



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

С.В. Зотов
Е.Г. Касаткина
Г.А. Бережная

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2023

Рецензенты:

помощник начальника цеха «Прокатсервис-4»
ООО «ОСК» (г. Магнитогорск)

В.В. Серков

доктор технических наук,
профессор кафедры Технологий обработки материалов
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»

М.А. Полякова

Зотов С.В., Касаткина Е.Г., Бережная Г.А.

Методы и средства измерения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Сергей Владимирович Зотов, Елена Геннадиевна Касаткина, Галина Андреевна Бережная; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (1,79 Мб). – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ», 2023. – 1CD-ROM. – Систем. требования: IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM; 10 Мб HDD; MS Windows XP и выше; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9967-2673-8

Описаны методы и средства измерения ряда физических величин, характеризующих протекание важнейших технологических процессов в металлургии и при обслуживании автомобильного транспорта. Информация о результатах этих измерений используется для управления производственных процессов, а также при научных исследованиях и проектировании. В то же время, средства измерения являются важным компонентом систем автоматического (автоматизированного) управления металлургическим производством.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 27.03.01 «Стандартизация и метрология» (Стандартизация, менеджмент и контроль качества) и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (эксплуатация и сервисное обслуживание автомобильного транспорта).

УДК 53.082

ISBN 978-5-9967-2673-8

© Зотов С.В., Касаткина Е.Г., Бережная Г.А., 2023
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2023

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ВИДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ	6
1.1. Общие сведения о техническом контроле	6
1.2. Входной контроль металлопродукции	10
1.3. Методы разрушающего контроля	14
1.4. Методы неразрушающего контроля	29
1.5. Контрольные вопросы	39
2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ	40
2.1. Классификация средств измерений по определяющим признакам	40
2.2. Статические характеристики и параметры	43
измерительных устройств	43
2.3. Контрольные вопросы	44
2.4. Тесты по теме	45
3. КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	47
3.1. Понятие о температуре и температурных шкалах. Классификация методов и приборов для измерения температуры	47
3.2. Термометры расширения	49
3.3. Манометрические термометры	50
3.4. Термоэлектрические термометры (термопары)	52
3.5. Бесконтактная пирометрия	55
3.6 Пирометры суммарного излучения	57
3.7 Пирометры частичного излучения	58
3.8 Проверка знаний для студентов	61
3.9 Контрольные вопросы	62
4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	64
4.1. Общие сведения	64
4.2. Жидкостные приборы	65
4.3. Манометры с упругими чувствительными элементами	67
4.3. Мембранные приборы	67
4.4. Электрические манометры и вакуумметры	68
4.5 Дифференциальные манометры	68

4.6. Грузопоршневой манометр.....	69
4.6. Промышленные датчики давления.....	69
4.7 Проверка знаний для студентов.....	72
4.8 Контрольные вопросы	73
5 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ПАРА .	75
5.1 Классификация методов измерения расхода и количества.....	75
5.2 Ультразвуковые расходомеры	77
5.3 Оптические расходомеры	79
5.4 Термально-массовые (тепловые) расходомеры	80
5.5 Меточные расходомеры.....	81
5.6 Электромагнитные расходомеры.....	82
5.6 Проверка знаний для студентов.....	83
5.7 Контрольные вопросы	84
6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	85
6.1. Механические средства измерения	85
6.2 Оптико-механические средства измерения	90
6.3 Автоматизация координатных измерений.....	93
6.4 Проверка знаний для студентов.....	96
6.5 Контрольные вопросы	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
ГЛОССАРИЙ.....	99
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	104

ВВЕДЕНИЕ

Измерения являются неотъемлемой частью большинства трудовых процессов. Затраты на обеспечение и проведение измерений составляют около 20 % от общих затрат на производство продукции.

На основе измерений получают информацию о состоянии производственных, экономических и социальных процессов. Измерительная информация служит основой для принятия решений о качестве продукции при внедрении систем качества, в научных экспериментах и т.д. И только достоверность и соответствующая точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений на всех уровнях управления. Получение недостоверной информации приводит к неверным решениям, снижению качества продукции.

Учебное пособие предназначено для обучающихся, осваивающих дисциплины по метрологии, методам измерения, по эксплуатации и сервисное обслуживание автомобильного транспорта. Специалисты в данных областях должны владеть необходимыми знаниями о методах и средствах контроля характеристик продукции, поскольку инструментальный контроль позволяет наиболее объективно подтвердить соответствие объекта предъявляемым требованиям.

Пособие освещает широкий круг вопросов по инструментальным методам и способам контроля качества продукции и обслуживанию транспортных средств, оптимальному выбору средств измерений для применения в тех или иных условиях эксплуатации. Данное учебное пособие поможет студентам понять место и значение измерений при контроле и испытаниях.

1. ВИДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

1.1. Общие сведения о техническом контроле

Нарушение требований, предъявленных к качеству изготавливаемой продукции, приводит к увеличению издержек производства и потребления. Поэтому своевременное предупреждение возможного нарушения требований к качеству является обязательной предпосылкой обеспечения заданного уровня качества продукции при минимальных затратах на ее производство. Эта задача решается на предприятиях с помощью технического контроля.

Техническим контролем называется проверка соблюдения технических требований, предъявляемых к качеству продукции на всех стадиях ее изготовления, а также производственных условий и факторов, обеспечивающих требуемое качество.

Объектами технического контроля являются материалы и полуфабрикаты, поступающие на предприятие со стороны, продукция предприятия как в готовом виде, так и на всех стадиях ее производства, технологические процессы, орудия труда, технологическая дисциплина и общая культура производства. Технический контроль призван обеспечивать выпуск продукции, соответствующей требованиям конструкторско-технологической документации, способствовать изготовлению продукции с наименьшими затратами времени и средств, предоставлять исходные данные и материалы, которые могут быть использованы в целях разработки мероприятий по повышению качества продукции и сокращению издержек.

По этапам производственного процесса различают следующие виды контроля:

- ***входной контроль (верификация)*** - составная часть системы качества предприятия, целью которого служит контроль качества продукции поставщика для предупреждения запуска в производство материалов, несоответствующих установленным требованиям;

- ***операционный контроль***, проводимый в процессе обработки изделий с целью проверки качества выполнения операций, своевременного выявления и изъятия брака, устранения дефектов. Возможен после каждой операции либо после группы операций в зависимости от требуемого качества изделий и характера технологического процесса. Этот контроль осуществляет исполнитель операции (рабочий, бригадир, испытатель) контролер, мастер ОТК (БЦК). В некоторых случаях операционный контроль может выполнять представитель заказчика;

- ***приемочный контроль***, выполняемый по окончании процесса изготовления изделий, деталей, сборочных единиц с целью определения соответствия качества требованиям, установленным в нормативно-технической документации. Контролируются также упаковка, комплектность и др. Этому контролю подвергается вся продукция, произведенная в данном цехе перед поступлением ее в следующий цех или непосредственно на склад. Приемочный контроль предупреждает отправку недоброкачественной продукции потребителю. Он выпол-

няется контролером, мастером ОТК. а в некоторых случаях - представителем заказчика. В зависимости от вида продукции при этом контроле возможно проведение соответствующих испытаний.

По полноте охвата изготовленной продукции контролем выделяют:

- **сплошной контроль** - проверка каждого изделия в изготовленной партии. Обычно такой контроль бывает необходимым при разнородности исходных материалов и заготовок и при неустойчивости технологического процесса. Сплошной контроль часто осуществляется после операций, имеющих решающее значение для качества готовых изделий, однородность которых в производстве недостаточно обеспечена, при проверке наиболее дорогих изделий;

- **выборочный контроль**, при котором контролируется лишь часть изготовленных изделий. Применяется при больших количествах одинаковых изделий и при устойчивом технологическом процессе. Выборочный контроль существенно снижает трудоемкость контроля при устойчивом технологическом процессе, при неустойчивом же процессе выборочный контроль будет приводить к выводу о необходимости сплошной сортировке, засоренной браком партии продукции.

По степени связи с объектами контроля во времени различают:

- **текущий контроль**, выполняемый непосредственно на месте изготовления, ремонта, хранения продукции в случайные неопределенные моменты времени (внезапно) с целью своевременного выявления нарушения технических требований и дефектов продукции, а также предупреждения подобных нарушений. Его осуществляют только выборочно для малосистемных изделий и процессов;

- **непрерывный контроль** для проверки технологических процессов в случаях их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения определенных количественных характеристик. Осуществляется, как правило, автоматическими и полуавтоматическими средствами контроля;

- **периодический контроль**, применяемый для проверки качества изделий и технологических процессов при установившемся производстве и стабильных технологических процессах.

По используемым средствам контроля различают:

- **измерительный контроль**, применяемый для оценки значений контрольных параметров изделия: по точному значению (используются инструменты и приборы шкальные, стрелочные и т.п.) и по допустимому диапазону значений параметра (применяются шаблоны, калибры и т.п.);

- **регистрационный контроль**, осуществляемый для оценки объекта контроля на основании результатов подсчета (регистрация определенных качественных признаков, событий, изделий);

- **контроль по контрольному образцу** - сравнение признаков контролируемого изделия с признаками контролируемого образца. Применяют при оценке контролируемых характеристик и параметров изделия, когда их измерение невозможно или экономически нецелесообразно;

- **органолептический контроль**, осуществляемый посредством только органов чувств без определения численных значений контролируемого объекта;

- **визуальный контроль** - вариант органолептического, осуществляется только органами зрения (глазной контроль).

Особый вид контроля - **контроль инспекционный**, который представляет собой повторную проверку продукции, уже принятой ОТК, или проверку соблюдения правил выполнения контроля. Такой контроль выполняется специальной комиссией, он может быть осуществлен в каждом цехе по распоряжению начальника ОТК завода. Инспекционный контроль дисциплинирует персонал, побуждает его внимательно относиться к своим обязанностям. **Совокупность видов, средств контроля, методов выполнения контрольных операций и исполнителей, взаимодействующих с объектом контроля, составляет систему контроля.**

В системе управления качеством продукции **статистические методы контроля** являются наиболее прогрессивными. Они основаны на применении методов математической статистики к систематическому контролю за качеством продукции и состоянием технологического процесса с целью поддержания его устойчивости и обеспечения заданного уровня качества изготавливаемой продукции. Статистические методы контроля производства и качества продукции имеют ряд преимуществ перед другими методами:

- являются профилактическими;
- позволяют во многих случаях обосновано перейти к выборочному контролю и тем самым снизить трудоемкость контрольной работы;
- создают условия для наглядного изображения динамики качества продукции и настроенности процесса, что позволяет своевременно принимать меры к предупреждению брака не только контролером и работником ОТК, но и персоналом цеха - рабочими, бригадирами, наладчиками, технологами.

Статистические методы управления качеством (ГОСТ Р 50779.12-2021) включают:

- выборочный статистический приемочный контроль качества готовой продукции;
- статистический анализ точности технологических процессов;
- текущий контроль с целью регулирования и поддержания процесса в состоянии, обеспечивающем заданные качественные параметры.

Статистический приемочный контроль – это выборочный контроль качества продукции, при котором для обоснования плана контроля используются методы математической статистики. План контроля – это совокупность правил, по которым производится выборка из партии изготовленных изделий или деталей и на основании их качества делается заключение о качестве всей партии продукции. Методы статистического приемочного контроля применяются для входного контроля материалов, сырья и комплектующих изделий, при операционном контроле, при контроле готовой продукции.

Часто сплошной контроль или разбраковка всех изделий невозможны в силу неэкономичности проверки больших партий продукции или неизбежного разрушения изделий при контроле (например, испытание электрических лампочек на долговечность).

Сущность приемочного статистического контроля заключается в отборе и проверке выборки из предъявленной на контроль партии продукции. На основе оценки качества выбранных экземпляров делается заключение о качестве всей партии продукции.

На практике используются методы однократной, двукратной выборки и последовательного анализа. При методе однократной выборки заключение о качестве продукции делается на основе контроля одной выборки. Он наиболее прост и удобен. Из партии продукции объема N отбирается выборка объемом n случайным образом. Качество каждого экземпляра продукции проверяется с помощью соответствующих технических средств контроля.

Существуют две разновидности однократного статистического контроля: статистический приемочный контроль по количественному признаку и статистический приемочный контроль по альтернативному признаку.

Решение о качестве партии продукции, определяемом при статистическом приемочном контроле по количественному признаку, принимают по следующему правилу: если количество дефектных экземпляров a обнаруженных в выборке n , меньше или равно приемочному их числу c , данная партия продукции принимается. В случае, если $a > c$ партия N бракуется.

Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку применяется в случае, когда приемка партии продукции при наличии дефектных изделий в выборке является недопустимой ($c=0$) по экономическим или иным соображениям. В этом случае используется правило: если в выборке не обнаружено ни одного дефектного изделия, партия N принимается. При наличии хотя бы одного дефектного изделия партия бракуется.

В зависимости от варианта браковки партия N возвращается поставщику или проводится сплошной контроль всех изделий в партии.

Важнейшими параметрами однократного статистического приемочного контроля являются объем выборки n и приемочное число c . Эти параметры определяются с учетом требований, предъявляемых к качеству контролируемой продукции, а также риска поставщика и потребителя. Риск поставщика, как и риск потребителя, устанавливается в процентах (0,05% или 0,1%). Риск поставщика - вероятность забраковки партии продукции, обладающей допустимым уровнем дефектности. И наоборот, риск потребителя - это вероятность приемки партии продукции, обладающей браковочным уровнем дефектности.

Преимущество двукратного контроля партии изделий по сравнению с одноступенчатым заключается в том, что при прочих равных условиях проверке подвергается меньше изделий (на 20-30%).

Последовательный контроль (последовательный анализ) не определяет заранее количество изделий, по которым будет сделан вывод о качестве продукции. Отбор образцов производится небольшими группами последовательно вплоть до получения убедительных результатов, по которым принимается решение. Многоступенчатый контроль и последовательный анализ требуют высокой квалификации контролера, поэтому, хотя и существуют специальные таблицы контроля, они не нашли достаточного распространения.

Статистический приемочный контроль используется в условиях устойчивых технологических процессов в массовом и крупносерийном производстве. По сравнению со сплошным контролем он сокращает количество контролируемых объектов, однако трудоемкость каждой контрольной операции возрастает из-за использования измерительной аппаратуры (а не простых контрольных инструментов в виде скоб и калибров), определяющей значение контролируемого параметра.

В условиях серийного и массового производства должны широко использоваться *методы непрерывного контроля* за ходом технологического процесса и статистического регулирования его качества. Усложнение оборудования и технологических систем, переход на безлюдную технологию предъявляет особо высокие требования к системе управления качеством технологического процесса. Нормальное функционирование автоматических линий и гибких переналаживаемых систем требует получения постоянной информации не только о контроле качества продукции на выходе системы, но и о работоспособности технологических систем, включающих оборудование, оснастку, инструмент, заготовку и исполнителя - рабочего, оператора или наладчика. Поэтому трудоемкость контрольных операций в автоматическом и гибком автоматизированном производстве достигает 50% и более в общих трудовых затратах, связанных с изготовлением продукции. В связи с этим совершенствование существующих и создание новых систем управления качеством технологических процессов идет путем автоматизации контроля, использования новых средств контроля, в том числе акустических, магнитных, оптических, радиационных и др.

Совершенствование системы управления качеством продукции должно создавать такие экономические и организационные условия, которые стимулировали бы качественный, производительный труд, инициативу исполнителей. Плохая работа должна непосредственно сказываться на материальном вознаграждении, на служебном положении и на авторитете работника.

1.2. Входной контроль металлопродукции

Качество металлопродукции, поступающей на предприятие, определяется при входном контроле (ВК) или верификации закупленной продукции.

Входной контроль (верификация) – контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю, предназначенной для использования при изготовлении, ремонте или эксплуатации продукции.

В соответствии с ГОСТ 24297-2013 верификацию закупленной продукции осуществляет персонал, ответственный за ее проведение и имеющий соответствующие полномочия.

В случае необходимости для верификации продукции могут привлекаться специалисты сторонних организаций на договорной основе с определением условий и обязанностей сторон по проведению верификации продукции.

Основными задачами входного контроля являются:

– проведение контроля наличия сопроводительной документации на продукцию;

- контроль соответствия качества и комплектности продукции требованиям конструкторской и нормативно – технической документации;
- накопление статистических данных о фактическом уровне качества получаемой продукции и разработка на этой основе предложений по повышению качества и, при необходимости, пересмотру требований нормативно-технической документации (НТД) на продукцию;
- периодический контроль за соблюдением правил и сроков хранения продукции поставщиков.

Верификацию необходимо проводить в специально отведенном помещении (участке), оборудованном необходимыми средствами контроля, испытаний и оргтехники, а также отвечающим требованиям безопасности труда.

Средства измерений и испытательное оборудование, используемые при верификации, выбирают в соответствии с требованиями НТД на контролируруемую продукцию и ПР 50.2.002-94.

Если метрологические средства и методы контроля отличаются от указанных в НТД, то потребитель согласовывает технические характеристики используемых средств и методы контроля с поставщиком.

Например, на крупных предприятиях разрабатываются стандарты организаций (СТО) «Входной контроль металлических материалов», «Технологическая инструкция (ТИ) входного контроля металлических материалов» и др.

СТО устанавливает порядок организации, проведение и оформление результатов верификации металлопродукции, применяемой на предприятии. ТИ определяет объем и виды верификации в соответствии с перечнем металлов и полуфабрикатов, подлежащих верификации.

В верификации участвуют: склад покупной металлопродукции или цех-потребитель (далее склад) и центральная заводская лаборатория (ЦЗЛ).

Типовая схема организации верификации (ВК) (рис. 1) заключается в следующем. Поступившая на склад металлопродукция принимается с сопроводительной документацией по номенклатуре, ассортименту и количеству и не позднее 10 дней передается на входной контроль.

Металл контролируется с момента поступления на предприятие и по мере его продвижения по технологической цепочке в следующей последовательности.

1) Проверка сопроводительной документации:

- товарно-транспортные документы на соответствие наименования материала по всей номенклатуре;
- документы, удостоверяющие качество металла (паспорта, сертификаты) на наличие полного оформления и соответствие записанных марок стали с маркировкой на каждой единице проката;
- внесение параметров в журнал входного контроля.



Рис. 1. Типовая схема организации верификации

2) Проверка геометрии:

- листовую сталь на волну и прогиб;
- круглую сталь на изгиб, спираль и овальность.

3) Проверка геометрических размеров с применением мерительного инструмента:

- лист по толщине;
- полосу по ширине и толщине;
- квадрат по правильности формы и размера;
- шестигранник по грани;
- труба по наружному диаметру и толщине стенки.

Контроль размеров производится измерительными инструментами, обеспечивающими соответствующую погрешность измерения.

В зависимости от вида сортамента (пруток, лента, лист и т. д.) контролю подлежат размеры, указанные в сертификате на входную продукцию, при этом в ТИ оговорено, как и в каких местах проводятся измерения.

Например, измерение толщины полос и лент должно проводиться на расстоянии не менее 50 мм от конца и не менее 10 мм от кромки. Ленты шириной 20 мм и менее измеряются посередине. Измерения производятся микрометром по ГОСТ 6507-90 или ГОСТ 4381-87.

Измерение толщины листов и плит производят на расстоянии не менее 115 мм от углов и не менее 25 мм от кромок листа штангенциркулем (ГОСТ 166-89).

Измерение диаметров прутков, проволоки производят не менее чем в двух местах в двух взаимно перпендикулярных направлениях одного и того же сечения микрометром (проволока) или штангенциркулем (пруток). Ширину и длину измеряют металлической рулеткой по ГОСТ 7502-98 или металлической линейкой по ГОСТ 427-75.

4) Проверка состояния поверхности:

Литье

- на наличие усадочных раковин (закрытые или открытые полости в теле отливки, имеющие неправильную форму, шероховатую или кристаллическую поверхность, иногда окисленную);
- на наличие газовой пористости (возникает в процессе кристаллизации из-за выделения газов, растворившихся в металле при его плавлении);
- на наличие неметаллических включений (наружные или внутренние полости, заполненные формовочной смесью или шлаком);
- на наличие трещин с применением оптического инструмента (могут иметь как холодную, так и горячую природу в зависимости от условий усадки в процессе кристаллизации);
- на наличие ликвации (это местное несоответствие химического состава в отдельных зонах. В зоне ликвации механические характеристики могут быть занижены. Поэтому этот дефект обнаруживается чаще всего при механической обработке).

Прокат

- на наличие поверхностных рисок (возникают при попадании мелких частиц на ватки при прокатке);
- на наличие волосовин (имеют вид тонких трещин, расположенных на поверхности и вытянутых вдоль направления деформации, являются результатом деформации неметаллических включений или газовых пузырей);
- на наличие закатов (наслоения, возникающие из-за избытка металла в валках);
- на наличие пленки (отслаивающиеся с поверхности пленки, которые возникают при раскатывании слитка, имеющего на своей поверхности застывшие капли жидкого металла).

Качество поверхности металла проверяют на соответствие требованиям НТД на поставку визуально без применения увеличительных приборов (кроме случаев, оговоренных особо). Рекомендованный объем контроля составляет 5 % от партии. В некоторых случаях (поковки, отливки и др.) контролю поверхности подвергают 100 % продукции.

При необходимости контроля внутренней поверхности труб от них отрезают образцы, разрезают их по образующей и контролируют наличие дефектов.

Во всех случаях при обнаружении дефектов (в том числе следов коррозии) из мест расположения этих дефектов отбираются пробы и отправляются в ЦЗЛ

для определения характера дефекта и глубины его залегания. По заключению принимается решение о годности данной партии металла.

5) Нанесение цветной маркировки согласно утвержденной на предприятии, таблицы цветов по маркам применяемой стали:

– на листовом прокате наносится по периметру листа буквенно - цифровая маркировка стали через трафарет краской соответствующего этой марке цветом;

– на круглом прокате по торцу.

Например: Углеродистая качественная сталь - 08, 10,15, 20 - белый; хромоникелевая - желтый и черный; коррозионностойкая сталь хромистая - алюминиевый и черный; быстрорежущая сталь P18 - бронзовый и красный.

6) Проверка химического состава и механических свойств.

Этот контроль проводится в ЦЗЛ на специально отобранных пробах от каждой партии металла с оформлением заключения по установленной форме.

Химические методы анализа, в основе которых лежат химические реакции определяемых веществ в растворах, включают, главным образом, гравиметрический, титриметрический и колориметрический анализы. Необходимо отметить, что химический анализ трудоемок, не является универсальным и не обладает высокой чувствительностью (особенно при малых концентрациях определяемых элементов).

Контроль химического состава проводится с целью установления соответствия качественного и количественного химического состава металлопродукции нормам, заявленным в сертификате.

Отобранные пробы направляются в ЦЗЛ, где проводится контроль химического состава с использованием химических и/или спектральных методов анализа.

Результаты контроля химического состава металла оформляются в сопроводительной документации и регистрируются в паспорте входного контроля.

При несоответствии какого-либо показателя установленным требованиям контролю подвергается удвоенное количество образцов от данной партии металла. При повторном получении неудовлетворительных результатов склад, отдел контроля и отдел снабжения составляют акт на брак.

Забракованный металл маркируется красной краской «Брак» и хранится в изоляторе брака до принятия решения об утилизации или возврате.

1.3. Методы разрушающего контроля

Разрушающий метод контроля – обнаружение предельно допустимых базовых способностей объекта, с применением испытаний на контрольных образцах, до абсолютного разрушения последних.

Среди множества методов испытаний на прочность, наиболее достоверными считаются методы разрушающего контроля. Большинство испытаний методами разрушающего контроля проводится до того момента, когда испытательный образец становится непригодным для дальнейшей эксплуатации. Такой

подход позволяет с большой точностью определить предельные нагрузки, допустимые при эксплуатации испытуемой продукцией.

Методы разрушающего контроля бывают следующих видов:

Механические испытания – превалирующий вид испытаний разрушающим контролем. Применяется для испытаний прочности как отдельных деталей, так и конструкций из различных материалов.

Стендовые испытания – применяются в основном в машиностроении для испытания двигателей и электрических узлов на специально оборудованных стендах. Основная отрасль – авиация, автомобилестроение, тяжелое машиностроение.

Климатические испытания – применяются с целью подтверждения жизнеспособности изделия для эксплуатации в условиях, отличных от нормальных и приближенных к экстремальным. Под экстремальными условиями подразумевается воздействие внешних факторов: климат и сопутствующие ему особенности; индивидуальные параметры места эксплуатации испытуемой продукции. Проведение климатических испытаний проводится в специальной камере, воссоздающей все необходимые условия.

Термические испытания – проверка свойств материала при пониженных и повышенных температурах. В зависимости от материала образца используют различные методы изменения его температуры: пропускание тока, электронный, кондукторный, индукционный, радиационный, конвективный.

Радиационные испытания – испытания на радиационное воздействие. Испытаниям подлежат материалы и изделия, эксплуатируемые на атомных электростанциях. Результатами данных испытаний характеризуется стойкость образца к источникам ионизирующего излучения.

Электромагнитные испытания – испытания на электромагнитную совместимость. Испытания характеризуют взаимодействие различных электроприборов при одновременном их использовании. Так же определяется помехоустойчивость оборудования при воздействии на него электромагнитного поля.

