой меди CuCl₂ на 1000 мл воды.

При погружении макрошлифа в реактив на 30 – 60 с железо вытесняет медь из водного раствора, и она оседает на поверхности шлифа. На участках, недостаточно защищенных медью (поры, трещины, неметаллические включения), происходит травление. Затем макрошлиф вынимают; слой осевшей меди смывают струей воды; макрошлиф протирают досуха, чтобы предохранить его от быстрого окисления на воздухе.

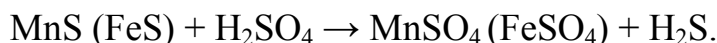
Реактив Гейна более отчетливо выявляет характер ликвации и полосчатость деформированной стали, но менее резко выявляет структуру литого металла и трещины, особенно вызванные флокенами. Для последних целей более пригодны указанные выше реактивы глубокого травления.

2. Определение химической неоднородности. С помощью макроанализа, в отличие от химического анализа, нельзя определить количественное содержание примесей, но можно установить неоднородность распределения их в металле. Для этой цели макрошлиф следует вырезать из катанной или кованной стали в продольном направлении.

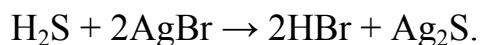
Распределение серы определяют следующим образом (способ Баумана). Фотографическую (бромосеребряную) бумагу на свету смачивают или выдерживают 5 – 10 мин в 5 %-ном водном растворе серной кислоты и слегка просушивают между листами фильтровальной бумаги для удаления лишнего раствора. После этого на приготовленный макрошлиф укладывают фотобумагу

и слегка и осторожно, не допуская смещения бумаги, проглаживают рукой или резиновым валиком для удаления оставшихся между бумагой и макрошлифом пузырьков воздуха, так как эти пузырьки оставляют на фотобумаге белые пятна и маскируют результаты анализа. Фотобумагу выдерживают на макрошлифе 2–3 мин.

Сернистые включения (MnS , FeS), имеющиеся в поверхностных участках металла, реагируют с серной кислотой, оставшейся на фотобумаге:



Образующийся сероводород непосредственно против очагов своего выделения воздействует на кристаллики бромистого серебра фотоэмульсии:



Темные участки сернистого серебра, образующиеся на фотобумаге, отражают форму и характер распределения сульфидов.

Снятую с макрошлифа фотобумагу промывают под струей воды, фиксируют в течение 20 – 30 мин в растворе гипосульфита, после чего промывают примерно 10 мин в воде и просушивают.

Если в стали и чугуна содержится повышенное количество фосфора, то он в отдельных участках, вследствие значительной ликвации, может также участвовать в реакции с бромистым серебром, образуя фосфиды серебра темного цвета.

Определение ликвации углерода и фосфора. Для этой цели используют указанный выше реактив Гейна.

Способ определения ликвации фосфора и углерода основан на неодинаковом травлении участков с различным содержанием этих элементов. Участки, обогащенные углеродом и фосфором, окрашиваются в более темный цвет. Лучшие результаты достигаются для стали, содержащей менее 0,6 % С. В стали с более высоким содержанием углерода осадок меди, выделяющийся при травлении, плохо смывается с поверхности шлифа.

3. Определение неоднородности строения металла, т.е. полосчатости, созданной обработкой давлением. Направление волокон, созданное обработкой давлением, хорошо выявляется реактивом Гейна, т.к. волокна и особенно их

пограничные участки, отличающиеся по структуре и содержанию примесей, обладают неодинаковой травимостью.

4. Определение неоднородности структуры вследствие термической и химико-термической обработки.

А. *Определение толщины закаленного слоя.* Закаленный образец ломают. Излом слоя, получившего закалку мелкозернистый, а при закалке без перегрева излом фарфоровидный. Наиболее точно толщину закаленного слоя определяют после шлифования образца по излому (перпендикулярно оси) и травления в течение трех минут в 50 %-ном растворе соляной кислоты при 80 °С. Закаленный слой получает более темную окраску.

Б. *Определение толщины цементированного слоя.* Образец после цементации и закалки ломают. Наружный цементованный и закалившийся слой имеет более мелкое зерно, при выполнении цементации и закалки без перегрева отличается матовым фарфоровидным (шелковистым) изломом. По толщине этого слоя судят о глубине цементации.

Толщину цементованного слоя можно определять более точно шлифованием места излома (перпендикулярно оси) и травлением в течение 1 – 2 минут в реактиве, содержащем 2 г Cu Cl_2 на $2\text{H}_2\text{O}$ и 1 мл HCl на 100 мл спирта. Мягкая нецементованная сердцевина покрывается красноватым налетом меди вследствие вытеснения ее железом из реактива, тогда как цементованный слой останется нетронутым.

Последовательность операции макроанализа. При необходимости полного макроскопического исследования и определения как нарушений сплошности металла, так и дефектов структуры, предусматривается выполнение следующих операций:

- травление образцов реактивом Гейна, что позволяет выявить строение металла. Результаты зарисовывают или фотографируют.
- повторное шлифование образца и определение распределения серы по отпечатку на фотобумаге.
- глубокое травление для определения нарушений сплошности и флокенов.

Наиболее широко применяют метод отпечатков для выявления серы, а также для выявления оксидов при определении наличия фосфора в стали.

Самым простым и распространенным является метод Баумана. Специальные шкалы позволяют оценивать качество металла по количеству, размеру, форме и распределению сернистых включений на отпечатке.

Метод отпечатков состоит в том, что изображение макроструктуры появляется не на шлифе, а на фотобумаге, фотопленке или материи. Материал с нанесенным на него реактивом прижимают к поверхности шлифа. Плотность контакта должна быть полной, не допускается наличие пузырьков воздуха. Реактивы реагируют с определенными структурными составляющими, образуя характерное окрашивание структуры.

Микроскопический анализ. Микроанализ металлов заключается в исследовании их структуры с помощью оптического (используется обычное белое или ультрафиолетовое излучение) и электронного микроскопов.

При использовании оптического микроскопа структуру металла можно изучать при общем увеличении в диапазоне от нескольких десятков до 1500 раз. Микроанализ позволяет характеризовать размеры и расположение различных фаз, присутствующих в сплавах, если размеры частиц этих фаз больше 0,2 мкм. Многие фазы в металлических сплавах имеют размеры $10^{-4} \div 10^{-2}$ см и поэтому могут быть различимы в микроскопе.

При микроанализе однофазных сплавов (обычно твердых растворов) и чистых металлов можно определять величину зерен и наличие дендритного строения.

Определение размеров зерен проводят методами количественной металлографии либо путем сопоставления структуры с заранее составленными шкалами.

Дендритное строение связано с определенной химической неоднородностью, выявляемой при травлении образца, подлежащего микроанализу. Если однофазные сплавы состоят из вполне однородных по составу зерен, то это указывает на достижение равновесного их состояния.

В многофазных сплавах с помощью микроанализа можно определить не только количество, форму и размеры включений отдельных фаз, но и их взаимное распределение.

Разные фазы могут образовывать устойчивые формы взаимного распределения, характерные не только для одного какого-либо сплава, но и для целых групп сплавов, имеющих общие типы превращений (эвтектические и эвтектоидные), описываемых диаграммами состояния. Количество

эвтектической или эвтектоидной структуры, а также строение и характер распределения этих структур оказывают существенное влияние на свойства сплавов. В частности, свойства стали весьма сильно зависят от количества эвтектоида и его строения. Форма эвтектоида в зависимости от характера термической обработки может быть различной – от грубо пластинчатой до мелкозернистой.

Другие сочетания фаз могут зависеть от условий термической и горячей механической обработки. Фазы могут находиться в металле в виде отдельных включений округлой, пластинчатой или игольчатой формы, а также в виде строк и сеток. Например, равномерное распределение карбидов в структуре заэвтектоидной стали обеспечивает высокие механические свойства инструмента, тогда как наличие сетчатого распределения цементита по границам зерен (цементитной сетки) вызывает хрупкость.

Пользуясь методами микроанализа, можно также оценить свойства ряда многофазных сплавов, в частности, чугуна, для которого имеются специальные шкалы, классифицирующие по форме и количеству графит и фосфидную эвтектику.

По площади, занимаемой каждой фазой или структурной составляющей в поле зрения микроскопа, можно в ряде случаев определить количество присутствующих фаз, если известна их плотность. Кроме того, если известен состав каждой из фаз, можно приблизительно определить и состав изучаемого сплава. Такие расчеты достаточно точны только, если присутствующие фазы не слишком дисперсны и присутствуют в значительном количестве.

С помощью микроанализа можно определить структуру сплава не только в равновесном, но и в неравновесном состояниях, что в ряде случаев позволяет установить предшествующую обработку сплава.

Изменение структуры от поверхностного слоя к середине изделий указывает на характер нагрева (наличие окисления или обезуглероживания стали) или на применение химико-термической обработки (цементации, азотирования и т. д.).

Приготовление микрошлифов. В оптическом микроскопе рассматриваются микрошлифы – специальные образцы металла, имеющие шлифованную и полированную гладкую поверхность, отражающую световые лучи.

Вырезка образца из исследуемого металла. Детали или специальные образцы небольших размеров и массы после подготовки поверхности можно непосредственно установить на столике микроскопа. Если же размеры или масса детали (образца) значительны или если трудно получить на детали плоскую поверхность, необходимо вырезать из детали специальный образец, часто называемый темплетом.

Особое значение для результатов исследования имеет выбор участка детали, из которого надо вырезать образец, и выбор поверхности микрошлифа. Этот выбор зависит от цели исследования и формы детали.

Микроструктуру литых металлов и сплавов (в фасонных отливках) проверяют в различных сечениях отливки — от самых больших до минимальных, так как такие участки обычно охлаждаются с различной скоростью, а структура многих литейных сплавов, например, чугуна или бронзы зависит от скорости охлаждения. Важно определить, в каком направлении следует изготовить микрошлиф. Часто выбирают плоскость, на которой производят изучение микроструктуры, перпендикулярную поверхности отвода тепла, чтобы можно было определить структуру в периферийных и срединных слоях металла.

Для изучения микроструктуры слитка вырезают несколько темплетов таким образом, чтобы можно было определить изменение структуры по ряду поперечных сечений.

При исследовании влияния пластической деформации место вырезки образца целесообразно определить по данным макроанализа, когда выявлены направление течения металла и наиболее характерные участки детали. Если изделие подвергалось ковке или штамповке, важно изучить участки, где, например, имели место наиболее сложная гибка или большая вытяжка, а также объемы металла, на которые не распространялась деформация. Во всех этих случаях необходимо исследовать микроструктуру, главным образом, в направлении течения металла, а иногда также и в перпендикулярном направлении. Из крупных деталей целесообразно вырезать несколько образцов в разных участках, что позволяет характеризовать однородность строения металла, из которого изготовлено данное изделие.

Структуру сплавов, прошедших термическую обработку, исследуют как в поверхностных, так и в более глубоких слоях детали, в соответствии с чем и изготавливают образцы для микроанализа.

При оценке свойств сплавов, находящихся в неравновесном состоянии, необходимо, наряду с микроанализом, использовать и другие методы исследования и, прежде всего, измерение твердости.

При исследовании причин разрушения различных деталей в процессе эксплуатации образцы для анализа вырезают вблизи места разрушения и в отдалении от него, чтобы можно было определить наличие каких-либо отклонений в строении металла. Кроме того, изучают структуру в продольном и поперечном направлениях.