Электрические испытания – испытания электроприборов и их составляющих, в частности кабелей и изолированных жил. В рамках данного метода проводятся следующие мероприятия: определение объемного электрического сопротивления; испытания жилы на пробой электричеством; сопротивление низкому напряжению.

Химические испытания – применяются для широчайшего спектра продукции, начиная от строительных материалов, таких как металл, бетон, и заканчивая продукцией, в состав которой входят органические вещества. Поскольку перечень продукции и количество подвидов химических испытаний очень разнообразно, об этом можно прочитать в отдельной статье.

Испытания на устойчивость – в рамках данного метода проводятся испытания на ударную устойчивость различных технических изделий, в частности машин и приборов. При проверке испытуемый объект многократно подвергают большому внешнему воздействию краткосрочного характера. Результатом испытаний является предельная нагрузка, при которой происходит деформация испытываемого образца.

1.3.1. Методы испытания механических свойств металлов

Механические свойства – это характеристики материала, определяющие его поведение под действием приложенных внешних механических сил.

Механические свойства металлов (прочность, упругость, пластичность, вязкость), как и другие свойства, являются исходными данными при проектировании и создании различных машин, механизмов и сооружений.

По длительности приложения нагрузки механические испытания делятся на кратковременные и длительные. В большинстве случаев проводят кратковременные испытания длительностью несколько минут. Длительные испытания проводят, как правило, для определения механических свойств металлов, которым предстоит работать в особо ответственных конструкциях и сложных условиях в течение длительного периода времени.

В зависимости от температуры, различают испытания при пониженной (ниже 0°C), обычной (20°C) и повышенной (выше 20°C) температурах. Температуру испытания выбирают в зависимости от рабочей температуры изделий.

Контроль механических свойств проводится в ЦЗЛ в соответствии с требованиями СТО и ТИ. Содержание и объем контроля механических свойств поступающей на предприятие металлопродукции определяется маркой металла, состоянием поставки и назначением в соответствии с НТД. Результаты механических свойств металла отражают в паспорте входного контроля с приложением таблиц испытаний.

1) Испытания на растяжение

Испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84) проводятся на стандартных образцах круглых образцах, а для листового материала на плоских образцах. При растяжении под действием плавно возрастающей нагрузки образец деформируется до момента разрыва. Во время испытания образца снимают диаграмму растяжения (рис. 2), фиксирующую зависимость между действующей на образец силой P , и вызванной ею деформацией Δl (Δl – абсолютное удлинение).

Растяжение – наиболее жесткая схема напряженного состояния. Испытания на растяжение позволяют по результатам одного опыта определить сразу несколько важных механических характеристик материала. Методы испытания на растяжение стандартизованы. В отдельных стандартах сформулированы, определения характеристик, оцениваемых при испытании, даны типовые формы и размеры образцов, основные требования к оборудованию, методика испытания и расчета результатов.

При испытании на одноосное растяжение образец, закрепленный в захватах разрывной машины, деформируется при статической, плавно возрастающей нагрузке. Автоматически идет запись диаграммы растяжения, т.е. зависимости деформации Δl от действующей нагрузки P . Для поликристаллов различных металлов и сплавов диаграммы растяжения могут иметь различный вид в зависимости от протекания деформации и характера разрушения образца. На рис. 2 представлена диаграмма растяжения для образцов, разрушающихся после образования шейки в результате сосредоточенной деформации.

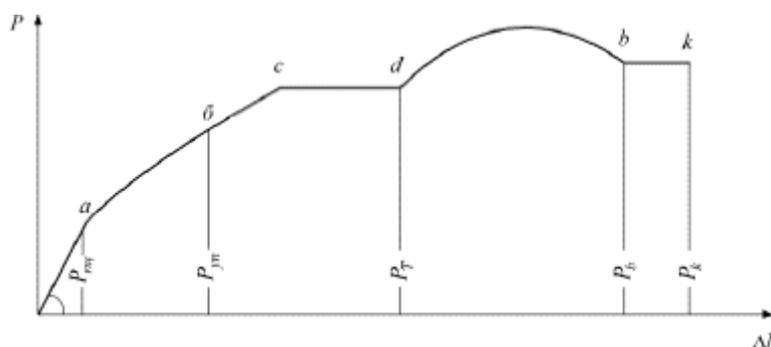


Рис. 2. Диаграмма растяжения

По координатам характерных точек диаграммы можно рассчитать различные прочностные характеристики.

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_0}; \quad (1)$$

где P_i – приложенная нагрузка; F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

На начальном участке диаграммы, до точки b , материал испытывает только упругую деформацию, которая полностью исчезает после снятия нагрузки. В области упругой деформации до точки a деформация пропорциональна нагрузке или действующему напряжению $\frac{P}{F_0}$. Нагрузке в точке a , определяющей конец прямолинейного участка диаграммы растяжения, соответствует предел пропорциональности:

$$\sigma_{mц} = \frac{P_{mц}}{r_0}; \quad (2)$$

До точки a справедлив закон Гука:

$$\sigma = E * \varepsilon; \quad (3)$$

где $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} * 100\%$ – относительная деформация; Δl – относительное удлинение, l_0 – начальная длина образца.

Коэффициент пропорциональности характеризует упругие свойства материала – это модуль нормальной упругости E .

$$E = \operatorname{tg} \alpha; \quad (4)$$

При заданном напряжении с увеличением E уменьшается ε . т.е. возрастает жесткость конструкции.

Значение E зависит от сил межатомного взаимодействия и меняется незначительно при изменении состава сплава, структуры, термической обработки. Например, для различных углеродистых и легированных сталей $E = 210 \text{ МПа}$ независимо от вида предшествующей обработки.

Координата точки b на диаграмме определяет теоретический предел упругости материала:

$$\sigma_{yn} = \frac{P_{yn}}{A_0}; \quad (5)$$

Т.е. максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию. Практически, из-за трудности определения σ_{yn} используют условный предел упругости, под которым понимают напряжение, вызывающее остаточную деформацию от начальной длины образца в пределах $0,005 \div 0,05\%$. В обозначении условного предела упругости указывают значение остаточной деформации (например, $\sigma_{0,005}$).

На участке диаграммы правее точки b материал испытывает пластическую деформацию. Горизонтальный участок $c-d$, соответствующий пластической деформации при постоянной нагрузке, называется площадкой текучести, а напряжение, отвечающее этому участку, физическим пределом текучести:

$$\sigma_T = \frac{P_{0,2}}{F_0}; \quad (6)$$

Из-за сложности определения σ_T часто используют условный предел текучести, т.е. напряжение, вызывающее остаточную деформацию, составляющую $0,2\%$ от начальной длины образца:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}; \quad (7)$$

Таким образом, предел текучести – физический и условный – характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

При дальнейшем нагружении, правее точки d пластическая деформация увеличивается, равномерно распределяясь по всему объему образца. В точке b , макроравномерность пластической деформации нарушается. В какой-то части образца, обычно вблизи концентратора напряжений, который уже был в исходном состоянии или образовался при растяжении (чаще всего в середине расчетной длины), начинается локализация деформации. Ей соответствует местное сужение поперечного сечения образца - образование шейки. Напряжение в этот момент испытания называют временным сопротивлением разрыву. Оно соответствует максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}; \quad (8)$$

По физическому смыслу σ_b это условное напряжение, характеризующее сопротивление максимальной равномерной деформации. За точкой b идет развитие шейки вплоть до разрушения, в точке k . Максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца:

$$S_k = \frac{P_k}{F_k}; \quad (9)$$

где F_k – площадь поперечного сечения образца в месте разрушения – называется истинным сопротивлением разрушению.

Таким образом, важнейшие показатели прочностных свойств, определяемые при статическом испытании на растяжение:

1. сопротивление упругой деформации, характеризующееся $\sigma_{yn}, \sigma_{0,005}, E$
2. сопротивление пластической деформации, характеризующееся $\sigma_T, \sigma_{0,2}, \sigma_b$.

Определение прочностных характеристик материалов, хрупко разрушающихся при растяжении, проводят при испытании на изгиб или сжатие, т.е. при более мягкой схеме нагружения. Изменение размеров образца в результате растяжения показано на рис. 3.

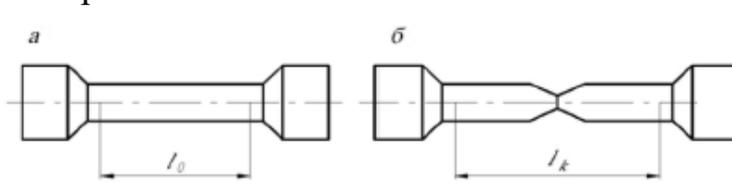


Рис. 3. Образцы стали: а – до растяжения; б – после разрыва

2) Испытания на пластичность

Пластичность – способность твердых тел необратимо деформироваться под действием внешних сил.

Основные характеристики пластичности при испытании на растяжение – **относительное удлинение и относительное сужение**.

Относительное удлинение, величина относительной пластической деформации, предшествующей разрушению, рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} * 100 = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} * 100\%; \quad (10)$$

где l_0 и l_k – начальная и конечная длина образца; δ – абсолютное удлинение.

Относительное сужение ψ , как и δ представляет собой относительную пластическую деформацию, предшествовавшую разрушению, а оценивается как относительное изменение поперечного сечения образца по формуле:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} * 100\%; \quad (11)$$

где F_0 – начальная площадь поперечного сечения; F_k – площадь поперечного сечения «шейки» после разрыва.

Используются и другие характеристики пластичности материалов. Например, число перегибов до разрушения и др. Ни один из показателей пластичности не является универсальным. Величина δ лучшая характеристика в процессах с преобладанием деформации растяжения.

Характеристики пластичности часто связаны с прочностными свойствами. При достаточно высоких значениях относительного удлинения и сужения $\delta > 10 \div 20\%$ прочность обычно тем меньше, чем выше пластичность. Но переход к хрупкому разрушению сопровождается, как правило, снижением прочностных свойств.

Относительное сужение характеризует способность к местной пластической деформации в направлении, перпендикулярном действию сил. Оно определяется только для образцов круглого сечения.

3) Испытания на ударную вязкость

Вязкость (внутреннее трение) – способность металла поглощать энергию внешних сил при пластической деформации и разрушении (определяется величиной касательной силы, приложенной к единице площади слоя металла, подлежащего сдвигу).

Для испытания на удар изготавливают специальные образцы с надрезом, которые затем разрушают на маятниковом копре (рис. 4). Общий запас энергии маятника будет расходоваться на разрушение образца и на подъем маятника после его разрушения. Поэтому если из общего запаса энергии маятника отнять часть, которая тратится на подъем (взлет) после разрушения образца, получим работу разрушения образца:

$$K = P * h_1 - h_2; \quad (12)$$

или

$$K = Pl \cos\beta - \cos\alpha; \quad (13)$$

где P – масса маятника, Н (кг); h_1 – высота подъема центра масс маятника до удара, м; h_2 – высота взлета маятника после удара, м; l – длина маятника, м; α , β – углы подъема маятника соответственно до разрушения образца и после него.

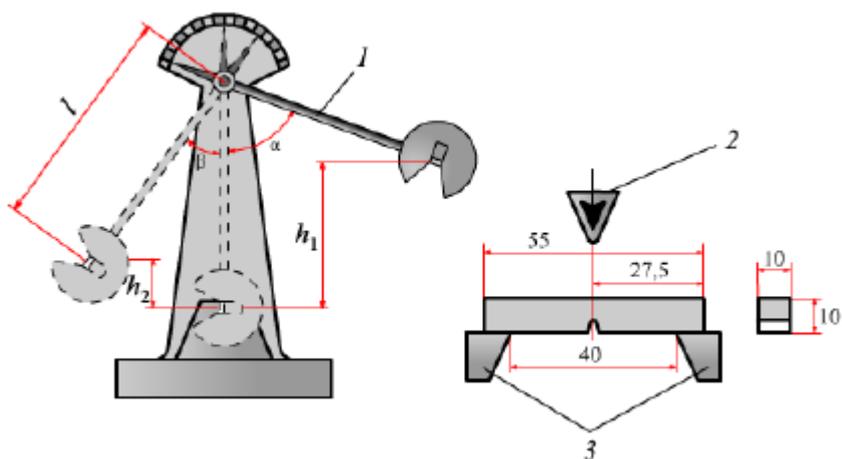


Рис. 4. Испытание на ударную вязкость: 1 – маятник; 2 – нож маятника; 3 – опоры

Ударную вязкость, т. е. работу, затраченную на разрушение образца и отнесенную к поперечному сечению образца в месте надреза, определяют по формуле:

$$K_C = \frac{K}{F}, \text{ МДж/м}^2 (\text{кг} * \text{м/см}^2); \quad (14)$$

где F – площадь поперечного сечения в месте надреза образца, м^2 (см^2).

Для определения K_C пользуются специальными таблицами, в которых для каждого угла β определена величина работы удара K . При этом $F = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Для обозначения ударной вязкости добавляют и третью букву, указывающую на вид надреза на образце: U , V , T . Запись $K_C U$ означает ударную вязкость образца с U -образным надрезом, $K_C V$ – с V -образным надрезом, а $K_C T$ – с трещиной (рис. 5).

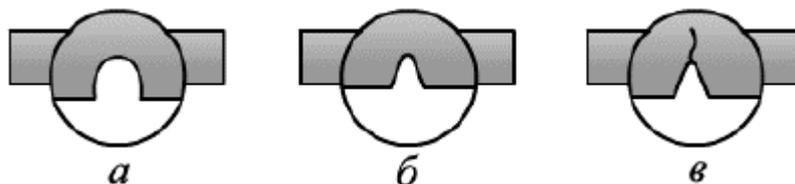


Рис. 5. Виды надрезов на образцах для испытания на ударную вязкость:
а – U -образный надрез $K_C U$; б – V -образный надрез $K_C V$;
в – надрез с трещиной $K_C T$

Высокая ударная вязкость более $20 \div 80 \text{ Дж/см}^2$ (у разных групп сплавов) характерна для чистых по примесям, высокопластичных металлов, однофазных сплавов, и гетерогенных по структуре сплавов с небольшим количеством избыточных фаз или оптимальным их распределением. Легирование, увеличение размера зерна уменьшает ударную вязкость.

Испытания на ударную вязкость используют для определения хладноломкости, т.е. перехода материала из вязкого в хрупкое состояние при пониженных температурах. Температура, при которой резко падает ударная вязкость, а в изломе 50% вязкой составляющей, называется температурным порогом хладноломкости материала T_{50} .

Для применяемых материалов T_{50} должен быть ниже температуры эксплуатации детали, т.е. необходим температурный запас вязкости. Для надежной работы температурный запас вязкости должен быть 40°C . В справочной литературе часто приводится температура верхнего $T_{\text{в}}$ и нижнего порога хладноломкости $T_{\text{н}}$. $T_{\text{в}}$ соответствует температуре, при которой в изломе 90% вязкой составляющей, а при $T_{\text{н}}$ в изломе 90% хрупкой составляющей (см. рис. 6).

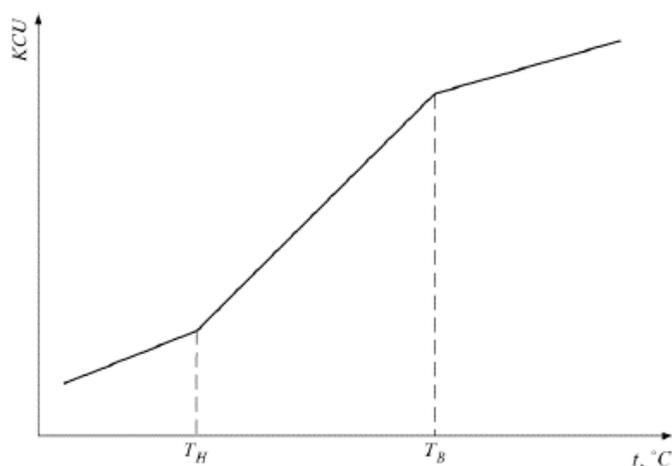


Рис. 6. Зависимость ударной вязкости от температуры испытания

4) Испытания на твердость

Твердость — это сопротивление материала проникновению в него другого, более твердого тела. Из всех видов механического испытания определение твердости является самым распространенным.

Твердость материала определяют при помощи воздействия на поверхность образца или детали наконечника (индентора), изготовленного из малодеформирующегося материала и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы. Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия индентора. Твердость можно измерять вдавливанием индентора, царапанием поверхности, ударом или по отскоку индентора-шарика. Твердость, определенная царапанием, характеризует сопротивление разрушению; твердость, определенная по отскоку, характеризует упругие свойства; твердость, определенная вдавливанием — сопротивление пластической деформации. В каждом методе свое обозначение числа твердости.

Наиболее широко распространены методы, в которых используется, статическое вдавливание индентора нормально поверхности образца. При вдавливании индентора в поверхностном слое образца под индентором возникает сложное напряженное состояние, близкое к объемному сжатию, которое характеризуется наибольшим коэффициентом жесткости по сравнению с другими видами испытаний. Поэтому возможно получение «пластических» состояний, исклю-

чение разрушения и оценка твердости практически любых, в том числе и хрупких металлических материалов.

Широкое применение методов объясняется:

- их простотой;
- высокой производительностью;
- отсутствием разрушения образца, детали;
- возможностью оценки свойств отдельных структурных составляющих и тонких слоев;
- существующей связью между твердостью и важнейшими механическими и технологическими свойствами.

Величина твердости линейно связана с прочностью достаточно пластичных металлов и сплавов. Для конструкционных сталей, например, эмпирически установлено соотношение:

$$\sigma_{\text{в}} = kHB; \quad (15)$$

где HB – твердость материала, k – постоянная.

$$k \approx 0,36 \text{ при } HB > 1750 \text{ МПа};$$

$$k \approx 0,34 \text{ при } HB < 1750 \text{ МПа}.$$

Подобная количественная зависимость не наблюдается для хрупких материалов, которые при испытании на растяжение (или изгиб, кручение, сжатие) разрушаются без заметной пластической деформации. В ряде случаев, однако, и для таких материалов (например, серых чугунов) наблюдается качественная зависимость между пределом прочности и твердостью; возрастанию твердости обычно соответствует рост предела прочности на сжатие. По значению твердости можно определить и некоторые пластические свойства. Твердость, определенная вдавливанием, характеризует также предел выносливости некоторых металлов, в частности меди, дуралюмина и сталей в отожженном состоянии.

Испытания по Бринеллю (ГОСТ 9012-83) проводятся путем вдавливания в металл стального шарика. В результате на поверхности металла образуется сферический отпечаток (рис. 7, а). Твердость по Бринеллю определяется по формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}; \quad (16)$$

где P – нагрузка на металл, Н; D – диаметр шарика, м; d – диаметр отпечатка, м.

Чем тверже металл, тем меньше площадь отпечатка.

Диаметр шарика и нагрузку устанавливают в зависимости от исследуемого металла, его твердости и толщины. При испытании стали и чугуна выбирают $D = 10$ мм и $P = 30$ кН (3000 кгс), при испытании меди и ее сплавов $D = 10$ мм и $P = 10$ кН (1000 кгс), а при испытании очень мягких металлов (алюминия, баббитов и др.) $D = 10$ мм и $P = 2,5$ кН (250 кгс). При испытании образцов толщиной

менее 6 мм выбирают шарики с меньшим диаметром – 5 и 2,5 мм. На практике пользуются таблицей перевода площади отпечатка в число твердости.

Метод Бринелля не рекомендуется применять для металлов твердостью более HB 450 (4500 МПа), поскольку шарик может деформироваться, что исказит результаты испытаний.

Испытания по Роквеллу (ГОСТ 9013-59). Проводятся путем вдавливания в металл алмазного конуса с углом при вершине 120° или стального шарика ($D=1,588$ мм или $1/16''$, рис. 7,б). Прибор Роквелла имеет три шкалы – *B*, *C* и *A*. Алмазный конус применяют для испытания твердых материалов (шкалы *C* и *A*), а шарик – для испытания мягких материалов (шкала *B*). Конус и шарик вдавливают двумя последовательными нагрузками: предварительной P_0 и общей P :

$$P = P_0 + P_1; \quad (17)$$

где P_1 – основная нагрузка.

Предварительная нагрузка $P_0 = 100$ Н (10 кгс). Основная нагрузка составляет 900 Н (90 кгс) для шкалы *B*; 1400 Н (140 кгс) для шкалы *C* и 500 Н (50 кгс) для шкалы *A*.

Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу твердости принимают величину, которая соответствует осевому перемещению наконечника на расстояние 0,002 мм.

В зависимости от шкалы твердость по Роквеллу обозначают *HRB*, *HRA*, *HRC*.

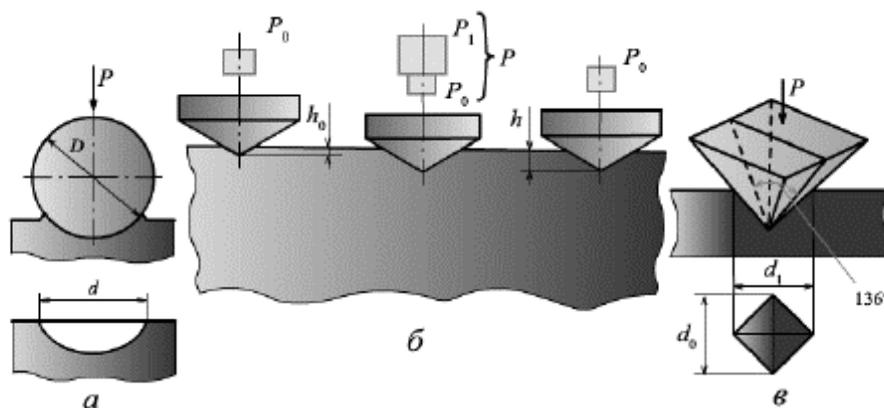


Рис. 7. Схема определения твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Испытания по Виккерсу (ГОСТ 2999-75). В основе метода – вдавливание в испытываемую поверхность (шлифованную или даже полированную) четырехгранной алмазной пирамиды ($\alpha = 136^\circ$) (рис. 7, в). Метод используется для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость.

Твердость по Виккерсу:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} 10^{-6}, \text{ МПа}; \quad (18)$$

где P – нагрузка на пирамиду, Н; d – среднее арифметические двух диагоналей отпечатка, измеренных после снятия нагрузки, м.

Число твердости по Виккерсу определяют по специальным таблицам по диагонали отпечатка d . При измерении твердости применяют нагрузку от 10 до 500 Н.

Микротвердость (ГОСТ 9450-76). Принцип определения микротвердости такой же, как и по Виккерсу, согласно соотношению:

$$H = 1,854 \frac{P}{d^2} 10^{-6}; \quad (19)$$

Метод применяется для определения микротвердости изделий мелких размеров и отдельных составляющих сплавов. Прибор для измерения микротвердости – это механизм вдавливания алмазной пирамиды и металлографический микроскоп. Образцы для измерений должны быть подготовлены так же тщательно, как микрошлифы.

1.3.2. Основные виды технологических проб металлов

Технологическими пробами называются испытания металлов, выполняемые несложными способами и без тщательного измерения наблюдаемых свойств.

Такие испытания имеют целью выявить способность металла к тем или иным деформациям, которым он подвергается при работе или при обработке в холодном или горячем состоянии.

Качество металла по технологическим пробам определяется по внешнему виду после испытания (отсутствие надрывов, трещин, расслоения или излома свидетельствует о том, что металл выдержал пробу).

Некоторые технологические пробы стандартизованы, т.е. испытания производятся по определенным правилам. Этими правилами установлены размеры и формы образцов испытываемых металлов, инструментов и приспособлений для выполнения пробы.

Проба на загиб служит для определения способности металла (листов, прутков, различных профилей и т.д.) принимать заданный по размерам и форме загиб без надрывов и трещин.

Проба на загиб применяется для пластических металлов при толщине не более 30мм и производится в нагретом или холодном состоянии.

Различают загиб на определенный угол до параллельности загнутых сторон или до соприкосновения сторон (рис. 8). Вид загиба должен быть оговорен в технических условиях.

Для проведения пробы на загиб применяют специальные машины, прессы, тиски с закругленными губками. Образцы, выдержавшие пробу, не должны иметь после загиба надлома, надрывов или трещин.

Проба на перегиб служит для определения способности металла выдерживать повторный загиб и разгиб и применяется при испытании качества полосового и листового материала длиной 100–150 мм, шириной до 20 мм и толщиной до 5 мм, а также проволоки и прутков диаметром от 0,8 до 7 мм.

Проба проводится только в холодном состоянии. Проба состоит в загибе и разгибе образца в плоскости, перпендикулярной линии взаимного касания губок прибора, в котором образец зажимается в вертикальном положении. Загиб образца производится попеременно в правую и левую сторону на 90° с равномерной скоростью не более 60 перегибов в минуту до определенного числа перегибов, указанного в технических условиях.

Проба на перегиб имеет важное значение для оценки способности к деформированию проволоки, при испытании которой на разрыв невозможно определить это свойство.