Получение плоской поверхности образца. Поверхность образца, на которой будет проводиться металлографическое исследование, подвергают специальной обработке. В первую очередь получают приблизительно плоскую поверхность. Для этого образцы небольших размеров помещают в специальный зажим, состоящий обычно из двух пластин, которые можно с помощью винтов сближать и раздвигать, либо заливают в специальные легкоплавкие сплавы (серу и т. п.), либо запрессовывают в пластмассу.

Заливку производят следующим образом: на металлическую или керамическую пластинку устанавливают круглую или квадратную оправку (из стали или латуни) и внутрь оправки помещают образец таким образом, чтобы подготавливаемая поверхность опиралась на пластинку. Затем жидкую легкоплавкую массу заливают в оправку с достаточно плотным ее заполнением.

Шлифование плоскости образца. После получения приблизительно плоской поверхности образец шлифуют наждачной бумагой, либо помещенной для этого на плоском основании (обычно на стекле), либо закрепленной с помощью зажимных колец, либо наклеенной на вращающийся круг.

Шлифование производят наждачной бумагой различного сорта последовательно – сначала с более крупным, а затем с более мелким зерном абразива. Направление движения образца по наждачной бумаге или положение образца относительно направления круга при смене сорта бумаги изменяют на 90° для лучшего удаления гребешков и рисок, созданных предыдущим шлифованием.

Остающиеся на поверхности образца после шлифования частицы абразивного материала удаляют обдуванием воздухом или промывкой водой.

При шлифовании очень мягких металлов вырывающиеся из наждачной бумаги абразивные частицы и металлические опилки могут легко вдавливаются в поверхность мягких металлов. Поэтому наждачную бумагу предварительно

смачивают в керосине или натирают парафином. Последнее применяют, например, при изготовлении микрошлифов из алюминия.

Полирование плоскости образца. Полированием удаляют оставшиеся после шлифования мелкие риски. Применяют механический, химико-механический и электрохимический способы полирования.

Механическое полирование производят на вращающемся круге с натянутым или наклеенным полировальным материалом (фетр, бархат, тонкое сукно), на который непрерывно или периодически наносят абразивное вещество с частицами очень малых размеров (оксид хрома, оксид алюминия, оксид железа и т. д.). Эти абразивные вещества предварительно замачивают в воде.

Полировальный круг должен быть влажным, а нажатие образца на круг незначительным. Скорость вращения круга диаметром 250 мм должна быть $400 \div 600$ об/мин.

Полирование считается законченным, когда поверхность образца приобретает зеркальный блеск и даже под микроскопом не видны риски или царапины.

Химико-механическое полирование производят полировальным кругом, на который вместе с абразивом наносят химические вещества, способствующие более быстрой обработке поверхности образца.

Для полирования черных металлов применяют пасту ГОИ, которая состоит из трехоксида хрома, стеарина, керосина, силикагеля и других веществ и может быть трех сортов в зависимости от различной зернистости.

Для полирования цветных и некоторых редких металлов применяют травящие химически активные реактивы (например, раствор желтой кровяной соли), которые ускоряют процесс полирования, а в некоторых случаях выявляют также микроструктуру без специального последующего травления.

Электрохимическое полирование производят, помещая образцы в электролитическую ванну и присоединяя их к положительному полюсу. Катодом обычно является пластинка из нержавеющей стали. Шлифованную поверхность образца располагают против катода. При включении тока происходит анодное растворение выступов на шлифованной поверхности, в результате чего поверхность образца постепенно становится ровной (зеркальной).

Этот способ является более совершенным, обеспечивает быстрое проведение операции полирования, позволяет полностью избежать изменения структуры в поверхностном слое образца и, кроме того, иногда выявляет особенности микроструктуры, не обнаруживаемые после полирования механическим способом и химического травления. Важным преимуществом электрохимического полирования является устранение наклепа поверхностных слоев, который может образоваться при шлифовании или механическом полировании металлов (особенно при изготовлении шлифов металлов невысокой твердости).

После полирования, независимо от способа его выполнения, микрошлиф промывают водой, затем, если сплавы окисляются, промывают спиртом и просушивают фильтровальной бумагой.

Изучение микроструктуры. Изучение микроструктуры начинают с рассмотрения шлифа в нетравленном виде, т. е. после полирования и промывки. В этом случае в поле зрения микроскопа можно заметить отдельные, обычно небольшие, темные участки. Они могут представлять неметаллические включения, мелкие поры, а также характерные для некоторых сплавов структурные составляющие, например, графит в сером чугуне.

Неметаллические включения в стали и чугуне, вследствие их большой хрупкости, могут частично или полностью выкрошиться при шлифовании и полировании. Кроме того, неметаллические включения обладают меньшей отражающей способностью, чем металлы. В связи с этим участки оксидов, сульфидов и силикатов кажутся в поле зрения микроскопа темными.

Количество и характер распределения неметаллических включений определяются сравнением вида наблюдаемой поверхности микрошлифа (обычно при увеличении в 100 раз) со специально разработанными шкалами.

Природа включений при микроанализе может быть установлена специальным травлением, вызывающим растворение или окрашивание включений либо наблюдением шлифа в поляризованном или ультрафиолетовом свете.

Микропоры, представляющие собой углубления в микрошлифе, также обнаруживаются в виде темных участков. Чтобы отличить микропоры от включений, шлиф слегка выводят из фокуса, поворачивая микрометрический винт микроскопа, и снова наводят на фокус; при этом края микропор, в отличие от неметаллических включений, то сходятся, то расходятся.

После просмотра шлиф подвергают травлению. Зерна чистых металлов или твердых растворов имеют неодинаковую кристаллографическую ориентировку. Поэтому на приготовленную плоскость микрошлифа приходятся зерна, срезанные по разным кристаллографическим направлениям и имеющие в этих направлениях неодинаковые свойства. Если микрошлиф подвергнуть действию химически активной среды (растворов кислот, солей, щелочей и др.), то степень травления отдельных зерен окажется различной. Световой поток, направленный через объектив на микрошлиф, отражается различно от разных зерен. На участках стыков зерен возникает значительное рассеяние, и отраженные лучи не попадают в поле зрения. Поэтому по границам зерен возникают темные линии, которые воспроизводят картину действительных стыков между зернами. Этот эффект в значительной степени усиливается также и потому, что по границам зерен концентрируются многие примеси, имеющиеся в металле или сплаве. Протравливаемость по границам зерен вследствие образования гальванических пар увеличивается, и темные линии, указывающие на границы зерен, проявляются весьма отчетливо.

В сплаве, имеющем две или несколько фаз, эти фазы могут различаться по величине электрохимического потенциала; поэтому зерна таких фаз по-разному ведут себя при травлении. Вследствие наличия некоторого количества косых световых лучей выступающие фазы отбрасывают тень на более сильно протравленные и расположенные ниже фазы, в результате чего образуются теневые картины. Этот эффект усиливается из-за рассеяния лучей, отраженных более глубоко расположенными и более сильно протравленными фазами.

Микрошлиф погружают полированной поверхностью в реактив и через некоторое время (продолжительность травления зависит от состава изучаемого сплава и состава раствора и легко устанавливается экспериментально) вынимают. Если полированная поверхность шлифа становится при этом слегка матовой, травление считают законченным. Шлиф промывают водой, после чего высушивают спиртом, аккуратно прикладывая к нему лист фильтровальной бумаги. В случае быстрого окисления шлиф немедленно промывают спиртом.

Если же за время выдержки поверхность шлифа сохраняет блестящий вид или структура сплава не выявляется отчетливо, микрошлиф вновь погружают и выдерживают в реактиве.

Гораздо реже применяют (в частности, для сталей) нагрев шлифов в печи до сравнительно невысоких температур. В этом случае отдельные фазы сплава

получают неодинаковое окрашивание, поскольку они обладают разной способностью к окислению.

Ферромагнитные и парамагнитные фазы стали выявляют также и магнитным способом. Если на шлиф нанести коллоидный раствор крокуса и поместить его в магнитное поле небольшого постоянного магнита или соленоида, то к участкам ферромагнитной фазы притянутся коллоидные частицы соединений железа, и эти участки будут казаться темными, а парамагнитные участки – светлыми.

1.2. Средства контроля качества продукции

Электронная микроскопия. Электронный микроскоп (ЭМ) – прибор, позволяющий получать изображение объектов с максимальным увеличением до 10^6 раз благодаря использованию пучка электронов с энергиями $30\div 200$ кЭв и более (вместо светового потока). Разрешающая способность электронного микроскопа в $1000\div 10000$ раз превосходит разрешение светового микроскопа и для лучших современных приборов может составлять несколько ангстрем. Для получения изображения в электронном микроскопе используются специальные магнитные линзы, управляющие движением электронов в колонне прибора при помощи магнитного поля.

Виды электронных микроскопов: просвечивающий электронный микроскоп; растровый электронный микроскоп; растровый просвечивающий электронный микроскоп; растровый туннельный микроскоп.

Сферы применения электронных микроскопов: полупроводники и хранение данных; биология и биологические науки; научные исследования; промышленность.

Просвечивающий электронный микроскоп. Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) – это установка, в которой изображение от ультратонкого объекта (толщиной порядка $0,1$ мкм) формируется в результате взаимодействия пучка электронов с веществом образца с последующим увеличением магнитными линзами (объектив) и регистрацией на флуоресцентном экране. Для регистрации изображения возможно использование сенсоров. На рисунке 1.2 представлена принципиальная схема ПЭМ.



Рис. 1.2. Принципиальная схема ПЭМ

Принцип работы ПЭМ. Электроны эмитируются в электронном микроскопе посредством термоэлектронной эмиссии из нити накаливания (вольфрамовая проволока или монокристалл гексаборида лантана) либо посредством полевой эмиссии. Затем электроны ускоряются высокой разностью потенциалов и фокусируются на образце электромагнитными (реже – электростатическими) линзами. Прошедший через образец луч содержит информацию об электронной плотности, фазе и периодичности. Эта информация используется при формировании изображения.

Компоненты ПЭМ.

- вакуумная система;
- источник электронов (электронный прожектор, электронная пушка) для генерирования электронного потока;
- источник высокого напряжения для ускорения электронов;
- набор электромагнитных линз и электростатических пластин для управления и контроля электронного луча;
- экран, на который проецируется увеличенное электронное изображение.

Растровый электронный микроскоп. Растровый электронный микроскоп (РЭМ) – прибор, основанный на взаимодействии электронного пучка с веществом и предназначенный для получения изображения

поверхности объекта с высоким пространственным разрешением (несколько нанометров), а также информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв.

Принцип работы РЭМ заключается в сканировании поверхности образца сфокусированным электронным пучком и анализе отраженных от поверхности частиц и возникающего в результате взаимодействия электронов с веществом рентгеновского излучения. Анализ частиц позволяет получать информацию о рельефе поверхности, о фазовом различии и кристаллической структуре приповерхностных слоёв. Анализ рентгеновского излучения, возникающего в процессе взаимодействия пучка электронов с образцом, дает возможность качественно и количественно охарактеризовать химический состав приповерхностных слоёв. На рисунке 1.3 представлена схема, иллюстрирующая работу РЭМ.