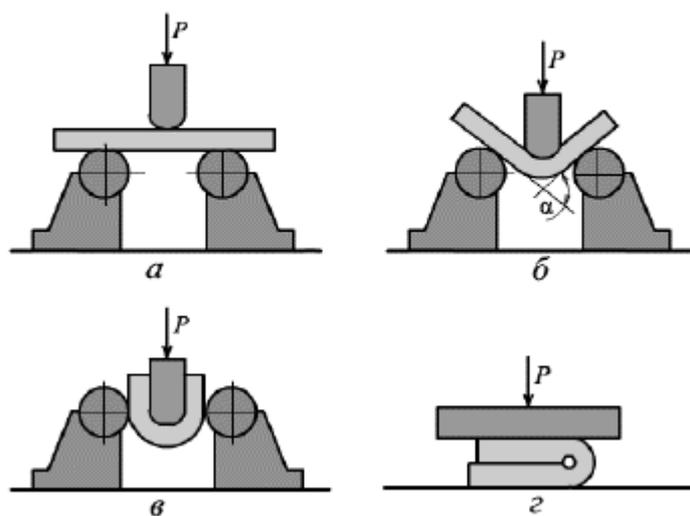


Рис. 8. Технологическая проба на изгиб: а – образец до испытания; б – загиб до определенного угла; в – загиб до параллельности сторон; г – загиб до соприкосновения сторон

Проба на навивание проволоки (рис. 9) позволяет определить способность проволоки диаметром $d < 6$ мм принимать заданную форму. Кусок проволоки навивают на круглый стержень (оправку) 5–10 витками. Качество проволоки определяется способностью выдерживать без повреждений навивание плотно прилегающими витками на стержень и развивание в холодном состоянии. Чем пластичнее проволока, тем плотнее будет ее прилегание к стержню.

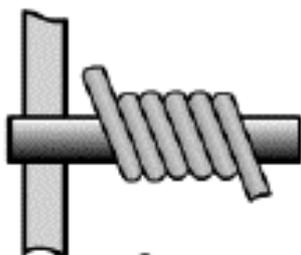


Рис. 9. Технологическая проба на навивание проволоки

Проба труб на сплющивание производится для определения качества труб по их свойству сплющиваться без повреждений под давлением прессы, молота или от ударов молотка до предела, установленного техническими условиями. Длина образца выбирается равной диаметру трубы. В зависимости от технических условий испытание может производиться в холодном и горячем состоянии. Признаком того, что образец выдержал испытание, служит отсутствие в нем после сплющивания трещин или надрывов.

Проба труб на изгиб применяется для определения способности образца трубы загибаться без повреждений. Испытание состоит в том, что заполненную сухим чистым речным песком трубу изгибают вокруг оправки на угол 90° . После загиба труба не должна иметь надрывов, трещин, отслоений и других дефектов. Диаметр оправки определяется техническими требованиями.

Проба труб на бортование имеет целью установить способность их подвергаться деформациям.

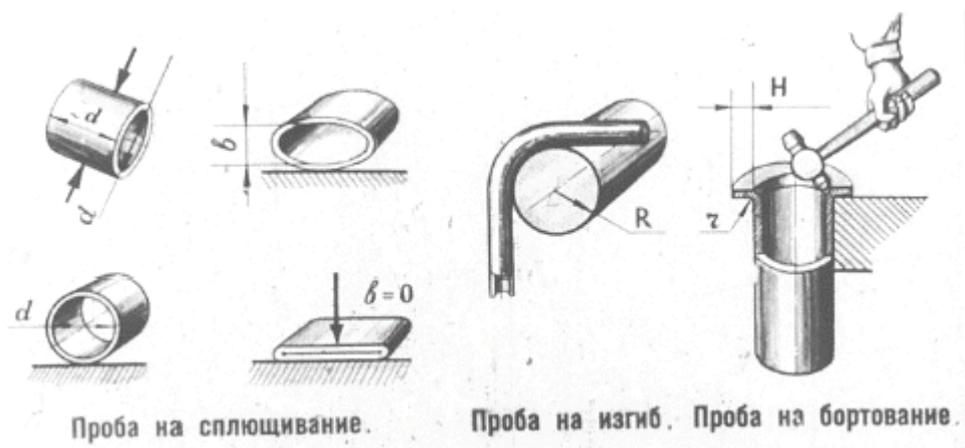


Рис. 10. Технологическая проба труб

Проба на выдавливание (рис. 11) – для определения способности металла к холодной штамповке и вытягиванию тонкого листового материала. Состоит в продавливании пуансоном листового материала, зажатого между матрицей и зажимом. Характеристикой пластичности металла является глубина выдавливания ямки, что соответствует появлению первой трещины.

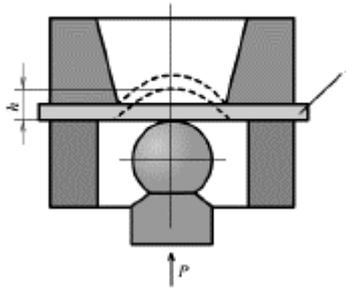


Рис. 11. Испытание на выдавливание: 1 – лист;
 h – мера способности материала к вытяжке

Проба на искру используется при необходимости определения марки стали при отсутствии специального оборудования и маркировки.

Основана эта проба на том, что при обработке стали абразивными кругами образуется мелкая стружка, которая, сгорая в воздухе, дает сноп искр, отличающихся друг от друга по форме и цвету (рис. 12). Чем больше в стали содержится углерода, тем больше в ее искрах светлых звездочек. Присутствие в стали вольфрама можно установить по красному цвету искр, наличие хрома – по оранжевому и т. д. Таким образом, при известном навыке, проба на искру позволяет приблизительно судить о химическом составе стали. Более точно химический состав стали определяют в специальных заводских лабораториях.

Марганцовистая сталь с содержанием 10 – 14% Mn дает тонкие и длинные светло-желтые линии с крупными звездочками (г), быстрорежущие стали - небольшой пучок искр темно-красного цвета, почти без звездочек (а). Кремнистые стали дают линии с крупными редкими звездочками (б), хромистые стали - искры соломенно-желтого оттенка, прерывистыми линиями, с мелкими частыми звездочками (д).

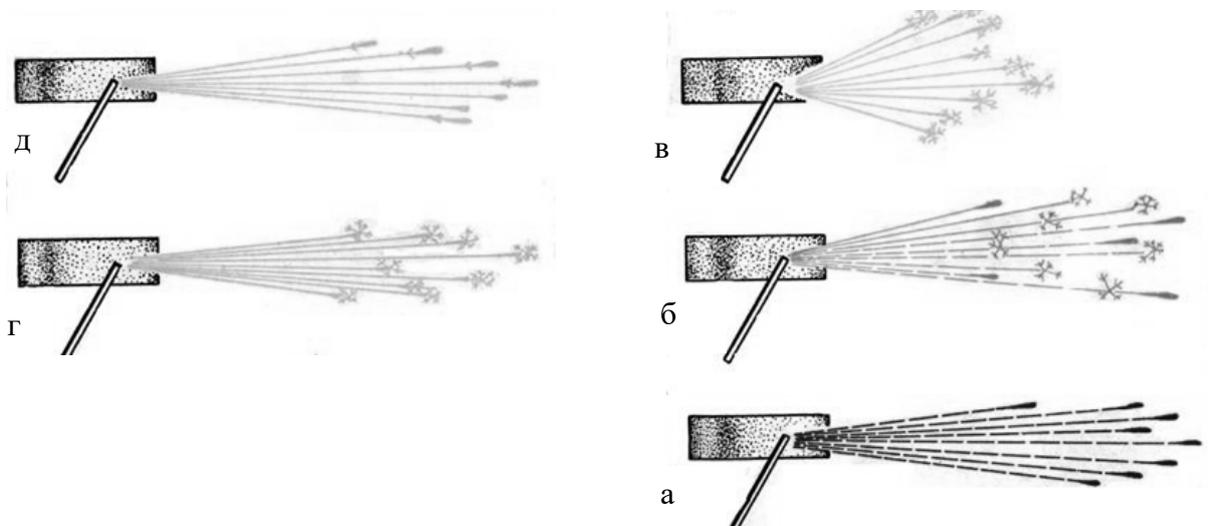


Рис. 12. Виды искр стали: а – низкоуглеродистая; б – среднеуглеродистая; в – высокоуглеродистая инструментальная; г – быстрорежущая; д – марганцовистая

1.4. Методы неразрушающего контроля

Неразрушающий контроль (в переводе с английского - NDT nondestructive testing) - это проверка, контроль, оценка надежности параметров и свойств конструкций, оборудования либо отдельных узлов, без вывода из строя (эксплуатации) всего объекта. Основным отличием, и безусловным преимуществом, неразрушающего контроля (НК) от других видов диагностики является возможность оценить параметры и рабочие свойства объекта, используя способы контроля, которые не предусматривают остановку работы всей системы, демонтажа, вырезки образцов. Исследование проводится непосредственно в условиях эксплуатации. Это позволяет частично исключить материальные и временные затраты, повысить надежность контролируемого объекта.

Благодаря неразрушающему контролю выявляются опасные и мелкие дефекты: заводские браки, внутренние напряжения, трещины, микропоры, пустоты, расслоения, включения и многие другие, вызванные, в том числе, процессами коррозии.

Эффективность НК определяется большим числом факторов, главными из которых являются *выявляемость дефектов, производительность, оперативность, безопасность и стоимость.*

Визуальные и капиллярные методы контроля изделий из ферромагнитных материалов позволяют обнаруживать дефекты только на поверхности изделия. Магнитными и токовихревыми методами можно обнаружить как поверхностные, так и подповерхностные дефекты. Радиационными и акустическими методами можно обнаружить поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты.

С точки зрения опасности для обслуживающего персонала выделяются радиационные методы. Определённой токсичностью обладают методы капиллярные и течеисканием при использовании определённых типов пробных веществ и ультрафиолетовых осветителей. Остальные методы НК не оказывают заметного влияния на здоровье обслуживающего персонала.

Классификация методов НК по признакам:

- первичным информативным параметрам;
- характеру взаимодействия с контролируемым (исследуемым) объектом;
- методу получения первоначальной информации.

Возможно использование нескольких методов неразрушающего контроля, которые классифицируются по нескольким признакам.

Акустические методы

Основаны на регистрации параметров упругих колебаний, возбужденных в контролируемом объекте. Применяются для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов (нарушений сплошности, неоднородности структуры, межкристаллитной коррозии, дефектов склейки, пайки, сварки и т. д.) в заготовках и изделиях, изготовленных из различных материалов. Они позволяют измерять геометрические параметры при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства металлов и металлоизделий без их разрушения.

К акустическим методам относятся методы звукового (импедансный, свободных колебаний и др.) и ультразвукового (эхоимпульсный, резонансный, теневой, эмиссионный, велосиметрический и др.) диапазонов.

Магнитные методы

Основаны на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами или магнитных свойств контролируемого объекта. Применяют для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов в деталях и полуфабрикатах различной формы, изготовленных из ферромагнитных материалов. К ним относятся магнитно-порошковый, магнитно-графический, феррозондовый, магнитно-индукционный и другие методы.

Магнитные поля рассеяния над дефектами регистрируются в магнитно-порошковом методе с помощью ферромагнитного порошка или суспензии, в магнитно-графическом – с помощью ферромагнитной ленты и в феррозондовом – с помощью чувствительных к магнитным полям феррозондов.

Магнитно-порошковый метод нашел широкое применение на заводах промышленности, ремонтных предприятиях и эксплуатирующих подразделениях. С его помощью надежно выявляют поверхностные трещины, микротрещины, волосовины, флокены и другие дефекты.

Магнитно-графический метод наибольшее применение получил для контроля сварных соединений. Он позволяет выявлять трещины, непровары, шлаковые и газовые включения и другие дефекты в стыковых сварных швах.

Феррозондовый метод применяют для обнаружения тех же дефектов, что и магнитно-порошковым методом, а также дефектов, расположенных на глубине до 20 мм. С его помощью измеряют толщину листов и стенок сосудов при двухстороннем доступе.

Оптические методы

Основаны на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом. Они предназначены для обнаружения различных поверхностных дефектов материала деталей, скрытых дефектов агрегатов, контроля закрытых конструкций, труднодоступных мест машин и силовых установок (при наличии каналов для доступа оптических приборов к контролируемым объектам). Регистрация поверхностных дефектов осуществляется с помощью оптических устройств, создающих полное изображение проверяемой зоны. Достоинства этих методов – простота контроля, несложное оборудование и сравнительно небольшая трудоемкость. Поэтому их применяют на различных стадиях изготовления деталей и элементов конструкций, в процессе регламентных работ и осмотров, проводимых при эксплуатации техники, а также при ее ремонте.

Так как контроль с помощью оптических приборов обладает невысокой чувствительностью и достоверностью, то его применяют для поиска достаточно крупных поверхностных трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, открытых раковин, пор, для обнаружения течей, загрязнений, наличия посторонних предметов и т. д.

Методы контроля проникающими веществами

К ним относятся капиллярные методы и методы течеискания.

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного рисунка.

При контроле этими методами на очищенную поверхность детали наносят проникающую жидкость, которая заполняет полости поверхностных дефектов. Затем жидкость удаляют, а оставшуюся в полостях дефектов часть обнаруживают путем нанесения проявителя, который адсорбирует жидкость, образуя индикаторный рисунок. Эти методы применяют в цеховых, лабораторных и полевых условиях, при положительных и отрицательных температурах. Они позволяют обнаруживать дефекты производственно-технологического и эксплуатационного происхождения: трещины шлифовочные, термические, усталостные, волосовины, закаты и др. Капиллярные методы могут быть применены для обнаружения дефектов в деталях из металлов и неметаллов простой и сложной формы.

Благодаря высокой чувствительности, простоте контроля и наглядности результатов эти методы применяют не только для обнаружения, но и для подтверждения дефектов, выявленных другими методами дефектоскопии – ультразвуковым, магнитным, вихревых токов и др.

Наиболее распространенными капиллярными методами являются цветной, люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующихся частиц, радиоактивных жидкостей и др. Регистрация поверхностных дефектов осуществляется с помощью оптических устройств, создающих полное изображение проверяемой зоны. Достоинства этих методов – простота контроля, несложное оборудование и сравнительно небольшая трудоемкость. Поэтому их применяют на различных стадиях изготовления деталей и элементов конструкций, в процессе регламентных работ и осмотров, проводимых при эксплуатации техники, а также при ее ремонте.

Так как контроль с помощью оптических приборов обладает невысокой чувствительностью и достоверностью, то его применяют для поиска достаточно крупных поверхностных трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, открытых раковин, пор, для обнаружения течей, загрязнений, наличия посторонних предметов и т. д.

Тепловые методы

Основаны на регистрации тепловых полей, температуры или теплового контраста контролируемого объекта. Их применяют для измерения температур, получения информации о тепловом режиме объекта, определения и анализа температурных полей, дефектов типа нарушения сплошности (расслоения, трещины и т.п.), выявления дефектов пайки многослойных соединений из металлов и неметаллов, склейки металл – металл, металл – неметалл и т. п. Контроль осуществляется с помощью термометров, термоиндикаторов, пирометров, инфракрасных микроскопов и радиометров и т. д.

Эти методы также пока применяют ограниченно, в основном в приборостроении для контроля радиоэлектронной аппаратуры. В пленочных проводниках и резисторах выявляют микротрещины, утонения, плохую адгезию, плохой контакт; в микросхемах – плохой контакт, нарушения теплового контакта, ко-

роткие замыкания, перегрев; в пленочных конденсаторах – токи утечки; в микродиодах и микротранзисторах – перегрев, неудовлетворительные контакты.

Электрические методы

Основаны на регистрации электростатических полей и электрических параметров контролируемого объекта. Их применяют для выявления раковин и других дефектов в отливках, расслоений в металлических листах, различных дефектов в сварных и паяных швах, трещин в металлических изделиях, растрескиваний в эмалевых покрытиях и органическом стекле и т. д. Кроме того, эти методы применяют для сортировки деталей, измерения толщин пленочных покрытий, проверки химического состава и определения степени термообработки металлических изделий. Наиболее распространенными из этих методов являются измерение электрического сопротивления, трибоэлектрический, термоэлектрический и др.

Электромагнитный (вихревых токов) метод

Основан на регистрации изменения взаимодействия собственного электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этой катушкой в контролируемом объекте. Применяется для обнаружения поверхностных дефектов в магнитных и немагнитных деталях и полуфабрикатах. Метод позволяет выявлять нарушения сплошности, в основном трещин, на различных по конфигурации деталях, в том числе имеющих покрытия. На основе метода вихревых токов разработаны приборы для измерения толщины листов и покрытий, диаметра проволоки и прутков. Применяют на заводах и ремонтных предприятиях. В условиях эксплуатации применяют для профилактического контроля лопаток турбин газотурбинных двигателей, сварных и литых узлов элементов конструкций и др.

Приведенный краткий обзор позволяет сделать вывод, что для контроля металлов и металлоизделий имеется достаточный арсенал методов и средств неразрушающего контроля.

Следует отметить, что методы НК не являются универсальными. Каждый из них может быть использован наиболее эффективно для обнаружения определенных дефектов. Так, например, с помощью радиационных методов можно выявлять внутренние дефекты в виде пустот и пор в деталях, изготовленных из различных материалов, однако нельзя обнаружить весьма опасные тонкие усталостные трещины. Для этой цели требуется применить другой, чувствительный к поверхностным трещинам метод, например капиллярный, магнитный или вихревых токов. Поэтому для контроля деталей ответственного назначения применяют два или несколько различных методов.

Применение комплексного контроля изделий в условиях производства и эксплуатации позволит повысить качество и надежность техники. Систематическое проведение НК на различных этапах технологического процесса и статистическая обработка результатов этих испытаний позволят устанавливать и устранять причины брака. При этом контроль становится активным методом корректировки технологического процесса.

Сегодня не существует одного универсального метода, который позволял бы измерить все свойства металлического изделия разом. Поэтому методы кон-

троля качества применяются в комплексе: на стадиях разработки и изготовления – разрушающие, в процессе эксплуатации – различные неразрушающие. Выбор конкретного способа контроля зависит не только от специфики и назначения металлической конструкции, но и от многочисленных внешних факторов, которые непременно учитываются специалистами.

1.4.1. Эффективность неразрушающего метрологического контроля

Эффективность НМК определяется большим числом факторов, главными из которых являются выявляемость дефектов, производительность, оперативность, безопасность и стоимость.

Визуальные и капиллярные методы контроля изделий из ферромагнитных материалов позволяют обнаруживать дефекты только на поверхности изделия. Магнитными и токовихревыми методами можно обнаружить как поверхностные, так и подповерхностные дефекты. Радиационными и акустическими методами можно обнаружить поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты. В табл. 1 приведены примерные оценки различных методов контроля по выявляемости дефектов в изделиях из различных материалов различного назначения.

С точки зрения опасности для обслуживающего персонала выделяются радиационные методы. Определённой токсичностью обладают методы капиллярные и течеисканием при использовании определённых типов пробных веществ и ультрафиолетовых осветителей. Остальные методы НК не оказывают заметного влияния на здоровье обслуживающего персонала.

С точки зрения автоматизации контроля наиболее благоприятны методы вихревого тока, магнитные методы с феррозондовыми, индукционными и подобными типами преобразователей, радиационный и некоторые виды тепловых методов.

Главные преимущества этих методов заключаются в отсутствии прямого контакта преобразователя с изделием и в предоставлении информации о дефектах в виде показаний приборов.

Ультразвуковой метод с этой точки зрения требует контакта преобразователя с изделием, например, через слой воды. Трудность автоматизации других методов контроля заключается в необходимости визуальной обработки информации о дефектах.

Таблица 1

Оценка выявляемых дефектов различными видами НМК

Объект контроля	Вид НМК							
	Радиационный	Акустический	Токовихревой	Магнитный	Капиллярный	Тепловой	Оптический	Радиоволновой
Неферромагнитные материалы								
Проволока диаметром, мм								
0,01-1	0	5	5	0	0	3	4	0
1-24	4	5	5	0	0	0	4	0
Прутки диаметром, мм								
3-40	5	5	5	0	0	0	4	0
30-100	5	5	5	0	0	0	4	0
156-1000	5	5	5	0	0	0	4	0
Листы, плиты толщиной, мм								
0,1-1	4	5	5	0	4	3	4	3
0,1-3,9	5	5	5	0	4	0	4	0
4-10	5	5	5	0	4	0	4	0
Сортовой прокат	5	5	4	0	4	0	4	0
Отливки	5	4	0	0	5	3	4	0
Ферромагнитные материалы								
Проволока	4	5	5	5	0	3	4	0
Прутки диаметром, мм								
3-4	5	5	5	5	0	0	4	0
3-10	5	5	5	5	0	0	4	0
Трубы сварные диаметром, мм								
30-40	4	5	5	5	4	0	4	0
50-150	3	5	5	5	4	0	4	0
150-1000	4	5	5	5	4	0	4	0
Листы, плиты толщиной, мм								
0,1-1	3	5	5	5	4	3	4	3
0,1-3,9	3	5	5	5	4	0	4	0
4-10	3	5	4	4	4	0	4	0
Сортовой прокат	3	5	3	3	4	0	4	0
Отливки	3	4	3	3	4	0	4	0
Диэлектрики								
Резина	5	4	0	0	4	0	4	5
Керамика, металло-керамика	5	4	0	0	4	3	4	5
Бетон, железобетон	3	5	0	0	4	0	4	5
Монокристаллы	3	4	0	0	0	5	4	5
Много-слойные материалы	4	5	0	0	0	3	0	5
Стекло	3	4	0	0	0	3	5	3

Объект контроля	Вид НМК							
	Радиационный	Акустический	Токовихревой	Магнитный	Капиллярный	Тепловой	Оптический	Радиоволновой
Стеклопластики	3	4	0	0	5	5	5	5
Соединения								
Сварные	3	5	3	3	4	3	0	0
Клеевые	3	5	0	0	4	4	4	5
Паяные	3	5	3	0	3	3	0	0
Резьбовые	0	0	3	5	4	0	0	0
Детали и изделия								
Много-слойные конструкции из стеклопластика	3	4	3	0	0	3	0	4
Радиоэлектронные схемы и детали	3	0	0	0	0	5	3	4
Электровакуумные приборы	4	0	0	0	0	3	3	3

По стоимости выполнения контроля к наиболее дорогим относятся методы радиографические и течеискания. Это связано с длительностью операций контроля, а также с необходимостью капитальных затрат на помещения и оборудование. Если сравнивать, например, затраты на проведение радиационного и ультразвукового контроля сварных соединений толщиной 10-20 мм, то для ультразвукового контроля они будут в 3-5 раз меньше, чем для радиационного. Это преимущество возрастает с увеличением толщины сварных соединений.

В табл. 2 приведены краткие сведения о возможностях, достоинствах и недостатках основных НМК сплошности металлов.

При этом в табл. 2 приведены не принципиальные возможности методов, а лишь те из них, которые могут быть реализованы с помощью серийной аппаратуры и имеют техническую документацию. В столбце 4 для ультразвукового контроля даны измеряемые параметры дефектов. В столбце 5 для поверхностных методов даны требования к чистоте контролируемой поверхности, при которых могут быть выявлены дефекты, указанные в столбце 4 для соответствующего метода. При более грубых поверхностях чувствительность методов снижается.

Применяемость НМК при выпуске металлоизделий

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Акустический контроль	Слитки и фасонные отливки	Внутренние трещины, раковины, неметаллические включения, флокеноподобные дефекты	Эквивалентная площадь дефекта ≥ 5 мм ²	Простая форма, мелкозернистая структура, обработка поверхности Rz10	Выявление дефектов с малым раскрытием, характерных для деформированного металла	Необходимость создания акустического контакта через жидкую среду и ограничения по частоте обработки поверхности
	Поковки, штамповки, сортовой прокат толщиной ≥ 10 мм	Внутренние трещины, расслоения, флокены, неметаллические включения, а также поверхностные закаты, включения	Эквивалентная площадь дефекта ≥ 3 мм ²	Простая форма, обработка поверхности Rz10	Возможность контроля больших толщин (до 2-5 м)	Малая чувствительность при контроле крупнозернистых материалов и сварных соединений из аустенитных сталей
	Листовой прокат толщиной $\geq 0,5$ мм	Внутренние расслоения и другие дефекты, ориентированные в плоскости прокатки	Эквивалентная площадь дефекта ≥ 1 мм ²	Очистка поверхности от грязи, отслоившейся окалины	Высокая производительность и малая стоимость контроля	Отсутствие наглядности и сложность в расшифровке результатов контроля
	Трубы диаметром ≥ 4 мм и толщиной ≥ 1 мм	Внутренние и поверхностные трещины, риски, закаты, включения	Эквивалентная площадь дефекта $\geq 3\%$ от толщины стенки трубы			
	Сварные соединения, стыковые, тавровые, угловые толщиной ≥ 6 мм	Внутренние трещины, непровары, газовые поры, включения	Эквивалентная площадь дефекта ≥ 3 мм ²	Мелкозернистая структура наплавленного металла	Возможность автоматизации (при простой геометрической форме изделий)	

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Радиографический контроль	Сварные и резьбовые соединения	Непровары, трещины, поры, шлаковые включения	Локальные дефекты, размером $\geq 1,5-2\%$ от контролируемой толщины	Двухсторонний доступ, отсутствие наружных дефектов, превышающих чувствительность контроля	Высокая чувствительность контроля. Наглядность результатов. Наличие документа о контроле.	Радиационная опасность. Большая длительность технологического контроля. Высокий расход материалов.
	Литые изделия	Трещины, рыхлости, пористости	Локальные дефекты, размером $\geq 2-4\%$ от контролируемой толщины			
Магнитный	Металлические изделия, полуфабрикаты и сварные соединения	Поверхностные и подповерхностные (на глубине до 2-3 мм) трещины, волосовины, закаты, включения, непровары	Раскрытие дефекта ≥ 2 мм, глубина ≥ 20 мкм, протяженность $\geq 0,5$ мм	Ферромагнитные металлы, чистота обработки поверхности $R_z 2,5$	Простота и наглядность контроля. Возможность применения метода для изделий любой формы.	Загрязнение поверхности. Необходимость размагничивания изделий после контроля. Возможность образования прижогов на поверхности.
Токовой	Металлические изделия и полуфабрикаты		Ширина дефектов $\geq 0,5$ мкм, глубина $\geq 100-200$ мм, протяженность $\geq 0,5 - 1$ мм	Чистота обработки поверхности $R_z 2,5$	Бесконтактное возбуждение вихревых токов. Возможность автоматизации при больших скоростях.	Трудность выделения полезного сигнала на фоне помех. Отсутствие наглядности результатов контроля.

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Капиллярный	Металлические изделия, полуфабрикаты и сварные соединения	Поверхностные открытые трещины, поры, коррозионные поражения	Раскрытие дефекта ≥ 1 мкм, протяженность $\geq 3-5$ мм	Чистота обработки поверхности R _Z 2,5	Простота и наглядность контроля. Возможность контроля изделий разной формы.	Необходимость удаления защитных покрытий, смазок, окислины.
Тчейскание	Конструкции и изделия энергетических узлов	Сквозные дефекты в сварных соединениях и основном металле	Дефекты дающие натекание $> 6,7 = 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$	Изделия, которые могут быть помещены в вакуумную камеру.	Большой арсенал способов контроля различных классов изделий	Необходимость сушки изделий до $150-400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ или применение различных индикаторных составов.

Часто необходимо контролировать изделие двумя или более методами: обычно сочетают методы, способные обнаруживать внутренние и поверхностные дефекты (акустический и магнитный контроль; магнитопорошковый метод контроля, акустический и токовихревой контроль и т.д.) или плоские и объёмные дефекты (например, ультразвуковой контроль и радиография).

Комплексная система контроля несколькими методами может строиться на основе 100%-го контроля всего объёма продукции каждым методом или на основе выборочного контроля тем или иным (или всеми) методом контроля. Иногда дополнительный контроль осуществляется только в тех участках, где основной метод не обеспечивает заданных требований, или назначается для повышения информативности.

Приведём несколько примеров применения комплексных систем НК в судостроении. В особо ответственных случаях для повышения надежности выявления дефектов различных типов проводят контроль сварных соединений методами радиационного просвечивания и акустическим. Контроль отливок, как правило, выполняют методом радиационного просвечивания, а акустический метод используют для определения местоположения выявленных дефектов. Контроль гребных винтов предусматривает сочетание акустических методов с поверхностными методами, такими как капиллярный, магнитный и токовихревой.

Контроль поковок, если заготовки не имеют припуска на «мертвую» зону ультразвукового искателя, также использует сочетание акустического и поверхностных методов дефектоскопии.

Для контроля внутренних поверхностей используются токовихревые методы и перископический осмотр (визуально-оптический метод контроля) или перископический осмотр и акустический контроль.

1.5. Контрольные вопросы

1. Перечислите виды и порядок испытаний для определения прочностных характеристик и твердости металлов, их показатели и размерности.
2. Перечислите виды и порядок испытаний для определения характеристик пластичности, ударной вязкости и предела усталости металла.
3. Опишите методы исследования и контроля качества металлов, их сущность и области применения.
4. Назовите основные виды НМК.
5. Перечислите основные недостатки НМК.
6. Назовите основные достоинства разрушающих методов контроля.
7. Назовите методы испытания материалов на твердость.
8. Изложите сущность метода определения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу.
9. Назовите технологические пробы и опишите способы их определения.
10. Определите марку материала по искре.

2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

2.1. Классификация средств измерений по определяющим признакам

В метрологии средства измерений (СИ) принято классифицировать по виду, принципу действия и метрологическому назначению.

Различают следующие виды СИ: меры; измерительные устройства; измерительные установки; измерительные системы.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительное устройство – применяется самостоятельно или в составе измерительных установок и измерительных систем. В зависимости от формы представления сигнала измерительной информации измерительные устройства подразделяются на измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия оператора.

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но непосредственно не воспринимается оператором.

Измерительный прибор и измерительный преобразователь в блок-схеме соответственно подразделяются на четыре подтипа: два первых из них одинаковы, а два других имеют между собой различия.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных СИ (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенных в одном месте.

Обобщенная структурная схема СИ представлена на рис. 13.

Для удобства анализа различных соединений СИ в измерительные устройства или информационно-измерительные системы любое устройство измерения принято рассматривать как некоторый преобразователь, служащий для преобразования входного сигнала X в выходной сигнал Y . Такое представление измерительных устройств позволяет применять при анализе систем хорошо разработанный аппарат теории автоматического регулирования. Если входной и выходной сигналы представляют собой некоторые физические процессы, характеризующиеся несколькими параметрами, то среди них различают информативные и неинформативные. Для конструкторов СИ и приборостроителей чрезвычайно важной является информация о внутренней структуре измерительного устройства. А они состоят из некоторого числа элементов (составных частей), предназначенных для выполнения определенных функций, таких, как:

- преобразование поступающего сигнала по форме или виду энергии;
- успокоение колебаний, защита от помехонесущих полей;

- коммутация электрических цепей, представление информации (цифровая, диаграммная по кругу или в ленту, только показывающая результат без регистрации и т.д.).

К элементам измерительных устройств относятся опоры, направляющие пружины, магниты, контакты, множително-передаточные механизмы и т. д.

Основные элементы структурных схем СИ: меры, компараторы, первичные и вторичные преобразователи, устройства обработки информации, устройства представления и регистрации информации, каналы связи, вспомогательные элементы СИ.

Преобразовательный элемент - элемент СИ, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований измерительных величин.

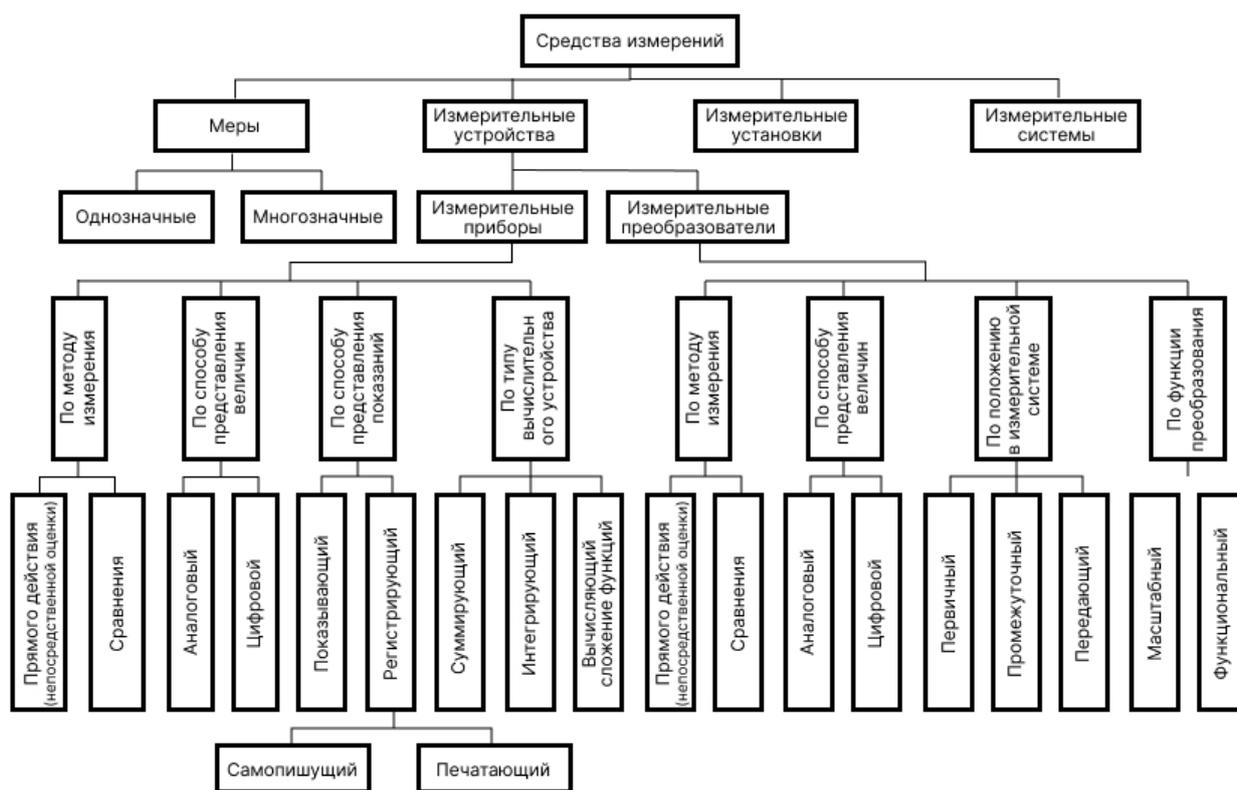


Рис. 13. Структурная схема СИ

Измерительная цепь – совокупность преобразовательных элементов СИ, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации.

Чувствительный элемент – первый в измерительной цепи преобразовательный элемент, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой величины.

Измерительный механизм – часть конструкции СИ, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение.

Отсчетное устройство – часть конструкции СИ, предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины.

Структурная схема измерительного устройства прямого действия представлена на рис. 14.

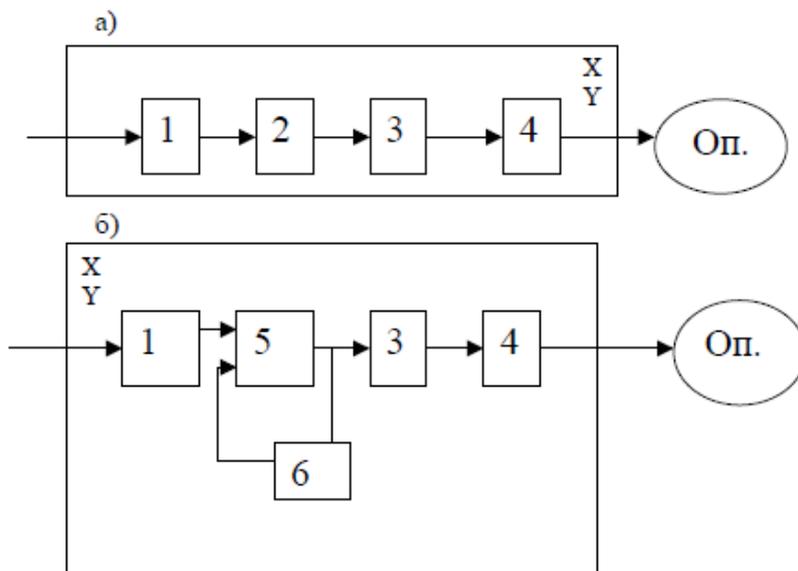


Рис. 14. Структурная схема измерительного устройства действием сравнения

Ниже будут приведены структурные схемы измерительных устройств прямого и уравнивающего действий, но без измерительного механизма и отсчетного устройства, а только сигнального порядка для восприятия электронных средств контроля и управления УВК (управляющим вычислительным комплексом) (рис. 15). Однако на выходе в конечном преобразовательном элементе, формирующем выходной сигнал (усиление по мощности, преобразование по частоте колебаний и т.д.) таким образом, что его можно регистрировать, передавать на расстояние, хранить и обрабатывать в статистическую информацию.

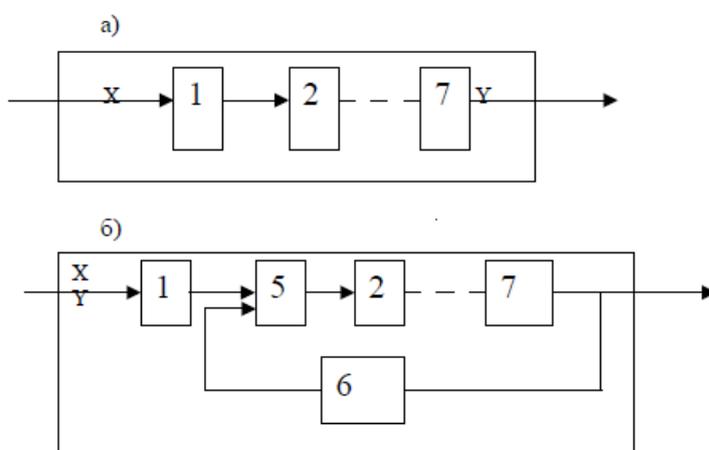


Рис. 15. Структурная схема измерительного устройства прямого и уравнивающего действий без измерительного механизма

Следующим элементом, который необходимо подробнее раскрыть, является отсчетное и регистрирующее устройства, где основным узлом является узел

показания результата. Показанием называют значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в единицах этой величины или отградуированное в шкале этих величин. Отсчетное устройство представляет собой цифровое табло или, в подавляющем большинстве случаев, шкалу с указателем.

Для шкальных, отсчетных устройств принято использовать ряд понятий, сущность большинства из которых легко установить по рис. 16.

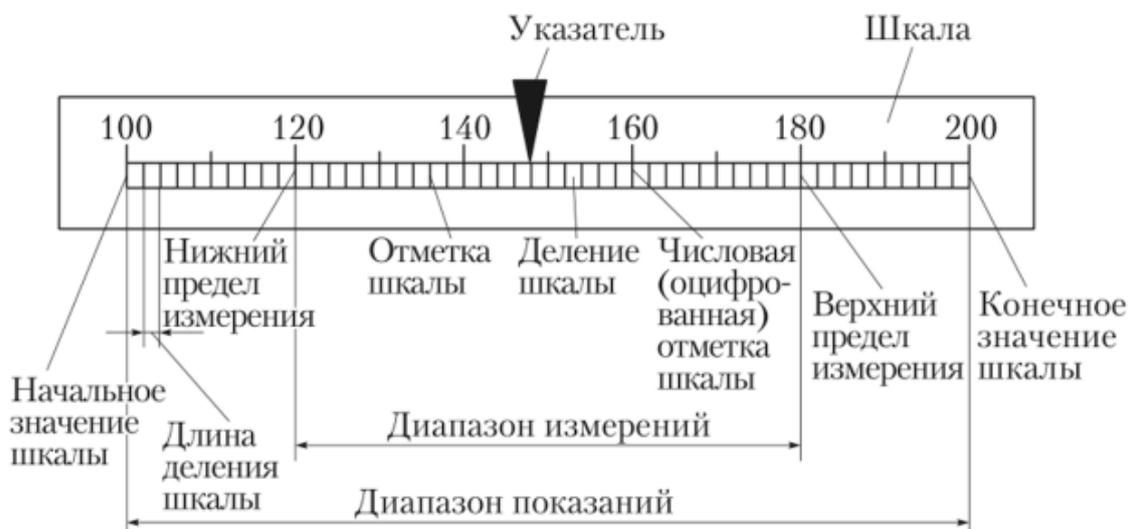


Рис. 16. Схема отсчетного устройства измерительного прибора

2.2. Статические характеристики и параметры измерительных устройств.

В общем случае, когда при измерениях все условия измерения, а также входные и выходные сигналы и наблюдения не изменяются как функция от времени, остаются параметрами постоянными, то такие измерения называют статическими (стационарными или равновесными).

Задачей измерительной техники является создание систем, включающих измерительные приборы и обеспечивающих измерение без участия человека, т.е. систем автоматического контроля. Измерительные приборы классифицируются по ряду признаков:

- 1) по роду измеряемой величины для измерения
 - температуры (термометры, пирометры);
 - давления и разрежения (манометры, вакуумметры, тягонапорометры, барометры и т.п.);
 - количества и расхода вещества, энергии (расходомеры, счетчики);
 - уровня (уровнемеры и сигнализаторы);
 - состава (газоанализаторы, концентратомеры);
- 2) по назначению:
 - технические (рабочие) - измерение технологических и технических параметров;
 - контрольные - поверка технических средств измерения;
 - лабораторные - для применения в экспериментальной технике;
 - образцовые - поверка контрольных измерительных приборов;

- эталонные - поверка образцовых приборов;
- 3) по характеру представления информации и промышленному назначению:
 - показывающие - имеющие только визуальный отсчет результата измерения;
 - регистрирующие - имеющие устройства для регистрации (записи) результата измерения;
 - индикаторные - показывающие только наличие или отсутствие сигнала;
 - обработки информации;
- 4) по дистанционному признаку:
 - местного контроля;
 - дистанционного контроля;
 - телеметрического контроля;
- 5) по характеру регистрации и контроля измеряемого сигнала во времени:
 - непрерывного (аналогового) действия;
 - дискретного действия;
- б) по принципу действия:
 - механические;
 - электрические;
 - гидравлические;
 - пневматические;
 - радиоактивные и т.п.
- 7) по условиям измерения:
 - стационарные;
 - переносные;
- 8) по габаритам:
 - нормальные (полногабаритные);
 - малогабаритные;
 - миниатюрные;
- 9) по числу контролируемых величин:
 - однотоочечные;
 - многотоочечные;
 - многоканальные.

2.3. Контрольные вопросы

1. Что такое СРЕДСТВО измерения?
2. Какие основные свойства средства измерения отличают его от других средств, используемых в науке и технике?
3. Как классифицируют методы измерений по точности?
4. В каких случаях применяют те или иные методы?
5. Перечислите исходные данные при выборе СИ для контроля и измерения параметров?
6. Как оценивают дополнительную погрешность СИ?
7. Что относят к условиям измерений?

8. Что такое измерительная цепь?
9. Какая основная задача измерительной техники?
10. Приведите пример структурной схемы измерительного устройства.

2.4. Тесты по теме

Проверка знаний студентов по данной теме проводится в виде теста.

1. Средство измерений, вырабатывающее сигнал измерительной информации, который можно воспринимать:

- а) мера
- б) эталон
- в) измерительный прибор
- г) измерительная информация
- д) единица измерений

2. Для практических измерений применяются:

- а) рабочие средства измерения
- б) образцовые средства измерения
- в) контрольные средства измерения
- г) эталон
- д) проверочные средства измерения

3. Значение физической величины, идеально отражающее данную величину:

- а) мнимое
- б) настоящее
- в) истинное
- г) правильное
- д) справедливое

4. Информация о значениях, измеряемых величин – это

- а) мера
- б) измерительный прибор
- в) измерительная информация
- г) эталон

5. Для проверки точности других средств измерения применяются:

- а) рабочие средства измерения
- б) образцовые средства измерения
- в) эталон
- г) контрольные средства измерения
- д) проверочные средства измерения

6. Средство измерений для воспроизведения физической величины – это

- а) эталон
- б) мера
- в) измерительный прибор
- г) измерительная информация
- д) единица измерений

7. Стрелочные приборы – это приборы

- а) с непрерывным отсчетом
- б) с дискретным отсчетом
- в) с графическим изображением
- г) ваш вариант
- д) показывающие изменение величины во времени

3. КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1. Понятие о температуре и температурных шкалах.

Классификация методов и приборов для измерения температуры

Одним из основных параметров, определяющих ход металлургических процессов, является температура. Работа печных агрегатов характеризуется температурой металла, шлака, топлива, защитной атмосферы, дымовых газов, кладки, а также других сред и элементов рабочего пространства. От точного и надежного измерения данной величины в значительной мере зависит эффективность функционирования АСУ ТП. Многообразие задач предопределило появление большого числа различных методов и средств контроля температуры.

Тепловое состояние тела (степень его нагретости) определяется средней кинетической энергией поступательного движения молекул данного тела. Следовательно, и температура, характеризующая тепловое состояние физического объекта, является статической величиной, поэтому ее измерение имеет смысл только в телах, состоящих из достаточно большого числа молекул.

Разный уровень температур двух тел, находящихся в контакте, определяет направление теплопередачи: тело с более высокой температурой отдает свою внутреннюю энергию телу с более низкой температурой до тех пор, пока их температуры не станут равными.

Таким образом, температура тела – параметр состояния, который определяет направление передачи тепловой энергии. Измерить температуру непосредственно, как плотность или линейные размеры, невозможно, поэтому температуру определяют косвенно, по изменению физических свойств различных тел. Получивших название термометрических, например, объемное расширение, изменение электрических свойств: электрической проводимости, термоэлектродвижущей силы (т.э.д.с.) и т.п.

Для определения изменяющегося уровня теплового состояния необходимо иметь непрерывный ряд значений выбранного свойства термометрического вещества. т.е. температурную шкалу, под которой таким образом понимается непрерывная совокупность чисел, линейно связанных с числовыми значениями данного достаточно точно измеряемого физического свойства, являющегося однозначной и монотонной функцией температуры.

Для построения известных температурных шкал обычно используют две постоянные реперные точки t_1 и t_2 , в качестве которых выбирают температуры фазового равновесия однокомпонентных систем.

Данным точкам присваивают произвольные числовые значения и предполагают, что термометрическое свойство E , используемого в термометре вещества линейно изменяется с температурой t

$$t = kE + D; \quad (20)$$

где k – коэффициент пропорциональности; D – постоянная.

Для определения температур вычисляют постоянные k и D , строят условную температурную шкалу.

На этом принципе основаны шкалы Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$), Реомюра ($^{\circ}\text{R}$) и Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), появившиеся в XIX в. В них за опорные (реперные) точки принимались температуры замерзания и кипения воды. Температура замерзания воды принимается за 0°R , 0°C и 33°F , точка ее кипения – 80°R , 100°C и 212°F (в шкале Фаренгейта имеется еще одна реперная точка, равная 100°F – это температура тела здорового человека). Однако указанные температурные интервалы разбивались на различное количество одинаковых частей - градусов.

В научно-технической и производственной практике существует значительное число разнообразных устройств для измерения температуры твердых, жидких и газообразных веществ, использующих различные термометрические свойства и носящих название термометр. **Термометр – это прибор, применяемый для измерения температуры путем преобразования ее в показания или сигнал измерительной информации, являющийся известной функцией температуры.** Часть термометра, преобразующая тепловую энергию в другой вид энергии, называется чувствительным элементом.

Известные приборы для контроля температуры можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные (табл. 3). Первые отличаются тем, что у них чувствительный элемент термометра приводится в непосредственное соприкосновение с измеряемой средой.

Таблица 3

Пределы применения термометров для измерения температуры в промышленных условиях

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы длительного применения, $^{\circ}\text{C}$	
		Нижний	Верхний
Контактный метод измерения			
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	-200	650
	Дилатометрические и биметаллические термометры	-60	1000
Изменение давления	Манометрические термометры	-200	600
Изменение электрического сопротивления	Электрические термометры сопротивления (терморезисторы)	-260	1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления	-100	300
Термоэлектрический эффект (т.э.д.с)	Стандартные термоэлектрические термометры	-200	2500
	Нестандартные термометры термоэлектрические	-200	3000
Бесконтактные методы измерения			
Тепловое излучение	Пирометры спектрального отношения	300	4000
	Радиационные пирометры	30	2500
	Пирометры частичного излучения		
	Фотоэлектрические пирометры	450	4000
	Оптические пирометры	800	6000

3.2. Термометры расширения

Стеклянные жидкостные термометры. Для измерения температуры в лабораторных условиях и промышленной практике широко применяют стеклянные жидкостные термометры, являющиеся самым старым видом термометров. Их характеризуют достаточно высокая точность, невысокая стоимость, простота эксплуатации.

Принцип действия термометра основан на зависимости между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в стеклянной оболочке. Зафиксировать изменение положения верхней границы столбика жидкости возможно вследствие разности температурных коэффициентов объемного расширения жидкости и стекла. Из-за увеличения объема резервуара видимое изменение объема жидкости ниже действительного.

Наиболее широко в качестве термометрической жидкости используется ртуть. Применяют также органические заполнители: толуол, этиловый спирт, керосин, пентан и др.

Наибольшее распространение получали термометры с ртутным заполнением, так как ртуть находится в жидком состоянии в широком диапазоне температур (верхний предел может быть доведен до 1200°C с помощью увеличения давления в капилляре и применения для его изготовления плавленого кварца): не смачивает стекла, что позволяет использовать капилляры с небольшим диаметром канала (до 0,1 мм) и обеспечить высокую точность измерения (ртутные образцовые термометры 1-го разряда имеют доверительную погрешность $\epsilon = 2 \cdot 7 = 0,002 - 0,2^{\circ}\text{C}$). Ртуть имеет в 6-8 раз меньший температурный коэффициент объемного расширения, чем другие заполнители. Это снижает чувствительность ртутных термометров. Однако для термометров, градуированных при неполном погружении, погрешности из-за выступающего столбика будут в 6-8 раз меньше, чем у нертутных (при прочих равных условиях измерения).

Органические заполнители характеризуются более низкой температурой применения, меньшей стоимостью и вредностью в эксплуатации и производстве. Вследствие смачивания стекла, термометры с органическими термометрическими жидкостями имеют меньшую точность отсчета.