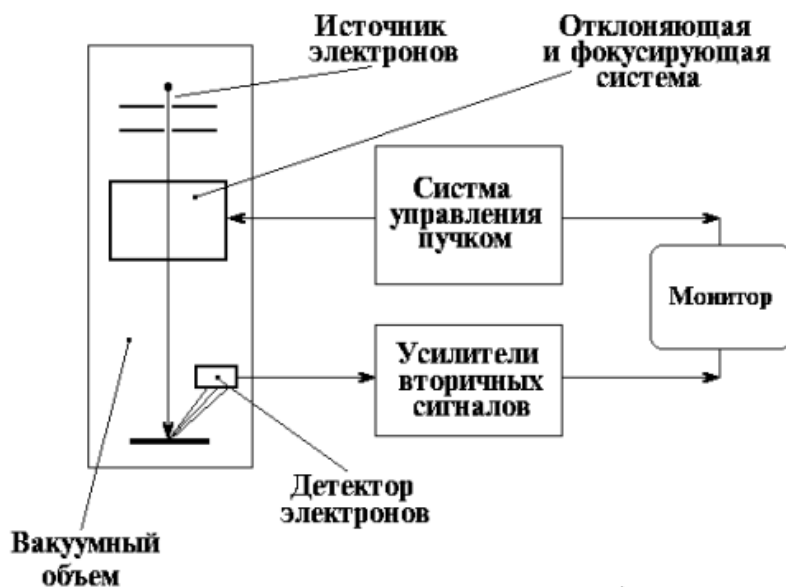


Рис. 1.3. Упрощенная схема, иллюстрирующая работу РЭМ

Современный РЭМ позволяет работать в широком диапазоне увеличений от 10 крат до 1 000 000, что приблизительно в 500 раз превышает предел увеличения лучших оптических микроскопов.

Возможности растровой электронной микроскопии используются практически во всех областях науки и промышленности от биологии до наук о материалах. Существует большое число выпускаемых десятками фирм разнообразных конструкций и типов РЭМ, оснащенных детекторами различных типов.

Основные типы сигналов, которые генерируются в процессе работы РЭМ:

- детектора вторичных электронов (ВЭ или режим рельефа);
- отражённых электронов (ОЭ или режим фазового контраста);
- прошедших через образец электронов в случае установленной STEM-приставки (используется для исследования органических объектов);
- дифракции отражённых электронов (ДОЭ);
- потери тока на образце (детектор поглощенных электронов);
- тока, прошедшего через образец (детектор прошедших электронов);
- характеристического рентгеновского излучения (РСМА или рентгеноспектральный микроанализ);
- волновых дисперсий.

Установление возможных типов всех детекторов на одном приборе встречается крайне редко.

Детекторы вторичных электронов (ВЭ) – первый и традиционно устанавливаемый на все РЭМ тип детекторов. В этом режиме разрешающая способность РЭМ максимальна. Разрешение детекторов вторичных электронов в современных приборах достаточно для наблюдения субнанометровых объектов. Из-за очень узкого электронного луча РЭМ обладают очень большой глубиной резкости (0,6 – 0,8 мм), что на два порядка выше, чем у оптического микроскопа и позволяет получать четкие микрофотографии с характерным трехмерным эффектом для объектов со сложным рельефом. Это свойство РЭМ крайне полезно для понимания поверхностной структуры образца.

Отражённые электроны (ОЭ) – это электроны пучка, отражённые от образца упругим рассеиванием. ОЭ часто используются в аналитическом РЭМ совместно с анализом характеристических спектров рентгеновского излучения. Поскольку интенсивность сигнала ОЭ напрямую связана со средним атомным номером (Z) засвечиваемой области образца, изображения, получаемые с помощью ОЭ, несут в себе информацию о распределении различных элементов в образце. Например, режим ОЭ позволяет обнаружить коллоидные золотые иммунные метки диаметра 5 – 10 нм, которые не всегда удастся обнаружить в биологических объектах в режиме ВЭ.

Характеристическое рентгеновское излучение генерируется в случае, когда электронный луч выбивает электроны с внутренних оболочек элементов образца, заставляя электрон с более высокого энергетического уровня перейти

на более низкий уровень энергии с одновременным испусканием кванта рентгеновского излучения. Детектирование спектра характеристического рентгеновского излучения позволяет идентифицировать состав и измерить количество элементов в образце.

Принципиальная схема РЭМ. Тонкий электронный зонд (электронный пучок) направляется на анализируемый образец. В результате взаимодействия между электронным зондом и образцом возникают низкоэнергетичные вторичные электроны, которые отбираются детектором вторичных электронов. Каждый акт столкновения сопровождается появлением электрического сигнала на выходе детектора. Интенсивность электрического сигнала зависит как от природы образца (в меньшей степени), так и от топографии (в большей степени) образца в области взаимодействия. Таким образом, сканируя электронным пучком поверхность объекта, можно получить карту рельефа проанализированной зоны.

Тонкий электронный зонд генерируется электронной пушкой, которая играет роль источника электронов, сокращенного электронными линзами. Последние выполняют такую же роль по отношению к электронному пучку как фотонные линзы в оптическом микроскопе по отношению к световому потоку. Катушки, расположенные согласно в двух взаимоперпендикулярных направлениях (x , y), перпендикулярны направлению пучка (z) и контролируемые синхронизированными токами, позволяют подвергнуть зонд сканированию подобно сканированию электронного пучка в электронно-лучевой трубке телевизора. Электронные линзы (обычно сферические магнитные) и отклоняющие катушки образуют систему, называемую электронной колонной.

В современных РЭМ изображение регистрируется в цифровой форме.

Основа сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) – электронная пушка и электронная колонна. Функция последней состоит в формировании остросфокусированного электронного зонда энергией 10 – 50 кэВ на поверхности образца. Прибор обязательно должен быть оснащен вакуумной системой, причем в современных моделях микроскопов высокий вакуум желателен, но не обязателен. В каждом РЭМ есть предметный столик, позволяющий перемещать образец минимум в трех направлениях. На рисунке 1.4 представлен принцип действия сканирующего туннельного микроскопа.

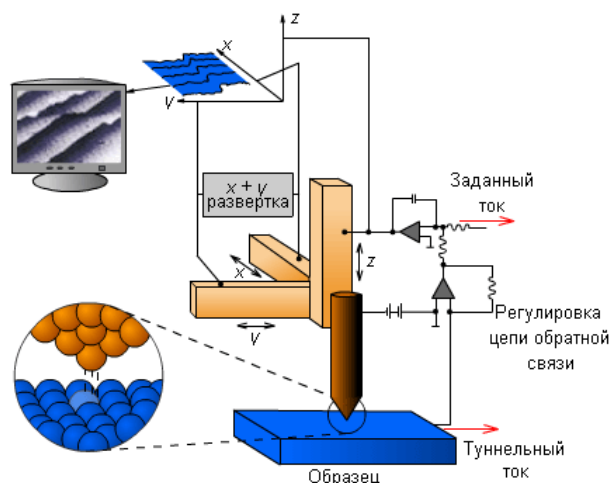


Рис. 1.4. Принцип действия сканирующего туннельного микроскопа.

Желтым цветом отмечены пьезоэлементы, управляющие движением иглы по трем осям

При взаимодействии зонда с объектом возникают несколько видов излучений, каждое из которых может быть преобразовано в электрический сигнал. В зависимости от механизма регистрирования сигнала различают несколько режимов работы сканирующего электронного микроскопа: режим вторичных электронов, режим отражённых электронов, режим катодолюминесценции и др. РЭМ оснащаются детекторами позволяющими отобрать и проанализировать излучение возникшее в процессе взаимодействия, и частицы, изменившие энергию в результате взаимодействия электронного зонда с образцом. Разработанные методики позволяют исследовать не только свойства поверхности образцов, но и визуализировать информацию о свойствах подповерхностных структур.

Взаимодействие электронов с веществом. В классическом микроскопе видимый свет реагирует с образцом и отраженные фотоны анализируются детекторами или глазом человека. В электронной микроскопии пучок света заменен на пучок электронов, взаимодействующих с поверхностью образца; отраженные фотоны заменены на целый спектр частиц и излучения – вторичные электроны, обратноотраженные электроны, Оже-электроны, рентгеновское излучение, катодолюминесценция и др. Эти частицы и излучение являются носителями информации различного типа о веществе, из которого создан образец. На рисунке 1.5 представлены виды взаимодействия электронов с веществом.

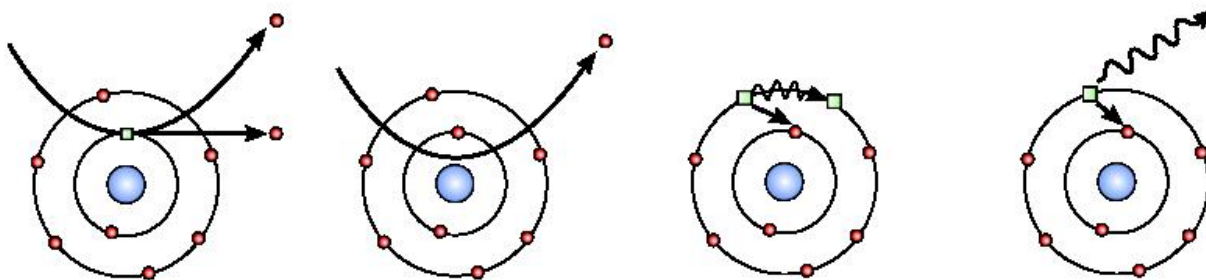


Рис. 1.5. Виды взаимодействия электронов с веществом

Вторичные электроны. В результате взаимодействия с атомами образца электроны первичного пучка могут передать часть своей энергии электронам из зоны проводимости, то есть слабо связанным с атомами. В результате такого взаимодействия может произойти отрыв электронов и ионизация атомов. Такие электроны называются вторичными (рис. 1.6). Эти электроны обычно обладают небольшой энергией (порядка 50 эВ). Любой электрон первичного пучка обладает энергией, достаточной для появления нескольких вторичных электронов.

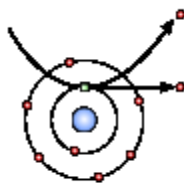


Рис. 1.6. Вторичные электроны

Так как энергия вторичных электронов невелика, их выход возможен только с приповерхностных слоев материала толщиной менее 10 нм. Благодаря небольшой кинетической энергии эти электроны легко отклоняются даже при небольшой разности потенциалов. Это делает возможным существенно повысить эффективность детекторов, например, собрать максимально возможное их количество и получить высококачественные изображения с хорошим отношением сигнал/шум и разрешением порядка 4 нм при диаметре пучка 3 нм.

Принимая во внимание, что вторичные электроны генерируются приповерхностными слоями, они очень чувствительны к состоянию поверхности. Минимальные изменения отражаются на количестве собираемых электронов. Таким образом, этот тип электронов несет в себе информацию о

рельефе образца. Однако, они мало чувствительны по отношению к плотности материала, а, следовательно, и фазового контраста.

Режимы работы. Обычно для получения информации о структуре поверхности используются вторичные и/или отражённые (обратно-рассеянные) электроны. Контраст во вторичных электронах сильнее всего зависит от рельефа поверхности, тогда как отражённые электроны несут информацию о распределении электронной плотности, т.е., например, об областях, обогащённых элементом с большим атомным номером, т.к. они выглядят ярче. Поэтому обратно-рассеянные электроны, которые генерируются одновременно со вторичными, кроме информации о морфологии поверхности содержат также дополнительную информацию и о составе образца. Облучение образца пучком электронов приводит не только к образованию вторичных и отражённых электронов. Оно вызывает также испускание характеристического рентгеновского излучения. Анализ этого излучения позволяет определить элементный состав микрообъёма образца (разрешение в пределах 1 мкм).

Детектирование вторичных электронов. Для определения вторичных электронов используется детектор Эверхарта-Торнли (рис. 1.7), позволяющий селективно идентифицировать электроны с энергией менее 50 эВ.

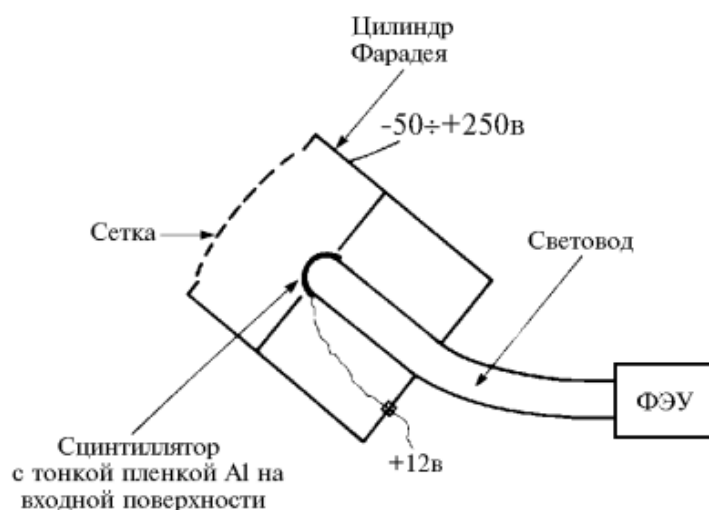


Рис. 1.7. Схема устройства детектора Эверхарта-Торнли

Детектирование отражённых электронов. Некоторые модели микроскопов оснащены высокочувствительным полупроводниковым детектором обратно-рассеянных электронов. Детектор смонтирован на нижней поверхности объективной линзы либо вводится на специальном стержне под

полюсный наконечник. Это позволяет путем выбора режима из меню получить изображения топографии поверхности, изображение в композиционном контрасте или в темном поле.

Разрешение СЭМ. Пространственное разрешение сканирующего электронного микроскопа зависит от поперечного размера электронного пучка, который, в свою очередь зависит от электронно-оптической системы, фокусирующей пучок. Разрешение также ограничено размером области взаимодействия электронного зонда с образцом. Размер электронного зонда и размер области взаимодействия зонда с образцом намного больше расстояния между атомами мишени. Таким образом, разрешение сканирующего электронного микроскопа не достаточно для отображения атомных плоскостей и даже атомов в отличие от современных просвечивающих микроскопов. Тем не менее, растровый электронный микроскоп имеет ряд преимуществ перед просвечивающим микроскопом. Это – визуализация сравнительно большой области образца, исследование массивных объектов (а не только тонких пленок), набор аналитических методов, позволяющих измерять состав и свойства изучаемого объекта.

В зависимости от конкретного прибора и параметров эксперимента может быть получено разрешение от десятков до единиц нанометров. Как правило, наилучшее разрешение может быть получено при использовании вторичных электронов, наихудшее – в характеристическом рентгеновском излучении. Последнее связано с большим размером области возбуждения излучения, в несколько раз превышающим размер электронного зонда. При использовании режима низкого вакуума разрешение несколько ухудшается.

Подготовка образцов. Порошковые материалы наносятся малым количеством, как правило, на проводящий углеродный скотч. Массивные (не порошковые) образцы фиксируются либо на тот же скотч, либо на серебряный или углеродный клей.

Если образцы непроводящие, то на них напыляется тонкий проводящий слой. Это может быть любое проводящее вещество, однако, чаще всего используют углерод и золото. Первый, как правило, имеет малый размер напыляемых частиц, и, как следствие, позволяет получать микрофотографии с большим увеличением без собственной визуализации. Иногда в случае напыления золотом бывают заметны нанесенные частицы. Однако, при напылении золотом получают более светлые изображения по сравнению с

напылением углеродом, что связано с энергией выхода электрона. Если невозможно напыление пленки на образец, то возможно снятие заряда с образца на вводимую в камеру атмосферу (обычно азот). Для получения более четких изображений в современных микроскопах возможно локальное подведение газа.

Применение. Растровые микроскопы применяются как исследовательский инструмент в материаловедении, физике, электронике и биологии. Их главная функция – получение изображения исследуемого образца, которое зависит от регистрируемого сигнала. Сопоставление изображений, полученных в разных сигналах, позволяют делать вывод о морфологии и составе поверхности. Растровый электронный микроскоп – практически единственный прибор, который может дать изображение поверхности современной микросхемы или промежуточной стадии фотолитографического процесса.

Сканирующий туннельный микроскоп. Сканирующий туннельный микроскоп – вариант сканирующего зондового микроскопа, предназначенный для измерения рельефа проводящих поверхностей с высоким пространственным разрешением.

Принцип работы СТМ. Острая металлическая игла подводится к образцу на расстояние нескольких ангстрем. При подаче на иглу относительно образца небольшого потенциала возникает туннельный ток. Величина этого тока экспоненциально зависит от расстояния образец – игла.

В процессе сканирования игла движется вдоль поверхности образца, туннельный ток поддерживается стабильным за счёт действия обратной связи, показания следящей системы меняются в зависимости от топографии поверхности. Такие изменения фиксируются и на их основе строится карта высот. Другая методика предполагает движение иглы на фиксированной высоте над поверхностью образца. В этом случае фиксируется изменение величины туннельного тока и на основе данной информации идет построение топографии поверхности.

Компоненты СТМ:

- зонд (игла);
- система перемещения зонда относительно образца по двум (X-Y) или трем (X-Y-Z) координатам;
- регистрирующая система.

Регистрирующая система фиксирует либо значение функции, зависящей от величины силы тока между иглой и образцом, либо величины перемещения иглы по оси Z. Обычно регистрируемое значение обрабатывается системой отрицательной обратной связи, которая управляет положением образца или зонда по одной из координат (Z). В качестве системы обратной связи чаще всего используется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.

Ограничения на использование метода накладываются, во-первых, условием проводимости образца – поверхностное сопротивление должно быть не больше 20 МОм/см², во-вторых, условием – «глубина канавки должна быть меньше её ширины», потому что в противном случае может наблюдаться туннелирование с боковых поверхностей. Это основные ограничения, но в целом их намного больше. Например, технология заточки иглы не может гарантировать одного острия на конце иглы, а это может приводить к параллельному сканированию двух разновысотных участков. Кроме ситуации глубокого вакуума, во всех остальных случаях мы имеем на поверхности осаждённые из воздуха частицы, газы и т. д. Технология грубого сближения также оказывает колоссальное влияние на полученные результаты. Если при подводе иглы к образцу не удалось избежать удара иглы о поверхность, то считать иглу состоящей из одного атома на кончике пирамиды будет большим преувеличением.

Дифракция отражённых электронов. Дифракция отражённых электронов (ДОЭ) – микроструктурная кристаллографическая методика, используемая для исследования кристаллографических ориентаций многих материалов, которая может использоваться для исследования текстуры или преимущественных ориентаций моно- или поликристаллического материала. ДОЭ может использоваться для индексирования и определения семи кристаллических систем. ДОЭ также применяется для картирования кристаллических ориентаций, исследования дефектов, определения и разделения фаз, изучение межзёренных границ и морфологии, картирования микродеформаций и т. д. Традиционно такой тип исследований проводился с помощью рентгеноструктурного анализа, нейтронной дифракции и дифракции электронов в ПЭМ.

ДОЭ основана на дифракции отражённых электронов. Проводится в растровом электронном микроскопе с ДОЭ-приставкой. Последняя состоит из

люминесцентного экрана, вводящегося в камеру с образцом РЭМ, CCD-камеры. Вертикальный пучок электронов падает на наклонённый образец. Оптимальный угол наклона к горизонтали 70 градусов. Уменьшение угла наклона понижает интенсивность получаемой дифракционной картины. На рисунке 1.8 представлена картина, полученная методом дифракции отражённых электронов.

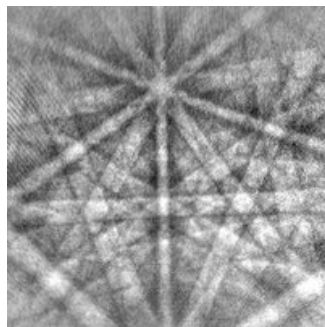


Рис. 1.8. Картина, полученная методом дифракции отражённых электронов (National Institute of Standards and Technology Materials Reliability Division)

Применение. ДОЭ позволяет проводить точечный анализ, картирование кристаллических ориентаций. С его помощью возможно построение трёхмерных карт вещества.

Рентгеноспектральный анализ. Рентгеноспектральный анализ – инструментальный метод элементного анализа, основанный на изучении спектра рентгеновских лучей, прошедших сквозь образец или испущенных им (рентгенофлуоресцентный анализ).

В основном, применяется *рентгенофлуоресцентный анализ*. Он основан на том, что при возбуждении у атома удаляются электроны из внутренних оболочек. Электроны из внешних оболочек перескакивают на вакантные места, высвобождая избыточную энергию в виде кванта рентгеновского диапазона или передавая ее другому электрону из внешних оболочек (оже-электрон). По энергиям и количеству испущенных квантов судят о количественном и качественном составе анализируемого вещества.

В качестве источников возбуждения применяют рентгеновское излучение (первичное излучение) или электронный удар.

Для анализа спектра вторичного излучения применяют либо дифракцию рентгеновских лучей на кристалле (волновая дисперсия), либо используют

детекторы, чувствительные к энергии поглощенного кванта (энергетическая дисперсия).

Приборы для проведения рентгеноспектрального микроанализа бывают самостоятельными либо сопутствующими в виде приставок к другим приборам.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) в электронной микроскопии. Большинство электронных микроскопов, в частности растровых электронных микроскопов, имеют волнодисперсионные и/или энергодисперсионные приставки. Для генерации характеристического рентгеновского излучения используется электронный пучок микроскопа. При этом, для генерации достаточного сигнала необходимо большое количество высокоэнергетических электронов, поэтому локальность элементного анализа (~ 1 мкм) значительно меньше, чем разрешение микроскопа, но, с другой стороны, гораздо выше локальности самостоятельных рентгеноспектральных приборов, где площадь генерации на порядки больше.

Волнодисперсионный микроанализатор отличается высокой точностью, однако, крайне не экспрессен. Энергодисперсионный микроанализатор гораздо более экспрессен. Так рутинный эксперимент составляет лишь несколько минут. Современные энергодисперсионные микроанализаторы не требуют азотного охлаждения, что упрощает их эксплуатацию.

2. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Дефектоскоп (от латинского «дефект» – «недостаток» и греческого «скопео» – «смотрю») – устройство, позволяющее обнаружить дефекты в изделиях из различных металлических и неметаллических материалов без их разрушения. Нет ли в изделии каких-нибудь трещин, раковин в глубине или других дефектов, которые могут привести к аварии, – все это выяснит дефектоскоп. А ведь даже незначительная трещина, не видимая невооруженным глазом, может привести к разрушению изделия.