Стеклянные жидкостные термометры конструктивно делятся на два основных типа: палочные и со вложенной шкалой.

Стеклянные термометры в зависимости от назначения и области использования подразделяются на: образцовые, лабораторные, технические, бытовые, метеорологические, термометры для сельского хозяйства. Лабораторные термометры обеспечивают контроль в интервале температур $0 - 500^{\circ}\text{C}$, серый разбит на 4 поддиапазона, что позволяет получать погрешность измерений (с учетом введения поправок), не превышающую $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ($0 - 60^{\circ}\text{C}$), $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$ ($55 - 155^{\circ}\text{C}$), $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ ($140 - 300^{\circ}\text{C}$) и $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ($300 - 500^{\circ}\text{C}$). В качестве технических термометров применяют только термометры со вложенной шкалой, которые имеют две модификации: прямые и угловые.

Для обеспечения задач позиционного регулирования и сигнализации температуры в лабораторных и промышленных установках разработаны специальные электроконтактные *технические термометры двух типов*:

1) с постоянными впаянными контактами, обеспечивающие замыкание и размыкание электрических цепей при одной, двух или трех заранее заданных температурах;

2) с одним подвижным контактом (перемещается внутри капилляра с помощью магнита) и вторым неподвижным контактом, впаянным в капилляр, что обеспечивает замыкание и размыкание электрической цепи между контактами при любом значении выбранной шкалы термометра. Перемещающаяся в капилляре ртуть обеспечивает размыкание или замыкание цепи между контактами, к которым подводится напряжение постоянного или переменного тока и нагрузка на которых не должна превышать 0,5 мА при напряжении не более 0,3 В.

В процессе измерения температур стеклянными жидкостными термометрами появляются погрешности, обусловленные рядом причин. Это ошибки, возникающие вследствие дефектов термометра (возгонка термометрической жидкости, разрывы столбика жидкости, смещение шкальной пластинки и т.п.); ошибки, вносимые наблюдателем; ошибки, возникающие при нормальной эксплуатации (погрешность в нанесении отметок шкалы, нелинейная температурная зависимость изменения объемов термометрической жидкости и стеклянной оболочки) и при отклонении условий эксплуатации от нормальных.

3.3. Манометрические термометры

Принцип действия манометрического термометра основан на использовании зависимости между температурой и давлением термометрического вещества (газа, жидкости), заполняющего герметически замкнутую термосистему данного устройства. Принципиальная схема показывающего манометрического термометра приведена на рис. 16.

Термосистема состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической одно- или многовитковой пружины 3. Капилляр соединяет термобаллон с неподвижным концом манометрической пружины. Подвижный конец пружины запаян и через шарнирное соединение 4, поводок 5, сектор 6 связан со стрелкой прибора 7.

При погружении термобаллона в среду, температура которой контролируется, изменяется давление термометрического вещества в замкнутой термосистеме, т.е. в системе с постоянным объемом. Чувствительный элемент - манометрическая пружина - деформируется, и ее свободный конец перемещается. Данное изменение положения пружины преобразуется в соответствующее перемещение регистрирующей стрелки относительно шкалы прибора. Поперечное сечение манометрической пружины, выполненной из металлической (сталь, латунь, бронза) изогнутой трубки, либо овальное, либо сложной формы с пережатым средним участком и двумя каналами каплевидной формы (что повышает ее механическую прочность) уменьшает внутренний объем и снижает дополнительную температурную погрешность, связанную с изменением температуры

окружающей среды. Биметаллическая пружина 8 служит для уменьшения влияния измерения температуры окружающей среды.

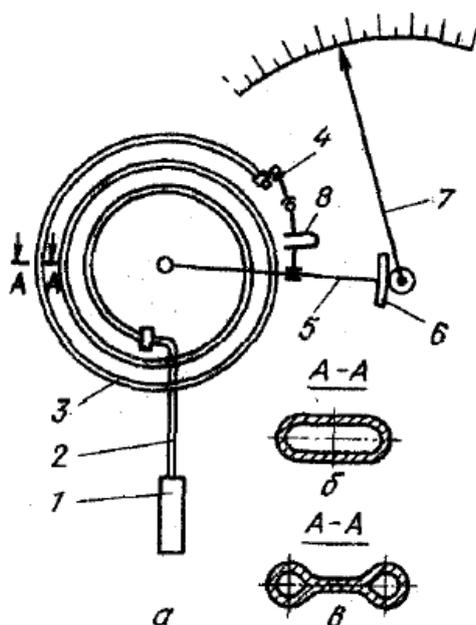


Рис.16. Схема показывающего манометрического термометра

Цилиндрический термобаллон изготавливают из коррозионностойкой стали, обеспечивающей возможность контроля температуры химически агрессивной среды. Для защиты от механических повреждений капилляр, выполненный в виде медной или стальной трубки внутренним диаметром 0,35 и наружным 2,5 мм, помещают в защитную металлическую оболочку. Длина капилляра различна и изменяется в зависимости от вида термометра от 0,6 до 40 м. Манометрические термометры делятся на газовые, конденсационные и жидкостные. В газовых или жидкостных термометрах вся термосистема заполнена тем или иным веществом, в конденсационных термометрах только термобаллон заполнен низкокипящей жидкостью и ее насыщенными парами, а в остальной части термосистемы находятся либо насыщенные пары данной жидкости, либо специальная жидкость для передачи давления из термобаллона в манометрическую пружину.

Отличие приборов конденсационного типа заключается также в значительной нелинейности зависимости давления насыщенного пара от температуры. Поэтому необходимо применение специальных устройств для получения равномерной шкалы термометра.

Характер заполнения определяет размеры термобаллона и длину капилляра. Они наибольшие у газовых термометров, наименьшие у жидкостных. Значительные габариты термобаллона газовых термометров ограничивают область их применения.

На показания манометрических термометров большое влияние оказывают внешние условия: изменение температуры окружающего воздуха (дополнительная температурная погрешность), различная высота расположения термо-

баллона и пружины (гидростатическая погрешность), колебания атмосферного давления (барометрическая погрешность).

Дополнительная температурная погрешность, появляющаяся из-за изменения упругости манометрической пружины, характерна для газовых и конденсационных термометров: при повышении температуры воздуха упругость пружины понижается, что приводит также к изменению температуры термометрической среды в капилляре и пружине и, следовательно, к изменению давления в термосистеме.

Этот источник дополнительной температурной погрешности проявляется в газовых и жидкостных манометрических термометрах. Уменьшить данную погрешность можно с помощью специальных компенсаторов (биметаллическая пружина, инварный сердечник), установкой параллельной термосистемы без термобаллона, а также путем применения манометрической пружины специальной формы.

3.4. Термоэлектрические термометры (термопары)

Для измерения температуры в металлургии наиболее широкое распространение получили термоэлектрические термометры, работающие в интервале температур от 200 до 2500⁰С и выше. Данный тип устройств характеризуют высокая точность, и надежность, возможность использования в системах автоматического контроля и регулирования параметра, в значительной мере определяющего ход технологического процесса в металлургических агрегатах.

Сущность термоэлектрического метода заключается в возникновении электродвижущей силы (э.д.с.) в проводнике, концы которого имеют различную температуру. В зависимости от величины перепада температур и природы проводника (состав, физическое состояние) величина э.д.с. колеблется в значительных пределах. Для того, чтобы измерить возникшую э.д.с, ее сравнивают с э.д.с. другого проводника, образующего с первым термоэлектрическую пару АВ. в цепи которой течет ток (рис. 17).

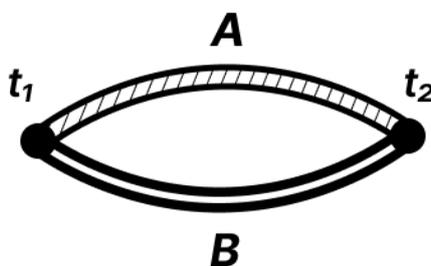
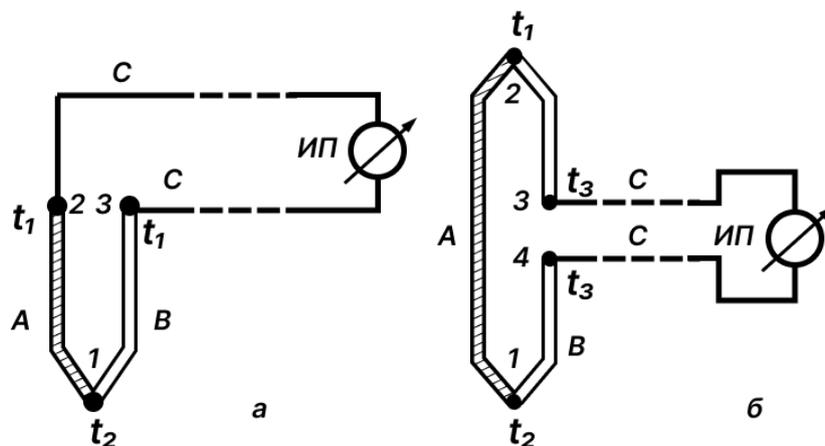


Рис. 17. Схема термопары

Для получения зависимости т.э.д.с. только от одной температуры t_1 необходимо температуру t_1 поддерживать на постоянном уровне, обычно при 0 или 20⁰С. Спай, помещаемый в измеряемую среду, называют горячим или рабочим концом термопары; спай, температуру которого поддерживают постоянной, холодным или свободным концом.

Для измерения возникающей т.э.д.с. в контур термопары в холодный спай или в разрыв одного из термоэлектродов с помощью проводов С включают измерительный прибор ИП (рис. 18). В первом случае в схеме три спая: горячий 1 и два холодных 2 и 3, которые должны находиться при постоянной температуре. Во второй схеме включения имеются четыре спая: горячий 1, холодный 2 и нейтральные 3 и 4, причем температура последних t_3 должна быть одинаковой.



а – к свободным концам термопары; б – в разрыв термоэлектрода
Рис. 18. Схемы включения измерительного прибора в цепь термопары

Необходимо еще раз подчеркнуть, что для правильного включения ИП температуры в обоих местах присоединения третьего, проводника должны быть одинаковыми, что исключает образование дополнительных «паразитных» термопар, т.э.д.с. которых искажала бы сигнал основной термопары.

Для увеличения чувствительности термоэлектрического метода измерения температуры в ряде случаев применяют термобатарей: несколько последовательно включенных термопар, рабочие концы которых находятся при температуре t а свободные - при известной и постоянной температуре t_i . При параллельном включении происходит усреднение сигнала т.э.д.с.

Для контроля разности температур двух объектов или различных точек одного объекта используется дифференциальная термопара, у которой одноименные электроды А включены навстречу друг другу, а к другим В подключен ИП. Рабочие спаи имеют разные температуры, а свободные концы – одинаковую.

Требования к материалу термоэлектродов. Термопара может быть получена путем комбинации бесчисленного множества различных материалов: чистых металлов, их сплавов, полупроводниковых и тугоплавких соединений. Однако использование большинства из них в термоэлектрических термометрах широкого применения невозможно в силу того, что они не удовлетворяют ряду требований, предъявляемых к термоэлектродным материалам: высокое значение развиваемой т.э.д.с; стабильность характеристик прибора в течение значительного периода времени и высоких температур; воспроизводимость и линейная зависимость т.э.д.с. от температуры; однородность термоэлектрических свойств по длине проводника; легкость технологической обработки и получе-

ния сплава одинакового состава, хорошие экономические показатели (низкая стоимость, недефицитность).

Устройство термоэлектрических термометров (рис. 19). **Термоэлектрический термометр (ТТ)** - это измерительный преобразователь, чувствительный элемент которого (термопара) расположен в специальной защитной арматуре, обеспечивающей защиту термоэлектродов от механических повреждений и воздействия измеряемой среды. Арматура включает защитный чехол 1, гладкий или с неподвижным штуцером 2; и головку 3, внутри которой расположено контактное устройство 4 с зажимами для соединения термоэлектродов 5 с проводами, идущими от измерительного прибора к термометру. Термоэлектроды по всей длине изолированы друг от друга и от защитной арматуры керамическими трубками (бусами) 6.

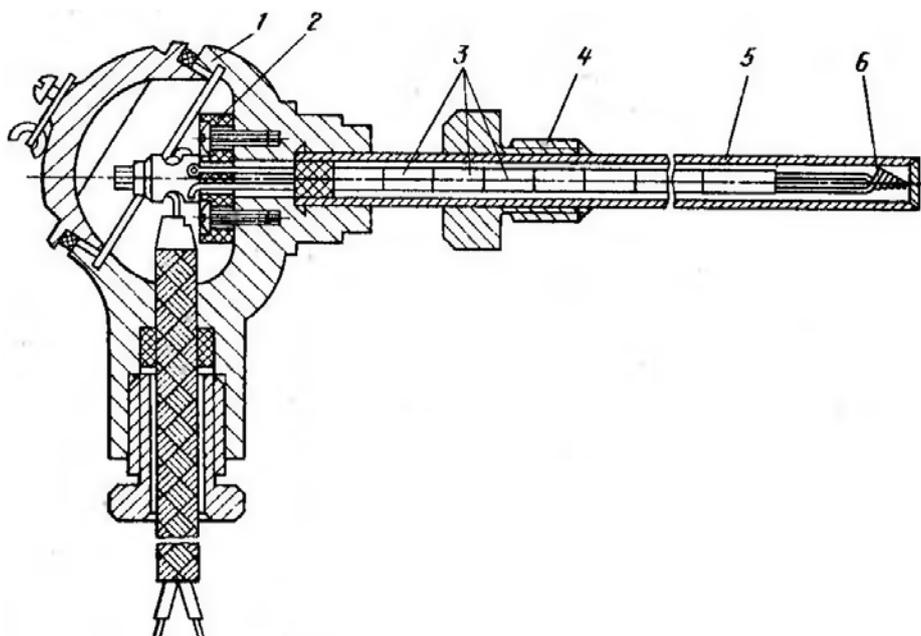


Рис. 19. Конструкция технического термоэлектрического термометра

Специальная замазка 8 герметизирует внутреннее пространство защитного чехла термометра, который выполняется из газонепроницаемых материалов, выдерживающих высокие температуры и агрессивное воздействие среды.

Термоэлектрические термометры выпускают двух видов: погружаемые и поверхностные. У последних рабочий спай приводится в непосредственный контакт с измеряемой поверхностью. Приборостроительная промышленность изготавливает устройства различных модификаций, отличающихся по значению и условиям эксплуатации, по материалу защитного чехла, по способу установки термометра в точке измерения, по герметичности и защищенности от действия измеряемой среды, по устойчивости к механическим воздействиям, по степени тепловой инерционности и т.п. Конструктивное оформление ТТ весьма разнообразно, что позволяет их применять в различных условиях. Имеется также унифицированная арматура, которая обеспечивает взаимозаменяемость ряда моделей термоэлектрических термометров с термометрами сопротивления. Ка-

ждая модель изготавливается с различной длиной погружаемой (монтажной) части ТТ, которая изменяется от 10 до 3150 мм. Длина монтажной части термометров, выпускаемых без защитной арматуры (гибкие ТТ), может достигать 10000 мм.

3.5. Бесконтактная пирометрия

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем большую энергию оно излучает.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют пирометрами излучения (ПИ) или просто пирометрами. Они позволяют контролировать температуры в широком интервале от 100 до 6000°С и выше. Одним из главных достоинств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название бесконтактных.

Тела характеризуются либо непрерывным спектром излучения (твердые и жидкие вещества), либо - селективным (газы). Участок спектра в интервале длин волн 0,02–0,4 мкм соответствует ультрафиолетовому, участок 0,4–0,76 мкм – видимому, участок 0,76–400 мкм - инфракрасному излучению. Интегральное излучение – это суммарное излучение, испускаемое телом во всем спектре длин волн. Монохроматическим называют излучение, испускаемое при определенной длине волны.

На практике разработаны пирометры следующих типов:

- 1) пирометр суммарного (полного) излучения (ПСИ) - измеряется полная энергия излучения;
- 2) пирометр частичного излучения (ПЧИ) - измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
- 3) пирометры спектрального отношения (ПСО) - измеряется отношение энергий фиксированных участков спектра.

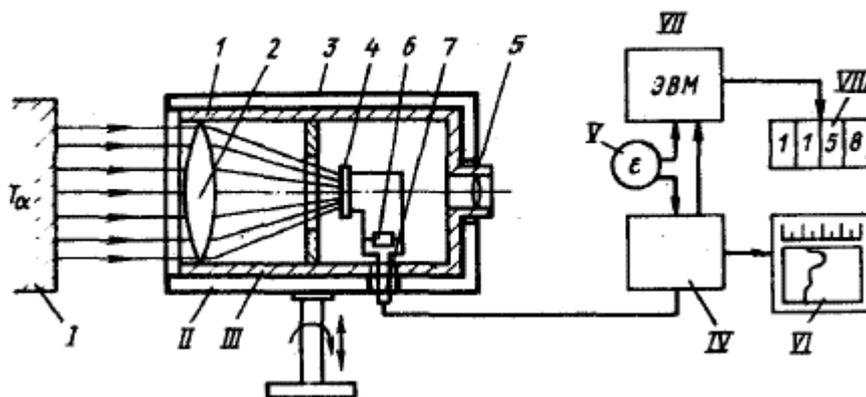
Пирометры излучения градуируются по АЧТ (абсолютно черному телу), поэтому при их применении в реальных условиях получают значения температур, в большинстве случаев отличающиеся от действительных и получившие название условных (T_{ycl}). Для перехода от условной температуры к действительной в показания пирометров вводятся соответствующие поправки.

В зависимости от типа пирометра различаются: радиационная, яркостная и цветовая температуры.

Электромагнитное излучение (рис.20), характеризующее степень нагретости – действительную температуру T_d объекта контроля *I* (металл в печи или на стане, кладка агрегата и т.п.) поступает на первичный преобразователь *II*, который является датчиком температуры или собственно пирометром излучения. Корпус ПИ обычно устанавливается в специальной арматуре *III*, обеспечивающей его защиту от перегрева, механического повреждения и возможность наве-

дения на объект измерения таким образом, чтобы приемник ПИ воспринимал только излучение объекта. Вторичный измерительный преобразователь IV предназначен для усиления и преобразования в выходной нормированный сигнал сигнала низкого уровня (напряжения или тока), развиваемого приемником излучения и пропорционального измеряемой температуре.

Данный преобразователь может также обеспечивать запоминание максимального значения измеряемой величины, линеаризацию сигнала. Корректор V служит для ввода в измерительный преобразователь IV или микро-ЭВМ VII фактического значения величины интегральной или спектральной степени черноты объекта контроля. Измеренное значение температуры фиксируется с помощью самопишущего VI или цифрового VIII приборов. Микро-ЭВМ VII может заменить преобразователь IV либо обеспечить дополнительные функции: распечатку измеренных значений; хранение необходимых значений степени черноты в функции от уровня измеряемых температур, типа объекта и спектральных характеристик; автоматический расчет корректирующих поправок на фоновое излучение кладки и т.п.



- 1 – корпус; 2 – объектив; 3 – диафрагма; 4 – приемник излучения;
5 – окуляр; 6 – компенсатор температуры корпуса; 7 – штуцер

Рис. 20. Принципиальная схема устройства для бесконтактного измерения температуры

В зависимости от решаемых задач, вида материала линзы (интервала пропускаемых длин волн), чувствительности приемника излучения, реализуются конкретные конструкции приборов в виде стационарных или переносных ПИ, в состав которых входят те или иные структурные составляющие.

В ряде конструкций оптическая система ПИ выполняется в виде световодов прямых или гибких, что позволяет уменьшить размеры пирометра и площадки визирования. Преимущество ПИ с гибкими стекловолоконными световодами:

- 1) отсутствие контакта с измеряемым объектом, что особенно важно при контроле температур движущихся объектов;
- 2) у измерительной системы практически отсутствует инерционность, так как время срабатывания составляет 1,25 мс;

3) сигнал устойчив по отношению к внешним воздействиям (индуктивному, механическому и т.п.);

4) аппаратура активно противостоит нагреву (до 1200°C), давлению (210 МПа), воздействию электрического поля и высокого напряжения, химическому воздействию агрессивных сред;

5) с помощью систем линз можно реализовать большой диапазон длин световодов (до 10 м) и снимать информацию с площадок объекта очень малых размеров, вплоть до 0,1 мм;

6) возможность переноса лучистой энергии в 70 раз больше по сравнению с другими ПИ, что обеспечивает большую точность измерений и разрешающую способность аппаратуры.

3.6 Пирометры суммарного излучения

Пирометры суммарного излучения (ПСИ) измеряют радиационную температуру тела, поэтому их часто называют радиационными.

Датчик пирометра выполняется в виде телескопа, линза объектива которого фокусирует на термочувствительном приемнике излучение нагретого тела (рис.21). В качестве чувствительного элемента используются термопары, термобатареи, болометры (металлические и полупроводниковые), биметаллические спирали и т.п. Наиболее широко применяются термобатареи, в которых используется 8–14 миниатюрных термопар (например, хромель-копелевые), соединенных последовательно. Поток излучения попадает на расклепанные в виде тонких зачерненных лепестков рабочие концы 4 термопар 2. Свободные концы термопар привариваются к тонким пластинкам 1, закрепленным на слюдяном кольце 3. Металлические выводы 5 служат для подсоединения к измерительному прибору, в качестве которого обычно используются потенциометры или милливольтметры.

Рабочие концы термопар поглощают падающую энергию и нагреваются. Свободные концы находятся вне зоны потока излучения и имеют температуру корпуса телескопа. В результате возникновения перепада температур термобатарея развивает т.э.д.с. пропорциональную температуре рабочих спаев, а следовательно, и температуре объекта измерения. Градуировка пирометров производится при температуре корпуса $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Поэтому повышение данной температуры приводит к уменьшению перепада температур в термопарах приемника излучения и к появлению значительных дополнительных погрешностей. Так при температуре корпуса 40°C дополнительная погрешность (при прочих равных условиях) составит 4°C .

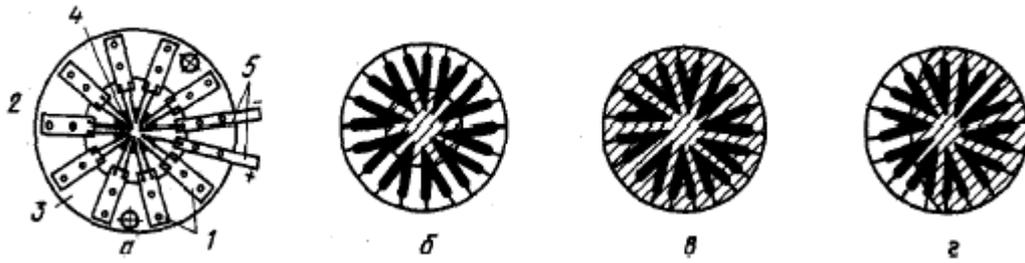


Рис. 21. Устройство приемника излучения телескопа ПСИ (а) и вид в окуляре взаимного расположения излучателя (объекта измерения температуры) и термобатареи; б – расстояние от телескопа до излучателя слишком велико; в – установка телескопа правильная; г – направление телескопа неправильное

ПСИ измеряют температуру в интервале от 100 до 2500°С. Основная допустимая погрешность технических промышленных пирометров возрастает с увеличением верхнего предела измерения. При температуре 1500°С он составляет $\pm 15^\circ\text{C}$, при 2000°С – $\pm 20^\circ\text{C}$, при 2500°С – $\pm 25^\circ\text{C}$.

3.7 Пирометры частичного излучения

К данному типу пирометров, измеряющих яркостную температуру объекта, относятся монохроматические оптические пирометры и фотоэлектрические пирометры, измеряющие энергию потока в узком диапазоне длин волн.

Оптические пирометры. Принцип действия оптических пирометров основан на использовании зависимости плотности потока монохроматического излучения от температуры (закон Планка).

В лампе накаливания применяется вольфрамовая нить, которая при высоких температурах начинает интенсивно испаряться. Поэтому для сохранения стабильной градуировки пирометра, осуществляют нагрев лампы только до яркостной температуры 1400–1500°С, а при измерении более высоких температур яркость излучателя ослабляют с помощью поглощающего стекла 3, устанавливаемого между объектом и лампой (рис. 22).

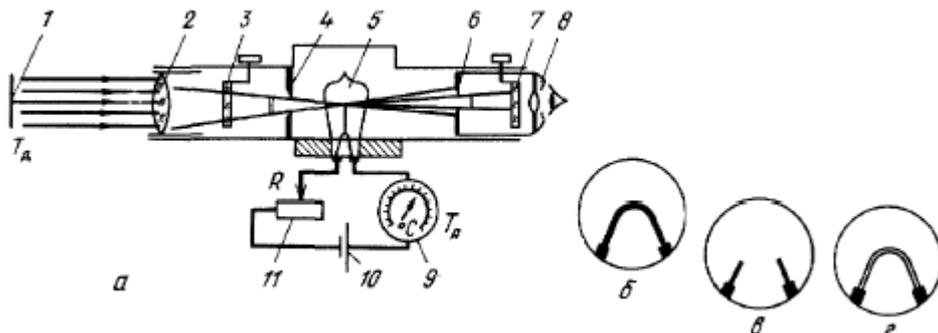


Рис. 22. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью

Схема оптического пирометра с «исчезающей» нитью, принцип действия которого основан на сравнении яркостей объекта измерения и градуированного источника излучения в определенной длине волны.

Изображение излучателя 1 линзой 2 и диафрагмой 4 объектива пирометра фокусируется на плоскости нити накаливания лампы 5. Оператор через диафрагму 6, линзу 8 окуляра и красный светофильтр 7 на фоне раскаленного тела видит нить лампы.

Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через лампу, и добивается уравнивания яркости нити и яркости излучателя. Если яркость нити меньше яркости тела, то она на его фоне выглядит черной полоской, при большей температуре нити, она будет выглядеть как светлая дуга на более темном фоне. При равенстве яркостей излучателя и нити, последняя «исчезает» из поля зрения оператора. Этот момент свидетельствует о равенстве яркостных температур объекта измерения и нити лампы.

Питание лампы осуществляется с помощью батареи 10. Прибор 9 фиксирующий силу тока, протекающего в измерительной цепи, заранее проградуирован в значениях зависимости между силой тока и яркостной температурой, что позволяет производить считывание результата измерения в градусах Цельсия. Красный светофильтр 7 пропускает область с шириной около 0,01 мкм и с эффективной длиной волны 0,65 мкм.

Существуют конструкции оптических ПИ, в которых в процессе измерения температуры накал лампы поддерживается постоянным, а варьируется с помощью поглощающего клина, расположенного между лампой и объектом, видимая яркость последнего. Поглощающий клин имеет плавно изменяющийся в зависимости от его перемещения коэффициент пропускания. Таким образом, яркостная температура определяется через угол поворота клина. Шкала его перемещения проградуирована в градусах соответствующей условной температуры. Данная конструкция оптического ПИ имеет меньшую точность, чем пирометры с «исчезающей» нитью (с лампой переменного накала). Данный тип пирометров позволяет измерять температуры, в широком интервале от 800 до 10000⁰С. Для оптических пирометров промышленного применения в интервале температур 1200–2000⁰С основная допустимая погрешность измерения составляет ±20⁰С.

На точность измерения влияет неопределенность и изменяемость спектральной степени черноты, возможное изменение интенсивности излучения за счет ослабления в промежуточной среде, а также за счет отражения посторонних лучей. Максимальное расстояние до измеряемого объекта обычно ограничивают 5–6 м, минимальное расстояние не должно быть менее 0,7 м.

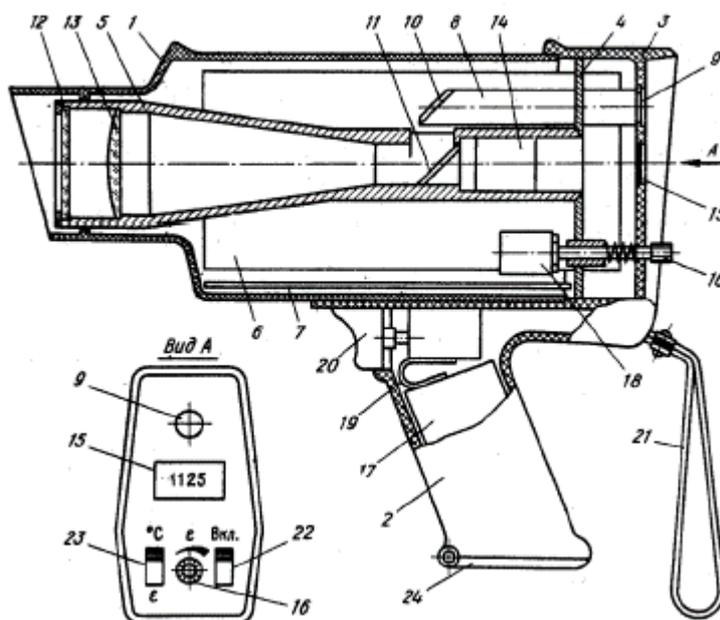
Фотоэлектрические пирометры данного типа обеспечивают автоматическое непрерывное измерение и регистрацию температур. Их принцип действия основан на использовании зависимости интенсивности излучения в узком интервале длин волн спектра. В качестве приемников в данных устройствах используются фотодиоды, фотосопротивления, фотоэлементы и фотоумножители.

Фотоэлектрические ПЧИ делятся на две группы:

1) пирометры, в которых мерой температуры объекта является непосредственно величина фототока приемника излучения;

2) пирометры, которые содержат стабильный источник излучения, причем фотоприемник служит лишь индикатором равенства яркостей данного источника и объекта.

ПЧИ первой группы имеют простую конструкцию (рис. 22). Поток от объекта с помощью линзы и диафрагмы фокусируется на приемной площадке приемника излучения, в качестве которых в основном используются германиевые (спектральный диапазон 0,8–1,8 мкм) и кремниевые (0,5–1,1 мкм) фотодиоды, причем последние измеряют более высокие температуры. В цепь фотодиода, работающего в генераторном режиме, последовательно включается сопротивление нагрузки.



- 1 - кожух приемной камеры; 2 - рукоятка; 3 - индикаторная панель; 4 - переходная планка; 5 - кронштейн; 6, 7 - платы электронной части прибора; 8 - окуляр; 9 - окно окуляра; 10 - зеркало окуляра; 11 - зеркало; 12 - защитное стекло; 13 - линза объектива; 14 - приемник излучения; 15 - цифровое табло; 16 - ручка установки; 17 - блок питания; 18 - блок образования корректирующего сигнала на степень черноты объекта; 19 - клеммы подключения питания; 20 - кнопка включения запоминания измеренного значения температуры; 21 - страховочный ремень; 22 - тумблер включения питания прибора; 23 - переключатель табло; 24 - крышка с защелкой

Рис. 22. Устройство переносного пирометра частичного излучения

Вторичный измерительный преобразователь обеспечивает получение усиленного нормированного выходного сигнала и его передачу на быстродействующий регистрирующий прибор или в АСУ ТП. Данные пирометры характеризуются малой инерционностью и высокой надежностью в работе. Пределы измерения от 450 до 2500⁰С и выше. Основная допустимая погрешность ±0,6%.

Конструктивно ПИ выполнен в виде малогабаритного переносного прибора, по своему внешнему виду, напоминающему пистолет. Оператор с помощью переключателя 23 и корректора 16 устанавливает на табло 15 величину степени черноты измеряемого объекта. Затем переключатель 23 переводится в крайнее верхнее положение 0°C, и оператор через окно окуляра 9 наводит ПИ на объект. Нажатием на кнопку включения запоминания 20 на цифровом табло фиксируется величина измеренного значения температуры.

Таким образом, данный ПИ обеспечивает индикацию измеряемой температуры и задаваемой степени черноты, запоминание текущего и максимального значений температуры, индикацию разряда аккумуляторной батареи питания. Установка величины степени черноты производится в пределах от 0,1 до 1,0 с дискретностью 0,01.

3.8 Проверка знаний для студентов

Проверка знаний студентов по данной теме проводится в виде теста.

1. Принцип действия термометров расширения основан на свойстве

- a) изменения электрического сопротивления;
- b) изменения объёмных или линейных размеров термометрического вещества;
- c) изменения давления термометрического вещества при постоянном объёме.

2. Энергия, передаваемая при теплообмене, называется

- a) температурой;
- b) теплопроводностью;
- c) количеством теплоты.

3. Что является выходным сигналом термопреобразователей сопротивления?

- a) ТЭДС, мВ;
- b) зависимость сопротивления от температуры;
- c) ТКС.

4. Что является выходным сигналом термоэлектрических преобразователей?

- a) ТЭДС, мВ;
- b) зависимость сопротивления от температуры;
- c) ТКС.

5. Бесконтактным методом температуру можно измерить

- a) жидкостными термометрами;
- b) манометрическими термометрами;
- c) пирометрами излучения;
- d) термоэлектрическими термометрами.

6. Дилатометрические термометры относятся к группе

- a) жидкостных термометров;
- b) термометров расширения твердых тел;

- c) термометров сопротивления;
- d) манометрических термометров.

7. Назовите все виды рабочей среды манометрических термометров

- a) жидкость, жидкость + насыщенный пар, газ;
- b) твёрдое тело, жидкость, газ.

8. Причинами возникновения погрешностей при измерении термопарами являются

- a) потери в компенсационных проводах;
- b) полярность подключения;
- c) химический состав соединительных проводов;
- d) длина соединительных проводов.

9. Для чего рабочий спай термопары может быть приварен к защитной гильзе?

- a) для обеспечения хорошего теплового контакта и меньшей инерционности;
- b) для увеличения длительно допустимой рабочей температуры;
- c) для увеличения рабочей термоЭДС.

10. В качестве материалов с большим температурным коэффициентом линейного расширения применяют...

- a) никель, латунь, сталь;
- b) хром, олово;
- c) медь, свинец;
- d) алюминий, медь.

3.9 Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «температура».
2. Перечислите основные виды температурных шкал
3. Что такое реперная точка?
4. Приведите классификацию средств измерения температуры
5. В чем состоит принцип действия жидкостных термометров?
6. Чем отличаются биметаллические термометры от dilatометрических?
7. Укажите основные конструктивные части манометрических термометров?
8. Укажите типы манометрических термометров
9. Дайте определение понятию «термоэлектрический эффект».
10. Поясните принцип действия термопары
11. Что такое холодный и горячий спай термопары?
12. Как подбираются компенсационные термоэлектродные провода для термопары?
13. Назовите основные термоэлектродные материалы и типы термопар
14. У какого из типов термопар градуировочная характеристика близка к линейной?
15. Поясните конструкцию стандартной термопары
16. Что такое термопарный кабель?

17. Укажите основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар
18. Поясните принцип действия термометра сопротивления
19. Назовите основные материалы для изготовления термометров сопротивления
20. Поясните конструкцию термометра сопротивления
21. Какой из термометров сопротивления имеет наибольший диапазон измерения?
22. Перечислите бесконтактные методы измерения температуры
23. Назовите преимущества бесконтактных методов измерения температуры
24. Какие виды излучений испускает нагретое тело?

4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

4.1. Общие сведения

Одним из важных параметров, влияющих на ход процессов в металлургических печах, является давление: абсолютное, атмосферное, избыточное и вакуумметрическое. Атмосферное давление создается массой воздушного столба земной атмосферы. Он имеет переменную величину, зависящую от высоты местности над уровнем моря, географической широты и метеорологических условий. Избыточное давление определяется разностью между значениями абсолютного атмосферного давления.

Под вакуумом (разрежением) понимают такое состояние газа, при котором его давление меньше атмосферного. Количественно вакуумметрическое давление определяется разностью между значениями атмосферного и абсолютного давления внутри вакуумной системы.

За единицу давления в СИ принято давление, называемое паскалем (Па). Оно создается силой в 1 ньютон, равномерно распределенной по поверхности в 1 м^2 . Эта небольшая величина пригодна для измерения очень малых давлений. Для измерения средних и высоких давлений целесообразно применять кратные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа) и др. При измерении давления в движущихся средах различают: полное, статическое и динамическое давление. Статическое – это давление, зависящее от запаса потенциальной энергии газовой (жидкостной) среды, и определяется через статический напор. Оно может быть избыточным или вакуумметрическим, в частном случае оно равно атмосферному. Динамическое – это давление, обусловленное скоростью движения потока газа (жидкости).

Приборы для измерения давления можно разделить на следующие основные группы:

- 1) жидкостные, в которых измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости соответствующей высоты;
- 2) деформационные, в которых измеряемое давление определяется по величине деформации различных упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе;
- 3) грузопоршневые, в которых измеряемое или воспроизводимое давление уравнивается давлением, создаваемым массой поршня и грузов;
- 4) электрические, действие которых основано на изменении электрических свойств некоторых материалов при воздействии на них давления.

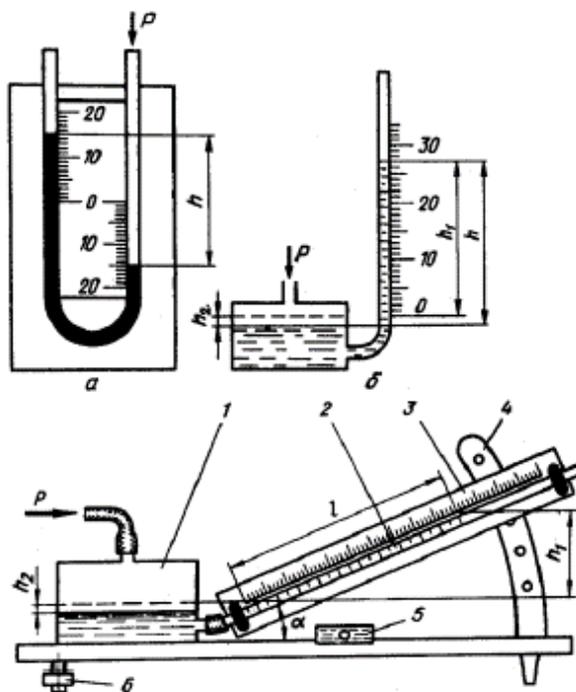
По наименованию приборы для измерения давления подразделяются на барометры (для измерения атмосферного давления); манометры (для измерения избыточного давления); вакуумметры (для измерения вакуумметрического давления); мановакуумметры (для измерения избыточного и вакуумметрического давления); манометры абсолютного давления (для измерения давления, отсчитываемого от абсолютного нуля); дифференциальные манометры для измерения разности (перепада) давления. Манометры, вакуумметры и дифференциальные манометры, предназначенные для измерения небольших давлений, раз-

режений и разности давлений газовых сред (до 40 кПа), называют соответственно напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами. Приборы, предназначенные для высокоточных измерений малых давлений (обычно не превышающих 4,0 кПа), называют микроманометрами.

4.2. Жидкостные приборы

Действие жидкостных приборов основано на гидростатическом принципе, при котором измеряемое давление уравнивается давлением столба (рабочей) жидкости. Разница уровней в зависимости от плотности жидкости является мерой давления.

Простейшим прибором для измерения давления при разности давлений является двухтрубный (или U-образный) манометр, представляющий собой стеклянную трубку, согнутую по форме вытянутой буквы U, заполненную жидкостью до нулевой отметки, и прикрепленную к панели, на которой имеется шкала для отсчетов (рис. 23). Один конец трубки манометра сообщается с атмосферой, другой подключается к объекту, где измеряется давление. Трубка, связанная со средой большего давления, обозначается знаком плюс (плюсовая трубка), а трубка, связанная со средой меньшего давления, - знаком минус (минусовая трубка).



- а – U-образного; б – чашечного; в – микроманометра с наклонной трубкой; 1 – широкий сосуд; 2 - измерительная трубка; 3 - шкала; 4 - приспособление для фиксации угла наклона трубки; 5 - указатели уровня;
б - винт установки горизонтального уровня

Рис. 23. Схемы жидкостных манометров

Рабочей жидкостью может быть ртуть, спирт, трансформаторное масло или вода. Под действием измеряемого давления жидкость в плюсовой трубке

опускается, а в минусовой поднимается, разность гидростатических уровней и определяет величину измеряемого давления.

Величину давления по шкале двухтрубного манометра определяют по двум уровням, отсчитывая высоту столба жидкости в одной трубке вверх от нуля, а в другой – вниз, и оба значения складывают. Верхний предел измерения двухтрубных манометров составляет 1–10 кПа. В этом случае приведенная погрешность измерения лежит в интервале 2–0,2%.

Более удобным прибором является однотрубный (чашечный) манометр, в котором одна из трубок заменена сосудом, диаметр которого в несколько раз больше диаметра трубки. Манометр заполняют рабочей жидкостью до тех пор, пока мениск в трубке не устоит на нулевую отметку по шкале прибора. Для измерения избыточного давления широкий сосуд соединяют с измеряемым пространством, а конец трубки оставляют открытым, при этом уровень жидкости в трубке поднимается, а в широком сосуде опускается, но вследствие значительно большего поперечного сечения сосуда понижение уровня в нем будет очень малым. При измерении вакуумметрического давления объект, где измеряют вакуум, соединяют с трубкой, а широкий сосуд – с атмосферой. При этом жидкость в измерительной трубке будет подниматься до тех пор, пока вес столба жидкости в трубке не уравнивает разность между атмосферным давлением и вакуумом контролируемой среды.

Однотрубные манометры имеют верхний предел измерения 1,6–10 кПа, приведенная погрешность измерения составляет 0,4–0,025%. Измерение малых давлений (до 2 кПа) обычными двухтрубными или однотрубными приборами дает большую погрешность из-за неточности отсчета. В этом случае применяют микроманометры, простейшим из которых является стеклянный однотрубный микроманометр с наклонной трубкой, у которого трубка расположена не вертикально, а под углом к горизонту. При этом точность измерения увеличивается в несколько раз.

Чашку микроманометра заполняют спиртом определенной плотности. Плотность спирта меньше плотности воды, и он меньше смачивает стекло. Вследствие этого спирт дает больший, чем вода, масштаб отсчета и меньший мениск. Так как отсчет по микроманометру с наклонной трубкой зависит от угла наклона этой трубки, то во время измерения прибор должен находиться в строго горизонтальном положении. Для этой цели микроманометр снабжен уровнем, по которому устанавливают прибор перед началом измерения и периодически проверяют положение уровня жидкости при отключенном приборе.

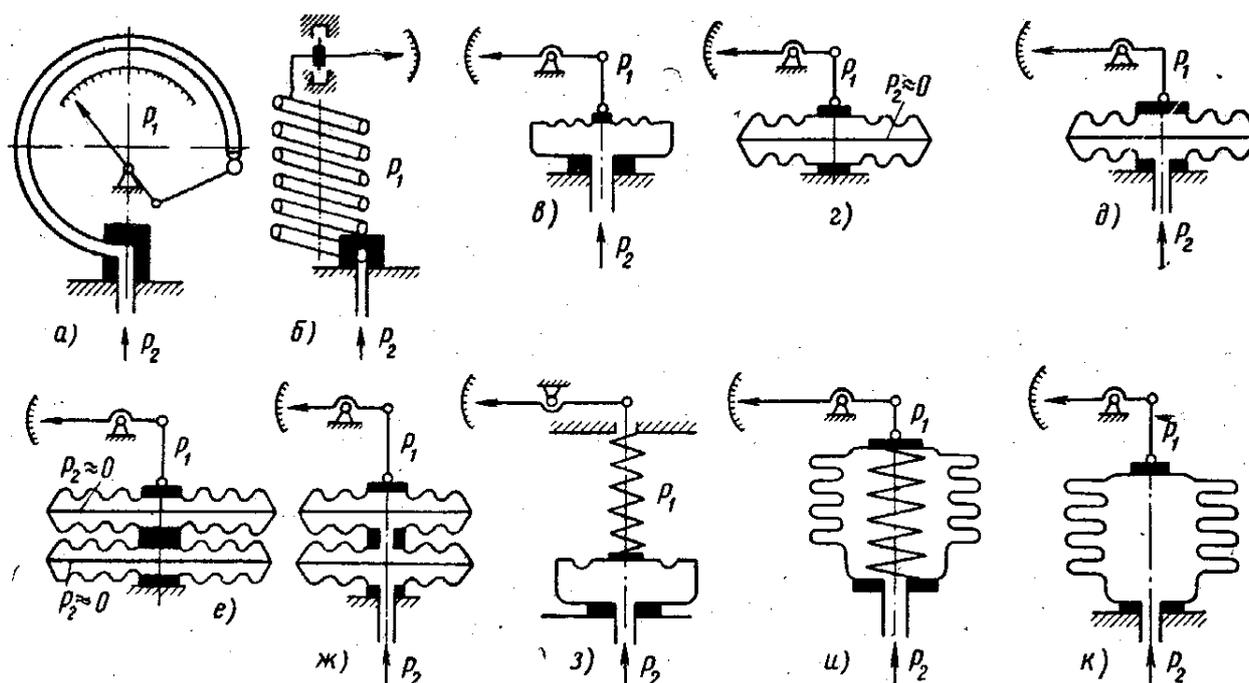
Недостатками жидкостных приборов являются: отсутствие дистанционной передачи показаний, небольшой предел измерений, недостаточная наглядность показаний и хрупкость. Поэтому жидкостные приборы как стационарные в промышленности используются редко. В то же время благодаря своей простоте, дешевизне и относительно высокой точности измерения они широко распространены в лабораториях и в промышленности при эпизодических измерениях и при проверке приборов других типов.

4.3. Манометры с упругими чувствительными элементами

Деформационные приборы широко применяют для измерения давления и его перепада благодаря их портативности, простоте и большому диапазону измерения – от нескольких паскалей до тысячи мегапаскалей.

Принцип действия данных устройств основан на уравнивании силы, создаваемой давлением или вакуумом контролируемой среды на чувствительный элемент, силами упругих деформаций различного рода упругих элементов. Эта деформация в виде линейных или угловых перемещений передается показывающей или самопишущей части прибора, а также может быть преобразована в электрический или пневматический сигнал для дистанционной передачи его на измерительный (вторичный) прибор или другие средства контроля или регулирования.

В деформационных приборах в качестве чувствительных элементов используют одновитковые трубчатые пружины, многовитковые трубчатые пружины, упругие мембраны, упругие мембранные коробки, двойные упругие мембранные коробки, пружинно-мембранные с гибкой (вялой) мембраной, сильфонные и пружинно-сильфонные (рис.24).



а, б – приборы с трубчатой пружиной, в – мембранные приборы, г, д – aneroidная или манометрическая коробка, е, ж – блок aneroidных коробок, з – пружинно-мембранные с гибкой мембраной, и – приборы с упругой мембраной, к – пружинно-сильфонные

Рис. 24. Деформационные чувствительные элементы

4.3. Мембранные приборы

Мембранные приборы применяют для измерения небольших давлений нейтральных газовых сред. Принцип действия приборов основан на уравни-

шивании избыточного, абсолютного или вакуумметрического давления силами упругой деформации мембраны.

Упругие элементы выполняют в форме тонкостенных металлических коробок, состоящих из двух гофрированных круглых мембран, выполненных из бериллиевой бронзы и сваренных между собой по контуру. Если внутреннюю полость мембранной коробки соединить с измеряемой средой, то по прогибу ее жесткого центра можно судить о величине измеряемого избыточного давления. Такие мембраны называются манометрическими. При откачке воздуха из внутренней полости мембранной коробки до 13,3–40 Па и дальнейшей запайке получают anerоидную коробку, с помощью которой измеряют абсолютное давление.

Упругие мембранные коробки, применяемые для измерения атмосферного давления, называют барометрами-анероидами. В этом случае атмосферное давление воздействует на герметически закрытую мембранную коробку, внутренняя полость которой находится под вакуумом.

4.4. Электрические манометры и вакуумметры

В металлургических процессах измерение давлений в подавляющем большинстве случаев обеспечивается деформационными манометрами и вакуумметрами. Электрические приборы используются главным образом для специальных целей, например при измерениях сверхвысоких давлений, глубокого вакуума или давлений, пульсирующих с высокой частотой.

В вакуумной металлургии для измерения малых давлений деформационные приборы охватывают нижний предел измеряемых давлений порядка 1–10 Па.

Для измерения вакуума в области 1–10⁻⁴ Па находят широкое применение тепловые вакуумметры, а для измерения вакуума в пределах до 10⁻⁶ Па применяются ионизационные вакуумметры. Переменные давления в пределах 100кПа, например в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, где давления пульсируют с высокой частотой, измеряют пьезоэлектрическими манометрами.

4.5. Дифференциальные манометры

Дифференциальные манометры применяются для измерения разности (перепада) давления жидкостей и газов. Дифманометры могут быть использованы для контроля расхода газа или жидкости по перепаду давления в сужающем устройстве, для измерения уровня жидкости, находящейся под атмосферным, избыточным или вакуумметрическим давлением, а также для измерения малых избыточных и вакуумметрических давлений в качестве тягомеров, напоромеров и тягонапоромеров.

По принципу действия и конструктивным признакам дифманометры разделяют на следующие типы: двухтрубные, кольцевые, поплавковые, колокольные, мембранные и сильфонные. Двухтрубные, кольцевые и поплавковые дифманометры, в прошлом широко распространенные в промышленности, в настоящее время применяются редко, и их изготовление существенно сокращено

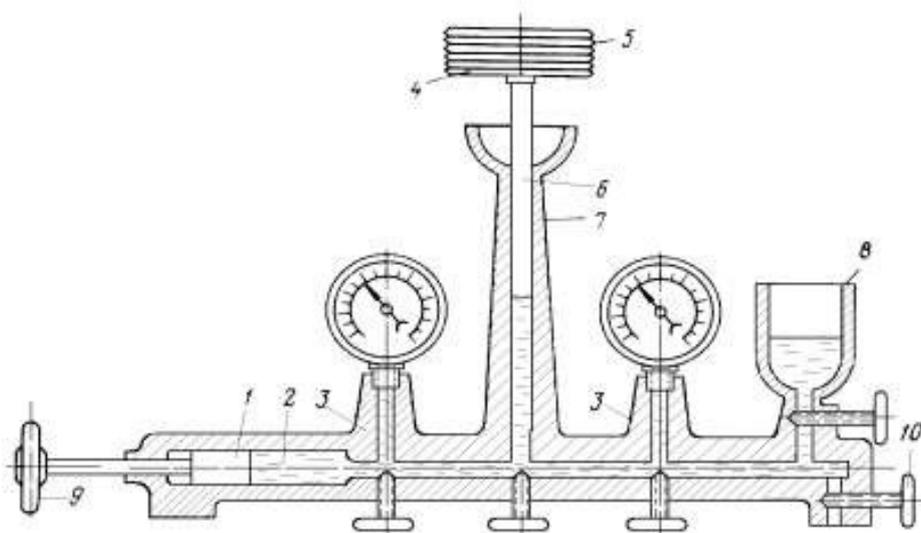
из-за недостатков, обусловленных главным образом наличием в них рабочей жидкости, особенно ртути.