Самые простые и доступные методы дефектоскопии – метод неразрушающего контроля материалов и изделий с целью обнаружить скрытые дефекты и визуальный контроль невооруженным глазом или с помощью оптических приборов (от греческого «оптос» – «видимый», «зримый»). Минимальный размер дефекта, обнаруживаемого невооруженным глазом,

равен 0,1 – 0,2 мм, а с оптической системой – несколькими микрометрами. Но в непрозрачных предметах удастся обнаружить только поверхностные дефекты. Чтобы увидеть дефект в глубине материала, применяют различного рода проникающие излучения: рентгеновские и гамма-лучи, нейтроны.

Рентгенодефектоскопия эффективна при толщине материала до 25 см. При большей толщине обычно используют гамма-излучение, испускаемое радиоактивными изотопами. Для выявления поверхностных дефектов применяют также радиоволны сантиметрового и миллиметрового диапазона, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи.

Широкое распространение получила ультразвуковая дефектоскопия. Наиболее известен эхо-метод, в какой-то мере аналогичный обнаружению объектов с помощью радиолокатора. Применяется также теневой метод, основанный на том же принципе, что и рентгенодефектоскопия. В капиллярной дефектоскопии искусственно повышается световой или цветовой контраст между дефектным и неповрежденным участком. Для этого на поверхность изделия наносят люминесцирующее вещество, которое засасывается капиллярами в трещины и другие повреждения поверхности и делает их легко обнаруживаемыми. Этот метод называют люминесцентной, а иногда и цветной дефектоскопией. С его помощью выявляют дефекты размерами до 0,02 мм. Существуют и другие, менее распространенные, методы дефектоскопии. К сожалению, ни один из методов не является универсальным. Каждый вид дефектоскопии имеет свою область применения.

Дефектоскопия на производстве не только помогает обнаружить ненадежные и недолговечные изделия, но и приносит большой экономический эффект, так как избавляет от ненужной обработки деталей со скрытыми дефектами.

Наиболее распространены ультразвуковая, рентгено- и гамма-дефектоскопия, люминесцентная, капиллярная, магнитная, радиационная термо- и трибоэлектрическая дефектоскопия.

Ультразвуковая дефектоскопия. Суть ультразвукового (УЗ) метода заключается в излучении в изделие и последующем принятии отраженных ультразвуковых колебаний с помощью специального оборудования – ультразвукового дефектоскопа и пьезоэлектротрансформатора и дальнейшем анализе полученных данных с целью определения наличия дефектов, а также их эквивалентного размера, формы (объемный/плоскостной), вида

(точечный/протяженный), глубины залегания и пр. Например, по времени распространения ультразвука в изделии (если известна скорость ультразвука, скорость распространения ультразвуковых волн в различных материалах) определяют расстояние до дефекта, а по амплитуде отраженного импульса – его относительный размер.

Имеется достаточно широкий ассортимент средств для проведения ультразвукового контроля (УЗК) в зависимости от марки материала, его толщины, геометрических особенностей поверхностей контроля, минимально выявляемых размеров дефектов и др.

Существует пять основных методов УЗК: теневой, зеркально-теневой, зеркальный, дельта-метод и эхо-метод. В промышленности ультразвуковой контроль металла проводят, как правило, в диапазоне ультразвуковых волн от 0,5 МГц до 10 МГц. В отдельных случаях неразрушающий контроль сварных швов проводится ультразвуковыми волнами с частотой до 20 МГц, что позволяет выявлять очень небольшие дефекты. Ультразвук низких частот применяют при работе с объектами большой толщины (ультразвуковой контроль отливок, поковок, сварных соединений выполненных электрошлаковой сваркой); при контроле металлов, имеющих крупнозернистую структуру (чугун, медь, аустенитные стали) и большое затухание – «плохо проводят ультразвук».

К главным преимуществам ультразвукового контроля качества металлов и сварных соединений относятся:

- высокая точность и скорость исследования, его низкая стоимость;
- безопасность для человека (в отличие, например, от рентгеновской дефектоскопии);
- высокая мобильность вследствие применения портативных ультразвуковых дефектоскопов;
- возможность проведения ультразвукового контроля на действующем объекте, т.е. на время проведения УЗК не требуется выведения контролируемой детали/объекта из эксплуатации.
- при проведении УЗК исследуемый объект не повреждается.

Основные недостатки УЗК заключаются в следующем.

При ультразвуковой дефектоскопии невозможно дать ответ на вопрос о реальных размерах дефекта, т.к. размер дефекта определяется его отражательной способностью и поэтому по результатам контроля дается

эквивалентный размер дефекта. Так, например, если имеется в изделии два реальные дефекта одного размера и формы, расположенные на одной глубине, но один из которых заполнен воздухом, а другой шлаком, то они будут давать отраженные импульсы различной амплитуды и, соответственно будут оценены как дефекты, имеющие различные размеры. Некоторые дефекты в силу их характера, формы или расположения в объекте контроля практически невозможно выявить ультразвуковым методом. Затруднителен контроль деталей небольшой размера и толщины, а также деталей, имеющих сложную форму с криволинейными и сферическими поверхностями малого радиуса. Кроме того, при проведении ультразвукового контроля, в отличие от радиографического, как правило, невозможно однозначно охарактеризовать дефект – шлаковое ли это включение, пора, вольфрамовое включение либо др.

При ультразвуковом контроле металлов с крупнозернистой структурой возникают трудности, из-за большого рассеяния и сильного затухания ультразвука.

Необходима подготовка поверхности контроля к УЗК для ввода ультразвуковых волн в металл, а именно очистка поверхности контроля от загрязнений, отслаивающейся окалины, ржавчины, брызг расплавленного металла и др. и создание необходимой шероховатости поверхности не хуже Rz 40 и волнистости не более 0,015, т.к. даже небольшой воздушный зазор между пьезоэлектротрансформатором (ПЭП) для проведения ультразвукового контроля и изделием может стать непреодолимой преградой для распространения ультразвуковых волн.

Необходимо нанесение на контролируемый участок изделия после его зачистки непосредственно перед выполнением контроля таких контактных жидкостей, как специальные гели, глицерин, машинное масло, и др. – для обеспечения стабильного акустического контакта.

Рентгеновская дефектоскопия. Данный метод дефектоскопии основан на различном поглощении рентгеновского излучения при распространении его на одинаковое расстояние в различных средах. Для просвечивания изделий из стали толщиной до 80 мм и лёгких сплавов до 250 мм в качестве источника лучей применяют рентгеновские трубки, а для просвечивания стальных изделий толщиной до 500 мм применяют бетатроны. Регистрация интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего через изделие, производится фотографическим, визуальным, ксерографическим или

ионизационными методами. Рентгенодефектоскопия позволяет обнаружить раковины, трещины и другие дефекты преимущественно в литых изделиях и в сварных соединениях.

Гамма-дефектоскопия. γ – лучи относятся к ультракоротковолновому диапазону электромагнитного излучения, следующему за рентгеновским диапазоном. В области перекрытия этих диапазонов нет принципиальной разницы между этими двумя видами излучения, хотя природа и способы генерации их существенно различны: рентгеновские лучи генерируются за счет торможения электронов на аноде рентгеновской трубки (тормозное излучение) или возбуждения нижних энергетических уровней электронов в атомах вещества (характеристическое излучение), а γ -лучи генерируются за счет ядерного распада естественных или искусственных радиоактивных изотопов.

Гамма-дефектоскопия применяется для обнаружения внутренних дефектов изделий. Для этой цели применяются радиоактивные изотопы, испускающие γ -излучение, которое обладает большой проникающей способностью. При контроле изделия источник γ – излучения располагается с одной стороны, а детектор – с другой. В местах изделия, где есть внутренние дефекты, излучение поглощается слабее, чем в местах, где отсутствуют такие дефекты. Дефект обнаруживается по увеличению потока γ -излучения, попадающего в детектор.

При гамма-дефектоскопии используют энергию излучения от нескольких десятков кэВ до 1 – 2 МэВ для просвечивания деталей большой толщины. Этот метод имеет существенные преимущества перед рентгенодефектоскопией: аппаратура для гамма-дефектоскопии сравнительно проста, источник излучения компактный, что позволяет обследовать труднодоступные участки изделий. Гамма-дефектоскопия является единственным средством контроля в труднодоступных местах и в полевых условиях.

При *гамма-дефектоскопии* в цеховых условиях или на объектах используются переносные контейнеры с радиоактивными изотопами. Контейнеры изготавливаются из свинца различной толщины в зависимости от мощности источника. На место работы контейнеры переносятся либо в специальных тележках, либо с помощью длинных ручек. При просвечивании в контейнере открывается окно; с обратной стороны изделия помещается фотопленка, на которой получается изображение просвечиваемой детали.

Этот метод все время совершенствуется. При работе с источниками рентгеновского и гамма-излучения должна быть обеспечена эффективная биологическая защита.

Радиационный метод неразрушающего контроля. При радиационном контроле используют три основных элемента:

- источники ионизирующего излучения;
- контролируемый объект;
- детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется - поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины, плотности и атомного номера материала контролируемого объекта, а также от интенсивности и энергии излучения. При наличии в веществе дефектов изменяются интенсивность и энергия пучка излучения.

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации и соответственно делятся на: *радиографические; радиоскопические; радиометрические.*

Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документным подтверждением получаемых результатов.

В зависимости от используемых детекторов различают *плёночную радиографию* и *ксерорадиографию (электрорадиографию).*

В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором – полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

Радиационная интроскопия – метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, «экспрессность» и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия – метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов различной величины, длительности или количества.

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи результатов контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применяемой аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

Капиллярный метод неразрушающего контроля. Капиллярный метод неразрушающего контроля основан на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторной жидкости, хорошо смачивающей материал объекта контроля (ОК) с последующей регистрацией индикаторных следов.

Данный метод пригоден для выявления несплошностей с поперечными размерами от 0,1 до 500 мкм, в том числе сквозных, на поверхности черных и цветных металлов, сплавов, керамики, стекла и т.п. Широко применяется для контроля целостности сварного шва.

Красящий пенетрант наносится на поверхность ОК. Благодаря подбору определенных физических свойств пенетранта – поверхностного натяжения, вязкости, плотности, он, под действием капиллярных сил проникает в мельчайшие дефекты, имеющие выход на поверхность ОК. На поверхность ОК наносится проявитель. Через некоторое время после осторожного удаления пенетранта с поверхности ОК проявитель растворяет находящийся внутри дефекта краситель и за счет диффузии «вытягивает» оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность ОК. Имеющиеся дефекты видны достаточно контрастно. Индикаторные следы в виде линий указывают на трещины или царапины, а отдельные точки – на поры.

Процесс обнаружения дефектов капиллярным методом включает пять стадий.

1 стадия – предварительная очистка поверхности. Чтобы краситель мог проникнуть в дефекты на поверхности, ее предварительно следует очистить водой или органическим очистителем. Все загрязняющие вещества (масла, ржавчина, и т.п.) и любые покрытия должны быть удалены с контролируемого участка. После этого поверхность высушивается, чтобы внутри дефекта не оставалось воды или очистителя.

2 стадия – нанесение пенетранта. Пенетрант, обычно красного цвета, наносится на поверхность путем распыления, кистью или погружением ОК в ванну на время 5 – 30 мин. для хорошей пропитки и полного покрытия пенетрантом при температуре 5 – 50 ° С.

3 стадия – удаление излишков пенетранта. Избыток пенетранта удаляется протиркой салфеткой, промыванием водой или тем же очистителем, что и при предварительной очистке. При этом пенетрант должен быть удален с поверхности ОК, но никак не из полости имеющихся дефектов. Поверхность ОК далее высушивается салфеткой без ворса или струей воздуха. При использовании очистителя есть риск вымывания пенетранта и неправильной его индикации.

4 стадия – нанесение проявителя. Сразу же после просушки на поверхность ОК наносится проявитель (обычно белого цвета) тонким слоем. После нанесения проявителя следует выждать время от 5 мин – при крупных дефектах, до 1 часа – при мелких дефектах.

5 стадия – контроль. Инспектирование ОК начинается непосредственно после окончания процесса проявки и заканчивается не более чем через 30 мин. (согласно разным стандартам). Дефекты проявляются как красные следы на белом фоне. Интенсивность окраски говорит о глубине дефекта: чем дефект мельче, тем бледнее окраска. Интенсивную окраску имеют глубокие трещины. После проведения контроля проявитель удаляется водой или очистителем.

Наиболее удобны распылители, например, аэрозольные баллоны. Можно наносить проявитель и окунанием. Сухие проявители наносятся в вихревой камере, либо электростатически.

Сквозные трещины на тонкостенных изделиях можно обнаруживать, нанося проявитель и пенетрант с разных сторон изделия. Прошедший насквозь краситель будет хорошо виден в слое проявителя.

Класс чувствительности контроля определяется в зависимости от размера выявляемых дефектов. В качестве параметра размера дефекта принимается поперечный размер дефекта на поверхности объекта контроля – так называемая ширина раскрытия дефекта. Нижний порог чувствительности, т.е. минимальная величина раскрытия выявленных дефектов ограничивается весьма малым количеством пенетранта – задержавшимся в полости небольшого дефекта, которое оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Верхний порог чувствительности определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пенетрант вымывается при устранении излишков пенетранта на поверхности

По нижнему порогу установлено 5 классов чувствительности в зависимости от размеров дефектов. За рубежом установлены другие шкалы чувствительности пенетрантов. Например, в немецком промышленном стандарте DIN 54 152, различают 4 класса чувствительности, но шкала обратна отечественной.

Чувствительность дефектоскопических материалов определяется на контрольных образцах, т.е. на пластинах определенной шероховатости с заранее нанесенными на них нормированными трещинами. Это, как правило, стальные, алюминиевые или титановые пластины. С помощью контрольных образцов можно судить о степени ухудшения свойств препаратов с течением времени; о правильности применяемых методик и т.п.

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля. Магнитопорошковый метод – один из самых распространённых, надёжных и производительных методов неразрушающего контроля поверхностей изделий из ферромагнитных материалов как при их производстве, так и при эксплуатации.

Магнитопорошковый контроль (МПК) – один из четырех классических методов, а также один из наиболее старых методов неразрушающего контроля, связанных с применением приборов и дефектоскопических материалов. Уже первые опыты их применения описали феномен полей магнитного рассеяния. Позднее были предприняты попытки ввести в техническую практику это явление. В 1868 году англичанин Саксби применил компас для определения дефектов в пушечных стволах. В 1917 году американец Хок применил железные опилки для обнаружения трещин в стальных деталях.

Суть метода такова: магнитный поток в бездефектной части изделия не меняет своего направления. Если же на пути потока встречаются участки с пониженной магнитной проницаемостью, например, дефекты в виде разрыва сплошности металла (трещины, неметаллические включения и т.д.), то часть силовых линий магнитного поля выходит из детали наружу и входит в нее обратно, при этом возникают местные магнитные полюсы (N и S) и, как следствие, магнитное поле над дефектом. Так как магнитное поле над дефектом неоднородно, то на магнитные частицы, попавшие в это поле, действует сила, стремящаяся затянуть частицы в место наибольшей концентрации магнитных силовых линий, то есть к дефекту. Частицы в области поля дефекта намагничиваются и притягиваются друг к другу как магнитные диполи под действием силы так, что образуют цепочные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям поля.

Метод магнитопорошкового контроля предназначен для выявления тонких поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности металла, т.е. дефектов, распространяющихся вглубь изделий. Такими дефектами могут быть трещины, волосовины надрывы, флокены, непровары, поры. Наибольшая вероятность выявления дефектов достигается в случае, когда плоскость дефекта составляет угол 90° с направлением намагничивающего поля (магнитного потока). С уменьшением этого угла чувствительность снижается и при углах, существенно меньших углах, чем 90° , дефекты могут быть не обнаружены.

Чувствительность МПК определяется:

- магнитными характеристиками материала контролируемого изделия (магнитной индукцией, B);
- остаточной намагниченностью (B_r);
- максимальной магнитной проницаемостью (μ_{\max});
- коэрцитивной силой (H_0),
- шероховатостью контролируемой поверхности;
- напряженностью намагничивающего поля, его ориентацией по отношению к плоскости дефекта;
- качеством дефектоскопических средств и освещенностью контролируемой поверхности.

Магнитопорошковый метод находит применение практически во всех отраслях промышленности, как металлургия, машиностроение (энергетическое

и химическое), судостроение, авиапромышленность, автомобильная промышленность, строительство (стальные конструкции, трубопроводы),

Магнитопорошковый метод является самостоятельным технологическим процессом и включает в себя:

- подготовку поверхностей изделий к контролю;
- намагничивание деталей;
- обработку поверхности детали суспензией (порошком);
- осмотр деталей;
- размагничивание;
- контроль качества процесса.

Визуально-оптический метод неразрушающего контроля. Принцип действия и основной результат – осмотр с помощью оптических средств поверхностей объекта контроля на наличие дефектов и аномалий; осуществляется независимо и в сочетании с другими методами контроля.

Физические основы метода. Зондирующая среда и/или источник энергии – видимая область спектра (длинноволновая ультрафиолетовая область спектра с флуоресцирующими материалами).

Характер сигнала и/или информационные характеристики – отраженное, прошедшее, рассеянное и индуцированное излучение.

Способ детектирования и/или восприятия – оптические средства, увеличительные стекла, бороскопы, видео- и пленочные фотокамеры.

Способ индикации и/или регистрации – визуальное изображение.

Метод расшифровки – анализ изображения; используется в сочетании с другими методами для непосредственной расшифровки, как капиллярный, метод фильтрующихся частиц, магнитопорошковый.

Цели использования. Выявление дефектов типа нарушений сплошности – трещин, раковин, пор и включений.

Измерение размеров и метрология – измерения механическими средствами.

Определение компонентного и химического состава.

Определение динамических характеристик – видимые реакции напряженности слоя.

Области использования. Контролируемые материалы – неограниченный спектр материалов.

Объекты контроля и технологические операции – поверхности, слои, пленки, покрытия, целые объекты, контроль и регулирование в производственном процессе и вне его.

Диагностика – все виды технологических операций и испытаний.

Примеры – механически обработанные детали, внутренние поверхности, объекты контроля, отдельные элементы изделий, узлы и системы.

Ограничения. По технологичности – обычно требуются специальные оптические средства для визуального доступа.

По расшифровке – требуется дополнительное применение других методов для различения, выявления и измерения дефектов.

По чувствительности и / или разрешению – различные кратности увеличения.

Родственные методы контроля – бороскопия, рефрактометрия, дифрактометрия, интерферометрия, рефлектометрия, микроскопия, телескопия, радиометрия в видимой области спектра, фазово-контрастный и шпирен-методы.

Вихретоковый метод неразрушающего контроля. Вихретоковый контроль позволяет обнаруживать как поверхностные, так и подповерхностные (залегające на глубине 1–4 мм) дефекты. Его применяют только для контроля объектов из электропроводящих материалов. Контроль вихревыми токами можно выполнять без непосредственного механического контакта преобразователей с объектом, что позволяет производить контроль при взаимном перемещении преобразователя и объекта с большой скоростью.

Объектами контроля являются основной металл, сварные соединения конструкций, а также отдельные детали. Вихретоковым контролем могут быть выявлены: ковочные, штамповочные, шлифовочные трещины, надрывы в элементах конструкций и деталях; волосовины, неметаллические включения, поры в поковках и прокате; трещины, возникшие в элементах конструкций и деталях при эксплуатации машин.

Вихретоковым методом не могут быть проконтролированы элементы конструкций и детали с резкими изменениями магнитных или электрических свойств, с дефектами, плоскости раскрытия которых параллельны контролируемой поверхности или составляют с ней угол менее 10° , сварные швы без снятого усиления. При вихретоковом контроле не обнаруживаются дефекты в элементах конструкций и деталях с поверхностями, на которые

нанесены электропроводящие защитные покрытия, если дефект не выходит на поверхность покрытия; с поверхностями, покрытыми продуктами коррозии.

Выявляемость дефекта при прочих равных условиях зависит от его типа. Наилучшим образом выявляются дефекты типа усталостных трещин, ориентированные перпендикулярно контролируемой поверхности. Ширина раскрытия усталостных трещин в определенных пределах (20–30 мкм) не влияет на их выявляемость, однако, выявляемость очень плотных трещин резко уменьшается. Такое явление, например, характерно для закалочных трещин. Риски и надрезы, по сравнению с усталостными трещинами, как правило, выявляются хуже. Заполнение полости дефекта грязью, нагаром, неэлектропроводящими окислами и т. п. не приводит к снижению их выявляемости.

Вихретоковый контроль наиболее эффективен при контроле немагнитных материалов. Возможность контроля ферромагнитных материалов и деталей из них определяется однородностью магнитных свойств, наличием локальных магнитных полюсов. Наличие локального изменения магнитных свойств материала детали может вызвать ложное срабатывание вихретокового дефектоскопа. Наличие на контролируемой поверхности зон структурной неоднородности, приводящих к изменению электропроводности, вызывает расстройство дефектоскопа. Увеличение электропроводности снижает чувствительность, уменьшение электропроводности вызывает эффект, аналогичный влиянию дефекта. Наличие на контролируемой поверхности значительных остаточных макронапряжений, возникающих в результате поверхностного упрочнения детали или под действием сжимающих остаточных напряжений, приводит к сжатию полостей трещин и других дефектов и к снижению их выявляемости. Максимальная чувствительность вихретокового вида контроля может быть достигнута при контроле деталей с шероховатостью поверхности не более $R_z\ 20$. Возможность и целесообразность контроля деталей с грубой поверхностью должна определяться в каждом конкретном случае специалистами по вихретоковому контролю.

3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твердость. Испытания твердости производятся чаще, чем определение других механических характеристик металлов – прочности, относительного удлинения и др.

Твёрдостью материала называют способность оказывать сопротивление механическому проникновению другого твёрдого тела в его поверхностный слой. Для определения твёрдости в поверхность материала с определённой силой вдавливается тело (индентор), выполненное в виде стального шарика, алмазного конуса, пирамиды или иглы. По размерам получаемого на поверхности отпечатка судят о твёрдости материала. В зависимости от способа измерения количественно твёрдость материала характеризуют числами твёрдости по Бринеллю (HB), Роквеллу (HRC) или Виккерсу (HV).