4.6. Грузопоршневой манометр

Принцип действия грузопоршневого манометра основан на уравнивании сил, создаваемых, с одной стороны, измеряемым давлением, а с другой стороны, грузами, действующими на поршень, помещенный в цилиндр (рис. 25).

Прибор состоит из колонки 7 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 6, несущего на своем верхнем конце тарелку 4 для нагружения ее эталонными грузами 5. Поршень 1 винтового пресса служит для подъема и опускания поршня 6 так, чтобы при любых нагрузках поршень 6 был погружен в цилиндр примерно на 2/3 своей высоты.

Камеру 2 поршневого манометра заполняют трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом через воронку 8. Давление в системе создают с помощью винта с маховиком 9 и поршня 1. Штуцеры 3 служат для установки поверяемого и образцового манометров. Вентиль 10 предназначен для слива масла. В процессе измерений для устранения вредных сил трения поршня 6 о стенки цилиндрического канала колонки 7 поршень 6 вручную приводят во вращение.



1,6 – поршень; 2 – камера; 3 – штуцер; 4 – тарелка; 5 - грузы;
7 – колонка; 8 – воронка; 9 – маховик; 10 – вентиль

Рис. 25. Грузопоршневой манометр:

4.6. Промышленные датчики давления

Датчики давления предназначены для измерений и непрерывного преобразования давления в унифицированный выходной электрический сигнал.

Датчики давления измеряют разность двух давлений, действующих на чувствительный элемент (мембрану) датчика. Одно из этих давлений – измеряемое, второе – опорное, относительно которого происходит измерение.

В зависимости от вида опорного давления все датчики делятся на следующие виды:

Датчики абсолютного давления.

Опорное давление – вакуум, воздух из внутренней полости чувствительного элемента датчика откачан. Датчик предназначен для измерения величины абсолютного давления жидких и газообразных сред.

Датчики избыточного давления.

Опорное давление – атмосферное давление, которое действует на одну из сторон мембраны, т.е одна сторона мембраны соединена с атмосферой. Датчик предназначен для измерения величины избыточного давления жидких и газообразных сред.

Датчики дифференциального давления (датчики разности или перепада давлений).

Измеряемое давление подается на обе стороны мембраны. При этом выходной сигнал определяется разностью давлений. Датчики предназначены для измерений разности давлений и используются для измерения давления жидкостей, газа или пара.

Датчики вакуумметрического давления (датчики разрежения).

Опорное давление – атмосферное. Датчики предназначены для измерения вакуумметрического давления (давления меньшего атмосферного) жидких и газообразных сред.

Датчики избыточного давления-разряжения.

Датчики представляют собой сочетание датчиков избыточного и вакуумметрического давления и предназначены для измерения и давления, и разряжения.

Используемые в промышленности *измерительные преобразователи давления* различаются по виду используемых электрических преобразователей, устанавливаемых на мембрану датчика давления, различают следующие разновидности датчиков давления:

Резистивные тензодатчики, жестко связанные с исследуемым объектом, используются для определения механических напряжений под действием давления. Принцип действия основан на упругой деформации чувствительного элемента (диафрагмы), на который нанесены полупроводниковые тензорезисторы, включенные по мостовой схеме. Измеряемое давление вызывает деформацию диафрагмы и, как следствие, деформацию тензорезисторов и изменение их электрического сопротивления.

Время установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемого параметра 0,5 и 2,5 с. Диапазоны измерений:

- избыточного давления – $0-10^{-3}$ до $0-60$ МПа;
- разряжения – $-1-0$ кПа;
- абсолютного давления – от $0-2,5$ кПа до $0-2,5$ МПа;
- разности давлений – от $0-1$ кПа до $0-2,5$ МПа.

Тензорезисторный преобразователь избыточного давления от $0-2,5$ кПа до $0-100$ МПа имеет унифицированные токовые сигналы $0-5$; $0-20$; $4-20$ мА.

Классы точности тензорезисторных измерительных преобразователей избыточного давления, разрежения и разности давлений 0,6; 1,0; 1,5.

Диафрагма и напорная камера **емкостного датчика** образуют конденсатор переменной емкости, с помощью которого можно определить механические напряжения под действием давления. Емкостные измерительные преобразователи давления применяют для измерения давления до 120 МПа.

Преобразователи давления данного типа используются для преобразования быстро изменяющихся давлений. Постоянная времени преобразователя 10^{-4} с, основная погрешность (0,2–5) %.

Магнитные датчики определяют перемещение диафрагмы по изменению ее индуктивности, с помощью LVDT-датчика, по эффекту Холла или вихревым индукционным токам.

Индуктивные измерительные преобразователи давления применяются при давлениях до 30 МПа, основная погрешность (0,2–5) %, постоянная времени $(92,2–93,0)10^{-4}$ с.

Измерительные преобразователи давления дифференциально-трансформаторного (ДТ) типа имеют унифицированный сигнал в виде напряжения переменного тока в диапазоне -1–1 В. Преобразователи давления ДТ-типа работают в комплекте с ДТ вторичными приборами. Классы точности 1,0 и 1,5.

Пьезоэлектрические датчики используют пьезоэлектрический эффект некоторых материалов, таких, как кварц, для измерения напряжения в чувствительном механизме под действием давления.

В основу работы положено преобразование измеряемого давления в усилие посредством деформационного чувствительного элемента и последующего преобразования этого усилия в сигнал измерительной информации пьезоэлектрическим преобразовательным элементом. Верхние пределы измерений пьезоэлектрических преобразователей давления с кварцевыми чувствительными элементами 2,5–100 МПа.

Классы точности 1,5; 2,0. Из-за утечки заряда с кварцевых пластин преобразователи давлений этого типа не используются для измерения статических давлений.

Оптические датчики используют физические изменения оптических волокон для измерения напряжений под действием давления.

Потенциометрические датчики определяют механические напряжения под действием давления с помощью контакта, движущегося вдоль резистивного механизма.

Резонансные датчики определяют напряжения или изменения плотности газов под действием давления, регистрируя изменения резонансной частоты чувствительного механизма.

Для надежной работы датчиков материал элементов, контактирующих с исследуемой средой, выбирают химически- и коррозионностойким: нержавеющей сталь, титановые сплавы, керамика и др.

Для корректной работы систем измерения давления необходимо тщательно выбирать конструктивное исполнение датчика. Датчики давления выпускаются

промышленностью в различных климатических исполнениях, соответствующих различным условиям измерений: температуры, влажности, давления и др.

Кроме того, для измерений давления на взрывоопасных объектах во взрывчатых и легковоспламеняющихся средах выпускаются датчики, имеющие взрывозащищенное исполнение.

Промышленно выпускаемые датчики имеют различные классы точности, допускаемая относительная погрешность не превышает 0,05...0,5 %. Выбор того или иного датчика определяется требованиями к точности измерительной системы в целом.

4.7 Проверка знаний для студентов

Проверка знаний студентов по данной теме проводится в виде теста.

1. Приборы, измеряющие давление выше атмосферного называют:

- a) Вакуумметрами
- b) Напоромерами
- c) Манометрами

2 Чувствительный элемент деформационного манометра

- a) Трубка Бурдона
- b) Мембрана
- c) Плунжер

3 Манометр с трубкой Бурдона используют

- a) Для агрессивных жидкостей
- b) Для вязких жидкостей
- c) Для воды

4. Чем заполняют корпуса манометров, установленных в системах с высокой вибрацией?

- a) Спирт
- b) Глицерин
- c) Вода

5. Для локального контроля давления используют

- a) Датчики давления
- b) Реле давления
- c) Манометры

6. Для управления и контроля порогового значения давления используют

- a) Реле давления
- b) Датчики давления
- c) Манометры

7 Датчики давления оснащены

- a) Диафрагмой
- b) Интегральным преобразователем
- c) Микропроцессором
- d) Сильфоном

8. В какой цвет окрашивают корпус манометра при измерении давле-

ния водорода?

- a) Голубой
- b) Темно-зеленый
- c) Белый

9. Для защиты приборов давления от высокой температуры используют:

- a) Вентилятор
- b) Устройство с фреоном
- c) Сифонную трубку

10. При сильной пульсации давления для сглаживания колебаний стрелки перед прибором устанавливают:

- a) Трубку с малым сечением
- b) Фильтр
- c) Дроссель

4.8 Контрольные вопросы

1. Какие существуют единицы измерения давления?
2. Как классифицируются средства измерения давления?
3. Как классифицируются манометры?
4. Что такое измерительный преобразователь давления и какие преобразователи вы знаете?
5. Что произойдет, если U-образный манометр соединить с полостью, давление в которой ниже атмосферного?
6. От чего зависит погрешность чашечного манометра?
7. Что является чувствительным элементом в деформационных приборах?
8. Назовите недостатки мембранных и сильфонных чувствительных элементов приборов.
9. Сравните коэффициенты преобразования мембраны, мембранной коробки, мембранного блока.
10. Основным критерий выбора деформационных преобразователей давления для измерений?
11. Выйдет ли из строя мембранный блок дифманометра, если перепад давления на нем превысит верхний предел измерения?
12. Почему в мембранном разделителе нельзя применять жесткую мембрану?
13. Что такое коэффициент запаса деформационного чувствительного элемента?
14. Что такое жесткость сильфона?
15. Где должен быть расположен манометр по отношению к месту отбора, если измеряемая среда - жидкость?
16. Можно ли дифманометром измерить давление, разрежение?
17. Какие электрические датчики давления вы знаете?

18. На чем основан принцип действия пьезоэлектрических датчиков давления? Емкостных датчиков давления?
19. Что лежит в основе работы тензорезисторных преобразователей?
20. Какие существуют тензорезисторные преобразователи?
21. Принцип действия грузопоршневого манометра?
22. Область применения грузопоршневых манометров?

5 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ПАРА

5.1 Классификация методов измерения расхода и количества

Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара, связанное с оперативным контролем, регулированием и управлением технологическими процессами в промышленности, является определяющим звеном при оценке эффективности работы агрегата и предприятия в целом. В практике металлургической теплотехники наиболее часто требуется определение объемных или массовых количеств G_V (кг), G_M (кг) и расходов вещества Q_V (м³/с); Q_M (кг/с).

Количество вещества, прошедшее за определенный промежуток времени, определяют изменением значения, измеренного в единицах определяемой физической величины. Расход вещества устанавливают величиной количества вещества в единицу времени. Приборы, измеряющие количество вещества, протекающее через поперечное сечение трубопровода за определенный промежуток времени, называют *счетчиками количества*. Количество вещества определяется в них разностью показаний счетчика в начале и конце этого промежутка времени.

Расходомерами называют приборы, определяющие количество вещества, протекающее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Расход иногда определяют по показаниям счетчиков как средний между двумя отсчетами. Имеются расходомеры со счетчиком, которые позволяют одновременно измерять расход и количество вещества.

Наиболее информативным является измерение массового расхода, так как объемный расход зависит от условий измерений и параметров измеряемой среды. Между объемными и массовыми величинами существует зависимость, определяемая соотношениями:

$$Q_M = \rho Q_V, Q_M = G_M/\tau ; Q_V = G_V/\tau ; \quad (21)$$

где τ – интервал времени измерения; ρ – плотность измеряемой среды.

Сопоставимость результатов измерения расхода в условиях изменяющихся параметров среды обеспечивают приведением рабочих условий измерения к нормальным. В этом случае расход называют объемным расходом, приведенным к нормальным условиям. В промышленной практике нормальными условиями считаются температура $t_H = 20^0\text{C}$, давление $P_H = 101325$ Па и относительная влажность $\varphi = 0$.

Помимо деления всех устройств для измерения вещества на два больших класса объемных и массовых измерителей, представленных счетчиками и расходомерами, существует классификация их методов измерения по тем физическим законам, которые лежат в основе принципа действия этих устройств.

Существуют устройства, реализующие следующие методы измерения:

- метод переменного и постоянного перепада давления (дросселирующие устройства и расходомеры обтекания);
- метод скоростного напора (напорные трубки);
- переменного уровня (щелевые расходомеры);
- электромагнитные;
- тепловые;
- тахометрические;
- инерциальные;
- ультразвуковые;
- оптические;
- маркерные и другие методы.

Общая классификация методов и средств измерения расхода и количества газов, жидкостей и пара, выполненная на основе учета их принципа действия, представляется следующим образом:

- расходомеры переменного перепада давления, первичным преобразователем информации у которых являются сужающее устройство, гидравлическое сопротивление, напорное устройство, центробежный и струйный преобразователь.

Принцип действия преобразователей с сужающим, напорным устройством и гидравлическим сопротивлением основан на зависимости величины перепада статического давления, возникающего в преобразователе, от расхода. Центробежные преобразователи реализуют принцип изменения давления, возникающего на закруглении трубопровода, от расхода. Струйные реализуют принцип изменения перепада давления, образующегося при ударе струи, от расхода;

- расходомеры переменного уровня, принцип работы которых основан на зависимости уровня в расходомере при свободном истечении среды через отверстие от расхода;

- расходомеры обтекания, основанные на зависимости положения чувствительного элемента, воспринимающего динамическое давление потока, от расхода;

- тахометрические расходомеры, реализующие зависимость скорости движения чувствительного элемента расходомера, установленного в потоке, от расхода. Эта группа включает: объемные (камерные) расходомеры, отмеряющие при движении определенные объемы среды (шестеренные, поршневые, роторные, винтовые, турбинные и шариковые);

- электромагнитные расходомеры, реализующие зависимость взаимодействия электропроводной среды с магнитным полем от расхода;

- ультразвуковые расходомеры, основанные на зависимости частоты колебаний от расхода;

- вихревые расходомеры, принцип работы которых связан с зависимостью частоты колебаний при вихреобразовании в потоке от расхода;

- тепловые расходомеры, преобразующие с помощью теплового преобразователя скорость потока в температуру и использующие зависимость этой температуры от расхода;

- оптические расходомеры с лазерным преобразователем, принцип

действия которых реализует зависимость скорости прохождения светового пучка от расхода среды;

- ионизационные расходомеры используют искусственную ионизацию потока среды и измеряют ионизационный ток, величина которого зависит от расхода среды;

- меточные расходомеры реализуют зависимость времени прохода искусственно созданной внутри потока метки участка трубопровода от расхода. В зависимости от способа введения метки в поток различают радиоактивные, ионизационные, химические, тепловые, магнитные, оптические, ядерно-магнитные и другие меточные расходомеры.

Основные термины, понятия и определения в области измерения расхода и количества устанавливаются ГОСТ 15528-86.

5.2. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые (или акустические) расходомеры – это приборы, основанные на измерении зависящего от скорости потока измеряемой среды (расхода) эффекта, возникающего при прохождении акустических колебаний через поток жидкости или газа. Существующие ультразвуковые расходомеры очень разнообразны как по устройству первичных преобразователей, так и по применяемым измерительным схемам. В наиболее общем виде ультразвуковые расходомеры разделяются на:

- основанные на перемещении акустических колебаний движущейся средой;

- основанные на измерении разности времен прохождения акустических колебаний по потоку и против него;

- времяимпульсные;

- частотные;

- фазовые:

- основанные на измерении степени отклонения колебаний от первоначального направления, направленные перпендикулярно потоку;

- основанные на эффекте Доплера.

Стоит также отметить длинноволновые расходомеры, работающие в звуковом диапазоне частот акустических колебаний, а также корреляционные и основанные на поверхностных волнах Лэмба.

В настоящее время наибольшее распространение получили расходомеры, основанные на измерении разности времен прохождения акустических колебаний по потоку и против него (рис. 26). Значительно реже встречаются ультразвуковые расходомеры других видов.

Ультразвуковые расходомеры относятся к СИ объемного расхода, так как определяют скорость движения потока жидкости или газа. Измерение массового расхода возможно путем добавления преобразователя, реагирующего на плотность измеряемого вещества.

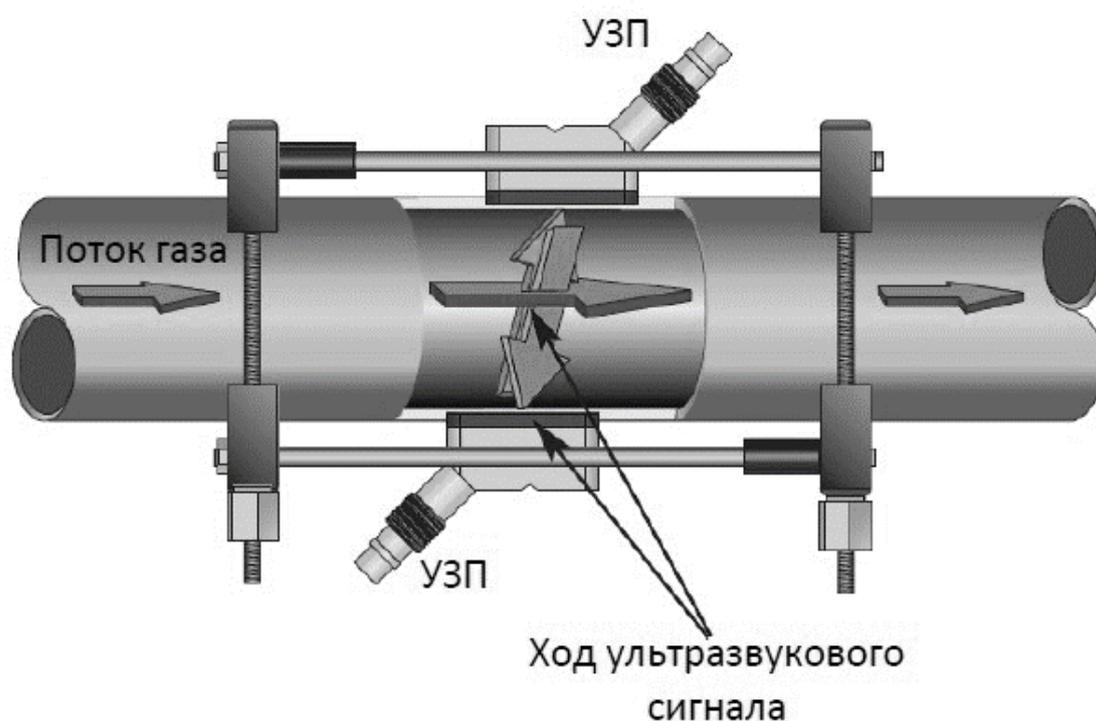


Рис. 26. Временимпульсный метод измерения расхода

Приведенная погрешность ультразвуковых расходомеров лежит в пределах от 0,1 до 2,5%, но в среднем может быть оценена цифрами 0,5–1%.

Ультразвуковые расходомеры могут использоваться на трубах любого диаметра, начиная от 10 мм. Для измерения расхода жидких веществ применяются частоты колебаний от 0,1 до 10 МГц. При измерении загрязненных веществ используются частоты от 10 кГц. Для измерения газа также применяют низкие частоты от 10 кГц.

Главным элементом первичных преобразователей (датчиков) являются излучатели и приемники ультразвуковых колебаний. В датчиках в подавляющем большинстве используются приемники/излучатели, основанные на прямом/обратном пьезоэлектрическом эффекте. Пьезоэлектрическим эффектом обладают вещества, относящиеся к сегнетоэлектрикам.

Максимальная эффективность пьезоэлемента достигается на собственной резонансной частоте. Резонансная частота пьезоэлемента зависит от толщины, а форма акустического поля от формы пьезоэлемента.

В зависимости от количества пьезоэлементов ультразвуковые расходомеры разделяются на:

- одноканальные – два пьезоэлемента, каждый по очереди выполняет функции излучения и приема;
- двухканальные – два излучателя и два приемника, образующих два независимых акустических канала, которые располагаются параллельно или перекрещиваются друг с другом;

5.3. Оптические расходомеры

Оптические расходомеры – это расходомеры, основанные на зависимости от расхода вещества того или иного оптического эффекта в потоке.

Оптические расходомеры разделяются на:

- доплеровские расходомеры (принцип работы основан на измерении разности частот, появляющейся при отражении светового луча движущимися частицами потока);

- расходомеры, основанные на эффекте Физо-Френеля (измеряется сдвиг интерференционных полос или частоты световых колебаний, связанный с зависимостью скорости света в движущемся прозрачном веществе от его скорости);

- особые оптические расходомеры;

- корреляционные оптические расходомеры;

- расходомеры, основанные на измерении времени перемещения на определённом участке пути оптической метки, введённой в поток.

Доплеровские оптические расходомеры являются основными среди рассматриваемых оптических приборов (рис. 27).

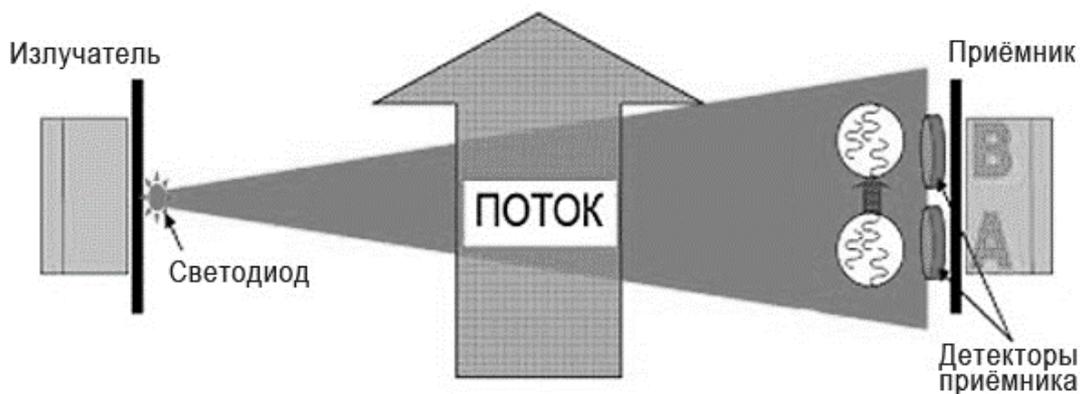


Рис. 27. Оптический расходомер

В основном они применяются для измерения местных скоростей жидкости и газа. Для измерения расхода они применяются реже, в отличие от приборов, основанных на принципе Физо-Френеля, которые предназначены только для измерения расхода. Оптические расходомеры обычно применяют в трубах небольшого диаметра.

Доплеровские расходомеры. Принцип действия расходомеров данного типа основан на измерении разности частот, возникающих при отражении светового луча движущимися частицами потока. Свет отражается (или рассеивается) от большого числа естественных или искусственных неоднородностей измеряемого вещества. Вследствие чего на приёмник будет поступать сигнал, содержащий случайные составляющие спектра, так как характер сложения амплитуд и фаз элементарных отражений случайный. Хотя мощность сигнала не велика, но этого достаточно для измерения доплеровского сдвига. Применяются различные схемы оптических расходомеров. Чаще всего источник излучения и фотоприемник располагаются на противоположных сторонах трубы, не-

смотря на то, что при этом требуется весьма жесткая опорная конструкция, обеспечивающая неизменность положения оптической системы. При необходимости всю систему можно расположить с одной стороны, но в этом случае потребуются более мощный источник излучения и более чувствительная измерительная схема, так как здесь на фотоприемник поступают отраженные лучи, направленные в сторону, противоположную движению потока, интенсивность которых в сотни и тысячи раз меньше лучей, отражаемых по направлению потока. Измерение доплеровского сдвига частоты при обычных скоростях основано на измерении частоты биений двух когерентных оптических сигналов, из которых один опорный, а другой рассеиваемый неоднородностями движущегося вещества.

5.4. Термально-массовые (тепловые) расходомеры

Тепловыми называются расходомеры, основанные на измерении зависящего от расхода эффекта теплового воздействия на поток или тело, контактирующее с потоком. Чаще всего их применяют для измерения расхода газа и реже для измерения расхода жидкости. Тепловые расходомеры различаются по:

- способу нагрева;
- расположению нагревателя (снаружи или внутри трубопровода);
- характеру функциональной зависимости между расходом и измеряемым сигналом.

Электрический омический способ нагрева является основным. Также в некоторых случаях возможен нагрев с помощью электромагнитного поля и с помощью жидкостного теплоносителя.

По характеру теплового взаимодействия с потоком тепловые расходомеры подразделяются на:

- калориметрические (при электрическом омическом нагреве нагреватель расположен внутри трубы);
- термоконвективные (нагреватель расположен снаружи трубы);
- термоанемометрические.

У калориметрических и термоконвективных расходомеров измеряется разность температур газа или жидкости (при постоянной мощности нагрева) или же мощность (при постоянной разности температур).