Указанные механические характеристики связаны между собой, поэтому количественные значения могут быть найдены расчётным путём с помощью формул на основе данных о твёрдости, полученных для конкретного материала с определённой термообработкой.

Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия. Твердость можно измерять вдавливанием индентора (способ вдавливания), ударом или же по отскоку наконечника – шарика. Твердость, определенная царапанием, характеризует сопротивление разрушению, по отскоку – упругие свойства, вдавливанием – сопротивление пластической деформации. В зависимости от скорости приложения нагрузки на индентор различают твердость статическую (нагрузка прикладывается плавно) и динамическую (нагрузка прикладывается ударом).

Широкое распространение испытаний на твердость объясняется рядом их преимуществ перед другими видами испытаний:

- простота измерений, которые не требуют специального образца и могут быть выполнены непосредственно на проверяемых деталях;
- высокая производительность;

- измерение твердости обычно не влечет за собой разрушения детали, и после измерения ее можно использовать по назначению;
- возможность ориентировочно оценить по твердости другие характеристики металла, в первую очередь, предел прочности.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием в испытываемый металл индентора в виде шарика, конуса и пирамиды (соответственно методы Бринелля, Роквелла и Виккерса). В результате вдавливания индентора достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под ним и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Величина внедрения индентора в поверхность металла тем меньше, чем тверже испытываемый материал.

Лабораторный контроль проводится на образцах, однако разработаны и широко применяются портативные приборы для измерения твердости.

Измерение твердости по Бринеллю. Твердость по методу Бринелля измеряют вдавливанием в испытываемый образец стального шарика определенного диаметра D под действием заданной нагрузки P в течение определенного времени. В результате вдавливания шарика на поверхности образца получается отпечаток (лунка). Число твердости по Бринеллю, обозначаемое $HВ$, представляет собой отношение нагрузки P к площади поверхности сферического отпечатка F и измеряется в $кгс/мм^2$ или МПа.

Для перевода твердости по Бринеллю в единицы СИ необходимо умножить число твердости в $кгс/мм^2$ на 9,81, т.е. $HВ=9,81 \cdot HВ$ (МПа).

Для получения сопоставимых результатов при определении твердости $HВ$ шариками различного диаметра необходимо соблюдать условие подобия. Подобие отпечатков при разных D и P будет обеспечено, если угол остается постоянным.

В практике при определении твердости пользуются таблицами, составленными для установленных диаметров шариков, отпечатков и нагрузок. Применяют шарики диаметром 10,5 и 2,5 мм. Диаметр шарика и нагрузка выбираются в соответствии с толщиной и твердостью образца. При этом для получения одинаковых чисел твердости одного материала при испытании шариками разных диаметров необходимо соблюдать закон подобия между получаемыми диаметрами отпечатков. Поэтому твердость измеряют при постоянном соотношении между величиной нагрузки P и квадратом диаметра

шарика D2. Это соотношение должно быть различным для металлов разной твердости.

Метод Бринелля не рекомендуется применять для материалов с твердостью более 450 НВ, так как стальной шарик может заметно деформироваться, что внесет погрешность в результаты испытаний.

Число твердости по Бринеллю, измеренное при стандартном испытании ($D = 10$ мм, $P = 3000$ кгс), записывается так: НВ 350. Если испытания проведены при других условиях, то запись будет иметь следующий вид, например, НВ 5/250/30-200, что означает – число твердости 200 получено при испытании шариком диаметром 5 мм под нагрузкой 250 кгс и длительности нагрузки 30 с.

Применение метода Бринелля предусматривает следующие условия:

- образцы с твердостью выше НВ 450 кгс/мм² (4500 МПа) испытывать запрещается;
- поверхность образца должна быть плоской и очищенной от окалины и других посторонних веществ;
- диаметры отпечатков должны находиться в пределах $0,2D < d < 0,6D$;
- образцы должны иметь толщину не менее 10-кратной глубины отпечатка (или менее диаметра шарика);
- расстояние между центрами соседних отпечатков и между центром отпечатка и краем образца должны быть не менее $4 \cdot d$.

Определение твердости НВ производится на прессе Бринелля (твёрдомер типа ТШ) в следующем порядке. Испытываемый образец (деталь) устанавливают на столике шлифованной поверхностью кверху. Поворотом маховика по часовой стрелке столик прибора поднимают так, чтобы шарик мог вдавиться в испытываемую поверхность. Маховик вращают до упора, и нажатием кнопки включают электродвигатель. Двигатель перемещает коромысло и постепенно нагружает шток с закрепленным в нем шариком. Шарик под действием нагрузки, сообщаемой приведенным к коромыслу грузом, вдавливаясь в испытываемый материал. Нагрузка действует в течение определенного времени ($10 \div 60$ с), задаваемого реле времени, после чего вал двигателя, вращаясь в обратную сторону, соответственно перемещает коромысло и снимает нагрузку. После автоматического выключения двигателя,

поворачивая маховик против часовой стрелки, опускают столик прибора и снимают образец.

Диаметр отпечатка измеряют при помощи отсчетного микроскопа (лупы Бринелля), на окуляре которого имеется шкала с делениями, соответствующими десятым долям миллиметра. Измерение проводят с точностью до 0,05 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях; для определения твердости следует принимать среднюю из полученных величин.

Измерение твердости по Роквеллу. При этом методе индентором является алмазный конус или стальной закаленный шарик. В отличие от измерений по методу Бринелля твердость определяют по глубине отпечатка, а не по его площади. Глубина отпечатка измеряется в самом процессе вдавливания, что значительно упрощает испытания. Нагрузка прилагается последовательно в две стадии: сначала предварительная, обычно равная 10 кгс (для устранения влияния упругой деформации и различной степени шероховатости), а затем основная.

После приложения предварительной нагрузки индикатор, измеряющий глубину отпечатка, устанавливается на нуль. Когда отпечаток получен приложением окончательной нагрузки, основную нагрузку снимают и измеряют остаточную глубину проникновения индентора.

Твердость измеряют на приборе Роквелла, в нижней части станции которого установлен столик. В верхней части станции индикатор, масляный регулятор и шток, в котором устанавливается наконечник с алмазным конусом (имеющим угол при вершине 120° и радиус закругления 0,2 мм) или стальным шариком диаметром 1,588 мм. Индикатор представляет собой циферблат, на котором нанесены две шкалы (черная и красная) и имеются две стрелки – большая (указатель твердости) и маленькая – для контроля величины предварительного нагружения, сообщаемого вращением маховика. Столик с установленным на нем образцом для измерений поднимают вращением маховика до тех пор, пока малая стрелка не окажется против красной точки на шкале. Это означает, что наконечник вдавливается в образец под предварительной нагрузкой, равной 10 кгс.

После этого поворачивают шкалу индикатора (круг циферблата) до совпадения цифры 0 на черной шкале с большой стрелкой. Затем включают основную нагрузку, определяемую грузом, и после остановки стрелки

считывают значение твердости по Роквеллу, представляющее собой цифру. Столик с образцом опускают, вращая маховик против часовой стрелки.

Твердомер Роквелла измеряет разность между глубиной отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной и предварительной нагрузок. Каждое давление (единица шкалы) индикатора соответствует глубине вдавливания 2 мкм. Однако условное число твердости по Роквеллу (HR) представляет собой не указанную глубину вдавливания t , а величину $100 - t$ по черной шкале при измерении конусом и величину $130 - t$ по красной шкале при измерении шариком.

Числа твердости по Роквеллу не имеют размерности и того физического смысла, который имеют числа твердости по Бринеллю. Однако, можно найти соотношение между ними с помощью специальных таблиц.

Твердость по методу Роквелла можно измерять:

- алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кгс. Твердость измеряется по шкале С и обозначается HRC (например, 65 HRC). Таким образом определяют твердость закаленной и отпущенной сталей, материалов средней твердости, поверхностных слоев толщиной более 0,5 мм;
- алмазным конусом с общей нагрузкой 60 кгс. Твердость измеряется по шкале А, совпадающей со шкалой С, и обозначается HRA. Применяется для оценки твердости очень твердых материалов, тонких поверхностных слоев ($0,3 \div 0,5$ мм) и тонколистового материала;
- стальным шариком с общей нагрузкой 100 кгс. Твердость обозначается HRB и измеряется по красной шкале В. Так определяют твердость мягкой (отожженной) стали и цветных сплавов.

При измерении твердости на приборе Роквелла необходимо, чтобы на поверхности образца не было окалины, трещин, выбоин и др. Необходимо контролировать перпендикулярность приложения нагрузки и поверхности образца и устойчивость его положения на столике прибора. Размер отпечатка должен быть не менее 1,5 мм при вдавливании конуса и не менее 4 мм при вдавливании шарика.

Твердость следует измерять не менее 3 раз на одном образце, усредняя полученные результаты. Преимущество метода Роквелла по сравнению с методами Бринелля и Виккерса заключается в том, что значение твердости по

методу Роквелла фиксируется непосредственно стрелкой индикатора, при этом отпадает необходимость в оптическом измерении размеров отпечатка.

Измерение твердости по Виккерсу. При испытании твердости по методу Виккерса в поверхность материала вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине 136° . После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка d_1 . Число твердости по Виккерсу HV подсчитывается как отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка.

Число твердости по Виккерсу обозначается символом HV с указанием нагрузки P и времени выдержки под нагрузкой, причем размерность числа твердости ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают: для сталей 10 – 15 с, для цветных металлов – 30 с. Например, запись 450 HV10/15 означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при нагрузке $P = 10 \text{ кгс}$ (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

Преимущество метода Виккерса по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что методом Виккерса можно испытывать материалы с высокой твердостью из-за применения алмазной пирамиды.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение термина «дефектоскопия».
2. Назовите методы контроля.
3. Назовите минимальный размер дефекта, который можно определить невооруженным глазом.
4. Назовите минимальный размер дефекта, который можно определить с помощью оптической системы.
5. Назовите толщину материала, при которой эффективна рентгенодефектоскопия?
6. Назовите метод контроля для выявления поверхностных дефектов.
7. Дайте определение метода контроля «гамма-дефектоскопия».
8. Дайте определение метода контроля «трибоэлектрическая дефектоскопия».
9. Дайте определение термина «радиационный метод контроля».
10. Назовите элементы, которые используют при радиационном контроле.
11. В чем заключается метод радиационного контроля изделий?
12. Какими способами детектирования дефектоскопической информации различаются методы радиационного контроля?
13. Дайте определение термина «радиографический метод» неразрушающего контроля.
14. В чем заключается радиографический метод неразрушающего контроля?
15. Каким образом распределяют радиографический метод неразрушающего контроля в зависимости от используемых детекторов?
16. Дайте определение термина «пленочная радиография».
17. Дайте определение термина «ксерорадиография».
18. Назовите отличие пленочной радиографии от ксерорадиографии.
19. Дайте определение термина «радиационная интроскопия».
20. В чем заключается метод радиационной интроскопии?
21. Назовите преимущества метода радиационной интроскопии.
22. Дайте определение термина «радиометрическая дефектоскопия».
23. В чем заключается радиометрическая дефектоскопия?
24. Назовите преимущества метода радиометрической дефектоскопии.
25. Дайте определение термина «ультразвуковой метод неразрушающего контроля».

26. Назовите преимущества ультразвукового метода неразрушающего контроля.
27. Какую информацию можно получить при использовании ультразвукового метода неразрушающего контроля?
28. Приведите примеры использования ультразвукового метода контроля.
29. Дайте определение термина «ультразвуковая волна».
30. Дайте определение термина «продольная волна».
31. Дайте определение термина «поперечная волна».
32. Назовите отличие продольной и поперечной волн.
33. Дайте определение термина «магнитопорошковый метод» неразрушающего контроля.
34. В чем заключается метод магнитопорошкового контроля?
35. Для выявления каких дефектов используют метод магнитопорошкового контроля?
36. При каких условиях достигают наибольшую вероятность обнаружения дефектов методом магнитопорошкового контроля?
37. Каким образом определяется чувствительность метода магнитопорошкового контроля?
38. Дайте определение термина «капиллярный метод» неразрушающего контроля.
39. Для каких целей предназначен капиллярный метод неразрушающего контроля?
40. Каким образом выявляют дефекты с помощью капиллярного метода неразрушающего контроля?
41. Каким образом определяют чувствительность капиллярного метода неразрушающего контроля?
42. Какие классы чувствительности капиллярного метода контроля в зависимости от размеров дефекта Вы знаете?
43. Какие стадии процесса выявления дефектов капиллярным методом контроля Вы знаете?
44. При каких условиях возможно использование капиллярного метода для выявления несплошности материалов?
45. Дайте определение термина «визуально-оптический метод» неразрушающего контроля.

46. Назовите принцип действия и основной результат визуально-оптического метода контроля.
47. Назовите физические основы визуально-оптического метода контроля.
48. Для каких целей применяют визуально-оптический метод контроля?
49. Назовите ограничения визуально-оптического метода контроля.
50. Дайте определение термина «вихретоковый метод» контроля.
51. Для определения каких дефектов используют вихретоковый метод контроля?
52. В чем заключается принцип действия вихретокового метода контроля?
53. Назовите виды дефектов, которые могут быть обнаружены с помощью вихретокового метода контроля.
54. Что не может быть проконтролировано с помощью вихретокового метода контроля?
55. Назовите, что нельзя обнаружить с помощью вихретокового метода контроля.
56. От чего зависит определение дефекта вихретоковым методом контроля?
57. Что такое макроскопическое исследование?
58. Назовите методы макроскопического травления.
59. Какую информацию можно получить с помощью макроскопических методов травления?
60. Что позволяет выявить метод глубокого травления?
61. Каким образом осуществляют глубокое травление?
62. Назовите реактивы, которые используют для проведения глубокого травления?
63. Как влияют реактивы глубокого травления на поверхность стали?
64. Что позволяет выявить метод поверхностного травления?
65. Назовите требования, которые предъявляют к поверхности металла при поверхностном травлении.
66. Назовите реактивы, которые применяют для поверхностного травления.
67. Для выявления дефектов в каких сталях используют поверхностное травление?
68. Каким образом осуществляют поверхностное травление?
69. Что позволяет выявить метод отпечатков?
70. Каким образом осуществляют травление методом отпечатков?

71. Назовите реактивы, которые используют для проведения травления методом отпечатков.
72. Для выявления каких дефектов используют травление методом отпечатков?
73. Назовите стали, которые подвергают травлению методом отпечатков для выявления дефектов.
74. Дайте определение метода «рентгенофазовый анализ». Назовите виды рентгенофазового анализа.
75. Дайте определение «качественный рентгенофазового анализа».
76. Что позволяет определить рентгенофазовый анализ?
77. Назовите физическое явление, которое лежит в основе метода рентгенофазового анализа.
78. С помощью какого прибора осуществляют съемку дифрактограмм?
79. От чего зависит длина волны рентгеновского излучения?
80. В каких координатах записывается дифрактограмма?
81. Дайте определение понятию «фаза».
82. Дайте определение понятию «кристаллическая решетка».
83. В чем заключается теория дифракции рентгеновских лучей?
84. Назовите уравнения Вульфа-Брэгга и дайте определение его составляющих.
85. Каким образом проводится регистрация отраженных рентгеновских лучей?
86. Опишите принцип работы дифрактометра ДРОН.
87. Назовите каким образом и в какой последовательности проводится расшифровка рентгенограмм.
88. Приведите формулу, по которой определяют относительную интенсивность.
89. На чем базируется определение фазового состава материала?
90. Какие необходимо соблюдать условия при идентификации фаз?
91. В чем заключается сущность рентгенофлуоресцентного анализа?
93. Назовите источник возбуждения при рентгенофлуоресцентном анализе.
94. Что используют для анализа спектра вторичного излучения?
95. Дайте определение спектроскопии.
96. Назовите прямую задачу спектроскопии.
97. Назовите обратную задачу спектроскопии.
98. Назовите виды спектроскопии.
99. Перечислите виды спектроскопии, которые делятся по объектам исследования.
100. Перечислите виды спектроскопии, которые делятся по типу излучения.

101. Дайте определение понятию «спектральный анализ» и объясните, в чем он заключается.
102. Перечислите методы спектрального анализа в зависимости от целей анализа и типа спектров. Дайте определение методов.
103. Назовите метод, с помощью которого можно определить состав вещества по спектрам излучения и поглощения.
104. Дайте определение понятию «масс-спектрометр».
105. Назовите сущность масс-спектрометрического анализа.
106. Что можно определить с помощью масс-спектрометрического анализа?
107. Назовите сущность оптического спектрального анализа.
108. Дайте определение масс-спектрометру и объясните для каких целей он предназначен.
109. Что такое «масс-спектр»?
110. Какую информацию можно получить с помощью масс-спектрометрии?
111. В чем заключается принцип работы масс-спектрометра?
112. Назовите важнейшие технические характеристики масс-спектрометра.
113. Назовите классификацию способов ионизации органических веществ.
114. Назовите способы ионизации органических веществ газовой фазы.
115. Назовите способы ионизации органических веществ жидкой фазы.
116. Назовите способы ионизации органических веществ твердой фазы.
117. Назовите методы ионизации, которые используют в неорганической химии для анализа элементного состава вещества.
118. Назовите типы масс-анализаторов.
119. Назовите, какие масс-анализаторы относят к непрерывным.
120. Назовите, какие масс-анализаторы относят к импульсным.
121. В чем разница между непрерывными и импульсными масс-анализаторами?
122. Приведите примеры использования масс-спектрометрии.
123. Дайте определение электронный микроскоп.
124. Какое разрешение имеют электронные микроскопы?
125. Назовите виды электронных микроскопов.
126. Назовите области применения электронных микроскопов.
127. Дайте определение просвечивающей электронной микроскопии.
128. Назовите компоненты, из которых состоит просвечивающий электронный микроскоп.

129. Дайте определение сканирующий туннельный микроскоп. Для чего он предназначен?
130. В чем заключается принцип действия сканирующего туннельного микроскопа?
131. Из каких элементов состоит сканирующий туннельный микроскоп?
132. Какие ограничения на использование сканирующего туннельного микроскопа Вы знаете?
133. Что такое дифракция отраженных электронов?
134. Для чего применяют дифракцию отраженных электронов?
135. Укажите возможности дифракции отраженных электронов.
136. Дайте определение твердости материалов.
137. Назовите методы определения твердости.
138. Каким образом различаются способы измерения твердости по характеру действия индентора?
139. Назовите какой индентор применяют при измерении твердости по методу Бринелля.
140. Назовите какой индентор применяют при измерении твердости по методу Роквелла.
141. Назовите какой индентор применяют при измерении твердости по методу Виккерса.
142. Назовите преимущество испытаний на твердость материалов перед другими методами испытаний.
143. Каким образом количественно оценивают твердость материала?
144. Дайте определение числу твердости по Бринеллю.
145. В каких единицах измерения определяется твердость по Бринеллю?
146. Каким образом производят перерасчет единицы измерения твердости по Бринеллю в единицы СИ?
147. В чем заключается основное условие получения сопоставимых результатов определения твердости материалов шариками разного диаметра?
148. Для определения твердости по Бринеллю каких диаметров используют стальной шарик?
149. Каким образом выбирают диаметр шарика и нагрузки для измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу?
150. Для каких материалов не рекомендуют использовать измерения твердости по методу Бринелля?

151. Каким образом расшифровывается стандартное число твердости по Бринеллю?
152. Расшифруйте число твердости по Бринеллю HB 10/300 / 50-350.
153. Назовите условие, которое необходимо соблюдать при измерении твердости по Бринеллю.
154. Опишите порядок определения твердости по методу Бринелля.
155. Каким образом измеряют диаметр отпечатка при определении твердости по Бринеллю?
156. Назовите отличие между методами измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.
157. Каким образом определяют твердость по методу Роквелла?
158. Укажите параметры индентора для определения твердости по методу Роквелла.
159. Каким образом определяют твердость по Роквеллу с использованием индентора различной нагрузки?
160. Назовите требования, которым должна отвечать поверхность образца материала при измерении твердости прибором Роквелла.
161. Назовите параметры, которые необходимо контролировать при измерении твердости по Роквеллу.
162. Назовите условия, при которых измеряют твердость по Роквеллу.
163. Назовите преимущества метода измерения твердости по Роквеллу.
164. Какой метод используют для измерения твердости на образцах и готовых изделиях?
165. Расшифруйте число твердости 65 HRC.
166. Расшифруйте число твердости HRA.
167. Расшифруйте число твердости HRB.
168. Назовите требования, которым должен соответствовать индентор при определении твердости по Виккерсу.
169. В чем заключается метод определения твердости по Виккерсу?
170. Дайте определение числу твердости HV.
171. Каким образом определяется число твердости HV?
172. Расшифруйте число твердости 670 HV 20 / 25.
173. Назовите достоинства метода определения твердости по Виккерсу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Н.П. Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий / Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский. – М.: Высшая школа, 1991. – 271 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2 томах / Под ред. В.А. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.
3. Гурвич А.К. Неразрушающий контроль / А.К. Гурвич, И.Н. Ермолов, С.Г. Сажин. – М.: Высшая школа, 1992, кн.1. – 348 с.
4. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
5. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник в 3-х томах / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. 4-е изд. Перераб. и доп. Т.1. Методы испытания и исследования. В 2-х книгах. – М.: Металлургия, 1991. – 304 с.
6. Иверонова В.И. Теория рассеяния рентгеновских лучей / В.И. Иверонова, Г.П. Ревкевич. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 480 с.
7. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
8. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества: Учебное пособие для вузов / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
9. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.: ил.
10. НК и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 226 с.
11. Румянцев С.В. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С.В. Румянцев, В.А. Добромыслов, О.И. Борисов, Н.Т. Азаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 275 с.
12. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

Навчальне видання

Левко Олена Миколаївна

ДІАГНОСТИКА ТА ДЕФЕКТОСКОПІЯ
МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

Частина 2. Методи та засоби неруйнівного контролю
якості продукції

Навчальний посібник
(російською мовою)

Тем. план 2015, поз. 364

Підписано до друку 18.05.2015. Формат 60х84 $\frac{1}{16}$. Папір друк. Друк
плоский.

Облік.-вид. арк. 3,41. Умов. друк. арк. 3,36. Тираж 100 пр. Замовлення № 84.

Національна металургійна академія України
49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна,4

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