У термоанемометров измеряется сопротивление нагреваемого тела (при постоянной силе тока) или же сила тока (при постоянном сопротивлении). Термоанемометрические приборы для измерения местных скоростей потоков появились раньше остальных. Калориметрические расходомеры с внутренним нагревом, появившиеся позже, не получили заметного применения. Позднее стали разрабатываться термоконвективные расходомеры, которые благодаря наружному расположению нагревателя находят все более широкое применение в промышленности.

Термоконвективные расходомеры делят на квазикалориметрические (измеряется разность температур потока или мощность нагрева) и теплового пограничного слоя (измеряется разность температур пограничного слоя или соот-

ветствующая мощность нагрева). Они применяются для измерения расхода главным образом в трубах небольшого диаметра от 0,5–2,0 до 100 мм. Для измерения расхода в трубах большого диаметра находят применение особые разновидности термоконвективных расходомеров:

- парциальные с нагревателем на обводной трубе;
- с тепловым зондом;
- с наружным нагревом ограниченного участка трубы.

Достоинством калориметрических и термоконвективных расходомеров является неизменность теплоёмкости измеряемого вещества при измерении массового расхода.

Помимо этого, в термоконвективных расходомерах отсутствует контакт с измеряемым веществом, что также является их существенным достоинством. Недостаток и тех и других расходомеров – большая инерционность.

Для улучшения быстродействия применяют корректирующие схемы, а также импульсный нагрев. Термоанемометры в отличие от остальных тепловых расходомеров весьма малоинерционны, но они служат преимущественно для измерения местных скоростей.

5.5. Меточные расходомеры

Меточными называют расходомеры, основанные на измерении времени перемещения какой-либо характерной части (метки) потока на контрольном участке пути.

Меточные расходомеры могут быть с одним или двумя детекторами метки. В первом случае контрольное расстояние считается от места ввода метки до детектора, во втором – между двумя детекторами. Метку в потоке создают искусственным путем. Разновидности меток:

- ионизационные;
- радиоактивные;
- физико-химические;
- тепловые;
- оптические;
- ядерно-магнитные.

Соответственно различны будут устройства для создания метки и ее детектирования при прохождении ею контрольного участка пути. Радиоактивные, физико-химические и некоторые оптические метки создаются путем ввода в поток постороннего вещества-индикатора.

В большинстве остальных методов метка образуется в самом потоке без ввода постороннего вещества. Зачастую меточные расходомеры применяются не в качестве эксплуатационных приборов для непрерывного измерения, а для различных лабораторных и исследовательских работ, и, в частности, при калибровке и поверке других расходомеров.

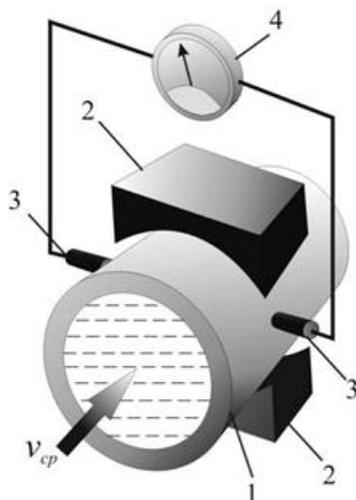
Погрешность измерения расхода у меточных расходомеров колеблется от $\pm 0,1$ до 3% в зависимости от рода метки, измерительной аппаратуры, способа детектирования и соответствия скорости перемещения метки средней скорости

потока. Наибольшая точность достигается при отсутствии необходимости в отборе проб в контрольных сечениях. Длина контрольного участка, в зависимости от рода метки, может быть, от нескольких миллиметров до нескольких километров.

5.6. Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные расходомеры – это расходомеры, в основе работы которых лежит взаимодействие движущейся электропроводной жидкости с магнитным полем, подчиняющейся закону электромагнитной индукции.

Наиболее часто применяют такие электромагнитные расходомеры, у которых измеряется электродвижущая сила (ЭДС), индуктируемая в жидкости, при пересечении ею магнитного поля (рис. 28). Для этого между полюсами магнита или электромагнита устанавливают участок трубопровода, который изготовлен из немагнитного материала и внутри покрыт неэлектропроводной изоляцией, вводятся два электрода в направлении, перпендикулярном как к направлению движения жидкости, так и к направлению силовых линий магнитного поля.



1 – трубопровод; 2 – катушки индуктивности; 3 – электроды;
4 – измерительный прибор

Рис. 28. Электромагнитный расходомер:

Электромагнитный расходомер является по существу генератором, в котором проводником, перемещающимся в магнитное поле, служит электропроводная жидкость. Проводимость жидкости должна быть не ниже 10^{-5} – 10^{-6} Ом, что соответствует проводимости водопроводной воды.

Существенные и основные недостатки электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем:

- возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации затрудняют или делают невозможным правильное измерение ЭДС, индуктируемой магнитным полем в движущейся жидкости;
- трудность усиления напряжения постоянного тока.

В связи с этим расходомеры с постоянным магнитным полем применяют лишь при измерении расхода жидких металлов, пульсирующих потоков жидко-

сти и при кратковременных измерениях, когда поляризация не успевает оказать заметного влияния.

5.6. Проверка знаний для студентов

Проверка знаний студентов по данной теме проводится в виде теста.

1. В каких единицах измерения количества вещества

- a) $\text{м}^3 \cdot \text{см}^3$
- b) Паскаль
- c) Ньютон
- d) Канделах
- e) Люксах

2. Какие расходомеры измеряют массовый расход

- a) массовые
- b) ультразвуковые
- c) электромагнитные
- d) гидравлические
- e) пневматические

3. Для целей автоматического контроля, регулирования давления используют

- a) седиграфы
- b) различные средства измерения давления
- c) радиографы
- d) осцилографы
- e) омметры

4. На чем основана работа вихревых расходомеров

- a) поток жидкости обтекает препятствие
- b) измерение дифференциального давления
- c) переноса тепла потоком жидкости
- d) измерение расхода вещества
- e) измерение электрического напряжения

5. На каком законе основан принцип действия электромагнитных расходомеров

- a) силы трения
- b) на использовании закона электромагнитной индукции
- c) механики
- d) статики
- e) кинематики

5.7. Контрольные вопросы

1. Сравните по точностным показателям и диапазону применения различные расходомеры: объемные, переменного уровня, обтекания, переменного перепада давления, тахометрические, вихревые, электромагнитные, ультразвуковые.
2. Достоинства и недостатки различных расходомеров:
 - тахометрических;
 - на основе сужающих устройств и дифманометров;
 - ротаметров;
 - электромагнитных расходомеров;
 - ультразвуковых расходомеров на основе эффекта Доплера и корреляционных.
3. Особенности построения расходомеров с вычислением массы (счетчики газа) или вычислением теплоты (теплосчетчики).
4. Особенности измерения расхода для вязких и сыпучих сред, для стоков с незаполненным коллектором.
5. Назовите фирмы, выпускающие промышленные средства измерения расхода.
6. Каковы тенденции развития средств измерения расхода для современных микропроцессорных систем автоматизации?

6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

6.1. Механические средства измерения

Измерение геометрических размеров, формы и показателей качества поверхности осуществляется с помощью механических и оптико-механических средств линейных и угловых измерений.

К механическим средствам измерения длины общего назначения относятся штангенприборы, штриховые и концевые меры длины, микрометрические приборы и измерительные головки. Выбор способа определения длины определяется необходимой степенью точности и условиями эксперимента.

Штриховыми мерами длины называются меры, у которых размер, выраженный в единицах длины, определяется расстоянием между осями двух соответствующих штрихов. Штриховыми мерами являются измерительные линейки, рулетки, брусковые штриховые меры. Для непосредственного измерения длины широко применяется масштабная линейка с сантиметровыми и миллиметровыми делениями.

Ценой деления любого прибора называется длина наименьшего деления. Для масштабной линейки она обычно составляет 1 мм. При измерении максимальная ошибка не превосходит половины цены деления шкалы, поэтому точность измерения масштабной линейкой не превышает, таким образом, половины цены деления, т.е. 0,5 мм.

Брусковые штриховые меры длины представляют собой металлические или стеклянные бруски различного сечения, с нанесенными на них штрихами или шкалами. Эти меры применяются как для непосредственного измерения линейных размеров, так и в качестве шкал приборов и станков.

Основные типы, параметры и размеры брусковых штриховых мер стандартизованы. Промышленностью выпускаются брусковые меры с номинальной длиной 60... 2000 мм. Допускаемые отклонения от номинальной длины нормируются шестью классами точности, обозначаемыми условно цифрами от 0 до 5. Наименьшая цена деления брусковых мер длины 0,01 мм.

Плоскопараллельные концевые меры длины (ПКМД) воспроизводят единицу длины одного фиксированного размера и выполняются в виде прямоугольного параллелепипеда из стали или твердого сплава с двумя взаимно параллельными измерительными поверхностями. Расстояние между измерительными поверхностями определено с высокой точностью и известно (рис. 29).

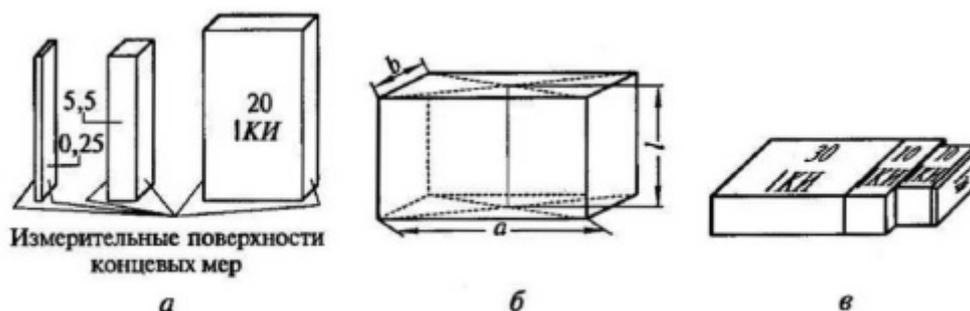


Рис. 29. Плоскопараллельные концевые меры длины

Измерительные поверхности отличаются от других поверхностей меры малой шероховатостью, благодаря чему ПКМД обладают свойством притираемости, т.е. способностью измерительной поверхности одной меры плотно сцепляться с измерительной поверхностью другой меры. Притираемость обусловлена силами молекулярного взаимодействия поверхностей.

ПКМД выпускаются в наборах с числом мер разного номинала от 10 до 112. Номинальные значения мер стандартизованы, поэтому притираемость мер позволяет собрать из них блок необходимой длины (от 0,1 до 1000 мм). В зависимости от точности изготовления ПКМД относят к классам точности 00;01;0;1;2;3.

Перед притиркой, выбранные для составления блока меры, очищают от смазки, промывают бензином и вытирают насухо чистой салфеткой. После этого прикасаться руками к измерительной поверхности нельзя.

Подготовленные таким образом меры притирают путем прикладывания или надвигания одной меры на другую. Для удобства пользования мерами, к наборам ПКМД поставляются наборы принадлежностей.

Если необходимо произвести измерения с большей точностью, пользуются приборами, снабженными нониусами. Точность приборов в этом случае 0,1...0,01 основного деления.

Средства линейных измерений, объединенные общим принципом построения отсчетных устройств, основанным на применении линейного нониуса называют штангенприборами. В зависимости от назначения различают штангенциркули, штангенглубиномеры, штангенрейсмасы.

Штангенциркуль – универсальное средство измерения длины, диаметров валов и отверстий, глубины отверстий и расстояний между центрами отверстий.

Принцип построения нониуса заключается в совмещении соответствующих штрихов двух линейных шкал, интервалы деления которых отличаются на определенную величину. В общем случае штангенциркуль (рис. 30) состоит из штанги с неподвижной измерительной губкой и рамки, перемещающейся по штанге, с другой измерительной губкой.

На штанге нанесена шкала с ценой деления 1 мм. На скосе рамки нанесена вспомогательная шкала, называемая нониусом, с ценой деления 0,9 мм, по которой отсчитываются дробные доли миллиметра. Нониусом называется не-

большая дополнительная шкала к обычному масштабу, позволяющая увеличить точность в 10...20 раз.

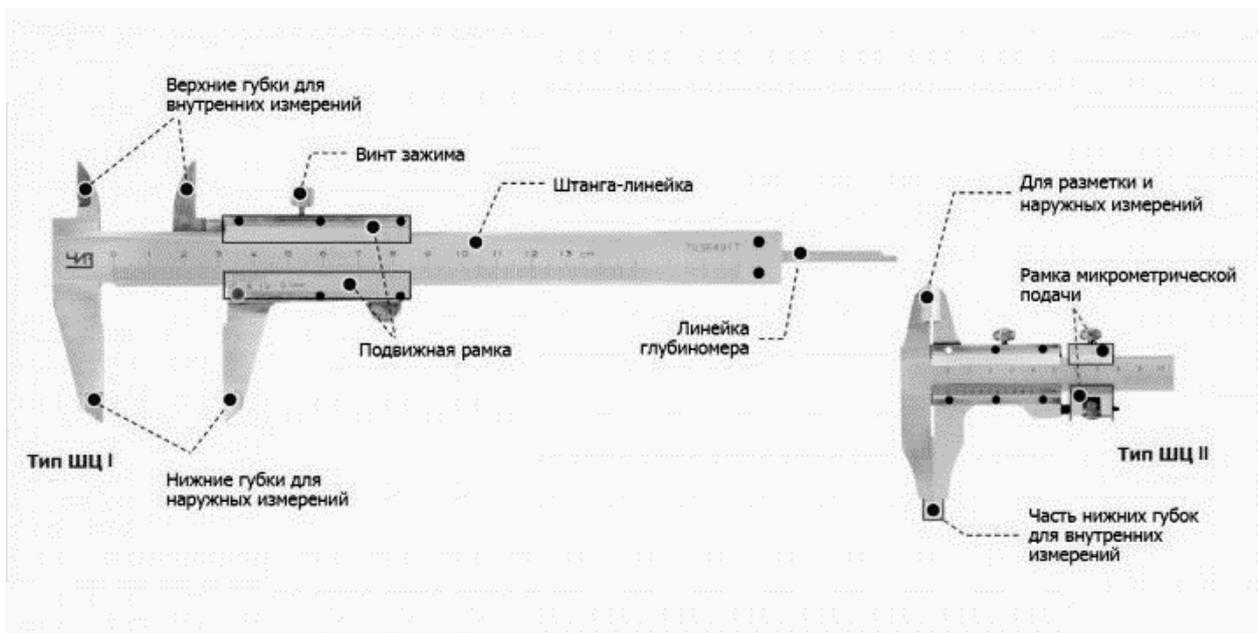


Рис. 30. Штангенциркуль

При совмещении нулевой отметки шкалы нониуса с нулевой отметкой шкалы штанги, первая за нулевой отметка шкалы нониуса оказывается смещенной относительно первой отметки шкалы штанги на 0,1 мм; соответственно вторая отметка шкалы нониуса будет смещена на 0,2 мм, а десятая на 1 мм, т.е. последняя отметка шкалы нониуса точно совпадает с отметкой 0,9 мм на шкале штанги.

Если при измерении размера шкала нониуса располагается так, что одна из отметок нониуса (не нулевая) совпадает с какой-либо отметкой шкалы штанги (не нулевой), то результат измерения определяется как сумма отсчетов по шкале штанги и произведения разности цены деления шкал штанги и нониуса на номер деления шкалы штанги, с которым совпала отметка нониуса. Так, измеренное значение на рис.2. будет равно $l = 7 + 0,1 \cdot 1 = 7,1$ мм. Таким образом, с помощью нониуса можно произвести отсчет размера с точностью до 0,1 мм. В штангенприборах часто применяется растянутый нониус, обеспечивающий отсчет размера до 0,05 мм.

В некоторых современных моделях штангенприборов вместо нониуса применяются индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Штангенглубиномер предназначен для измерения глубины отверстий, пазов и т.п.

Штангенрейсмасс - средство измерения высотных размеров изделий.

Микрометрические приборы (микрометры, микрометрические глубиномеры, микрометрические нутромеры) являются более точными, чем штангенприборы, и применяются для измерения малых размеров (толщины; радиусов проволоки и т. д.). Точность измерения с помощью микрометра 0,01...0,005 мм.

Принцип действия микрометрических приборов основан на преобразовании вращательного движения точного микрометрического винта, установленного в неподвижную гайку, в его поступательное движение вдоль оси. Большинство микрометрических приборов имеет винт с шагом 0,5 мм, поэтому поворот винта в гайке на 360° приводит к его перемещению вдоль оси на 0,5 мм.

Микрометр (рис. 31) состоит из скобы 1, с одной стороны которой запрессована неподвижная пятка 2, а с другой укреплена микрометрическая головка, состоящая из стебля 5, барабана 6 в сборе с микровинтом 3 и механизмом трещотки 7. При вращении барабана стебель совершает поступательное движение и приводится в контакт с измеряемым объектом. Механизм трещотки обеспечивает при этом постоянство измерительного усилия. Винт 4 фиксирует положение микровинта. Перемещение микровинта отсчитывается по двум шкалам: одной, нанесенной по длине стебля, и второй, нанесенной по окружности барабана. Деления на стебле нанесены через 0,5 мм, а на шкале барабана имеется 50 отметок. Таким образом, одно деление шкалы барабана соответствует перемещению микровинта на $0,5/50 = 0,01$ мм.

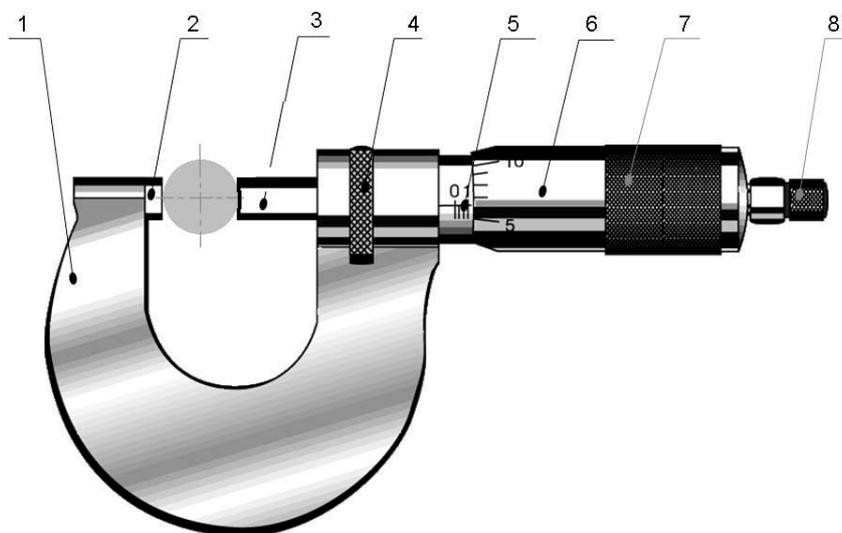


Рис. 31. Микрометр

Для микрометрических приборов установлены два класса точности (1 и 2). Предельно допускаемая погрешность микрометрических приборов зависит от диапазона измерения. Так, для микрометров с пределами измерения 0...25 мм, класса точности 1, погрешность прибора не превышает $\pm 0,002$ мм, а у микрометров для измерения длин в диапазоне 0...300 мм, не превосходит $\pm 0,005$ мм.

Для измерений линейных размеров прецизионных деталей микро-электроники и точного приборостроения выпускается настольный микрометр с цифровым электронным отсчетом, обеспечивающий измерения размеров в диапазоне 0.. 10 мм с погрешностью не более $\pm 0,002$ мм.

Индикаторы часового типа (рис. 32) с ценой деления 0,01 мм являются наиболее распространенными измерительными головками. Они предназначены для работы в цеховых условиях при выполнении измерительных и контрольных операций. Принцип действия индикатора основан на преобразовании с помощью рычажно-зубчатой передачи линейных перемещений измерительного стержня в угловое перемещение стрелок. Лицевую сторону индикатора образует круговая шкала, на которой нанесено 100 делений с ценой деления 0,01 мм и малая шкала с ценой деления 1 мм. Передаточное отношение рычажно-зубчатой передачи подобрано так, что перемещение измерительного стержня на 1 мм вызывает поворот малой стрелки на одно деление. Таким образом, при измерении отсчет по малой шкале дает перемещение измерительного стержня в миллиметрах, а сотые доли миллиметра отсчитываются по большой шкале.

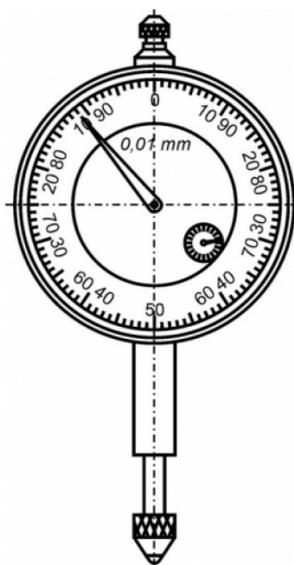


Рис. 32. Индикатор часового типа

Пределы измерения индикаторов определяются ходом измерительного стержня. Выпускаются индикаторы часового типа с пределами измерения от 0...2 мм до 0...25 мм. Допускаемая погрешность индикаторов нормирована двумя классами точности (0 и 1). Погрешность индикатора класса точности 0 с пределами измерения 0...2 мм не превосходит ± 10 мкм, а индикатора того же класса с пределами измерения 0...25 мм - не превышает ± 22 мкм.

Для закрепления индикаторов и установки измеряемых изделий поставляются вспомогательные приспособления: стойки, штативы, кронштейны. Для повышения точности измерения применяют многооборотные индикаторы, измерительный механизм которых обеспечивает получение цены деления 0,001 и 0,002 мм.

Наивысшую, среди механических средств измерения геометрических размеров, точность обеспечивают пружинные измерительные головки. Эти головки не содержат кинематических пар с внешним трением; в качестве же передаточного механизма от измерительного стержня к стрелке используется закрученная в разные стороны металлическая лента или пружина. К пружинным измерительным головкам относятся микрометры, микаторы, миникаторы и опти-

каторы. Допускаемая погрешность этих приборов оценивается величинами порядка десятых долей микрометра. Подробные сведения о механических средствах измерения можно найти в соответствующих стандартах и справочниках.

6.2. Оптико-механические средства измерения

Для измерения размеров очень малых тел, неразличимых невооруженным глазом, используются оптические приборы. Они снабжены шкалами так, что с их помощью можно измерять размеры с точностью до 0,001...0,0001 мм. Еще более точны интерференционные методы и метод электронного микроскопа, где точность достигает 10^{-8} мм. Наоборот, для измерения больших расстояний (например, дальности до цели в военном деле) применяются локационные методы. Познакомимся с некоторыми из перечисленных методов измерений.

Оптико-механическими называют средства измерения геометрических размеров, действие которых основано на использовании законов геометрической оптики (измерительные микроскопы, оптиметры) или явлений интерференции когерентных пучков света (интерференционные микроскопы, компараторы).

Распространенными приборами для линейных и угловых измерений в микроэлектронике и смежных отраслях являются измерительные проекторы и измерительные микроскопы.

Измерительные проекторы предназначены для проецирования теневого изображения (контура) изделий на экран и измерения их линейных и угловых размеров путем непосредственного сравнения теневого изображения с чертежом (исполненным в соответствующем масштабе) или вычерченным контуром изделия. Выпускаются проекторы с несколькими размерами экранов (от 250x250 мм, до 600x700 мм).

Стол проектора, на котором устанавливается изделие, имеет возможность перемещаться в продольном, поперечном направлениях и по вертикали. Перемещение стола отсчитывается по соответствующим шкалам с ценой деления 0,01...0,002 мм. Погрешность при измерении длин с помощью проектора не превышает $\pm(0,003...0,005)$ мм.

Некоторые типы современных проекторов снабжаются устройствами цифрового отсчета перемещения измерительного стола.

Измерительные микроскопы предназначены для измерений длин и углов различных деталей сложной формы в прямоугольной и полярной системах координат. Различают несколько типов микроскопов: малый микроскоп инструментальный; большой микроскоп инструментальный, а также универсальные микроскопы. Несмотря на конструктивные различия, принципиальная схема измерения во всех микроскопах общая - визирование различных точек деталей, перемещаемых для этого по взаимно перпендикулярным направлениям и измерение этих перемещений посредством микрометрических или иных отсчетных устройств. Для обеспечения лучшего визирования микроскопы снабжают сменными объективами различной степени увеличения.

Измерительный микроскоп состоит из основания, на котором укреплены две меры длины вдоль двух взаимно перпендикулярных осей координат, стола для закрепления измеряемого изделия и визирного микроскопа.

Измеряемое изделие устанавливается на столе микроскопа. Точки отсчета определяются по показаниям визирного микроскопа. При визировании ось микроскопа совмещается со штрихами на изделии или с его краями. Для этого перемещают стол с изделием или сам микроскоп относительно изделия. Перемещение соответствует измеряемой длине или расстоянию и определяется как разность между начальным и конечным положением стола. Для удобства работы выпускают измерительные микроскопы с цифровым отсчетом и внешней установкой показания на нуль. При отсчете начального показания от нуля результат измерения фиксируется на табло сразу, без пересчета.

На рис. 33 схематично изображена установка для измерения (точнее, контроля) длины методом компарирования. Контролируемый объект 2 длиной L_{cp} , сравнивается с нормалью (образцовой мерой) длиной $L_n \approx L_{pr}$. В исходном состоянии в перекрестье окуляров обоих микроскопов (3 и 4) находятся исходные точки O_N и O_{pr} , соответственно.

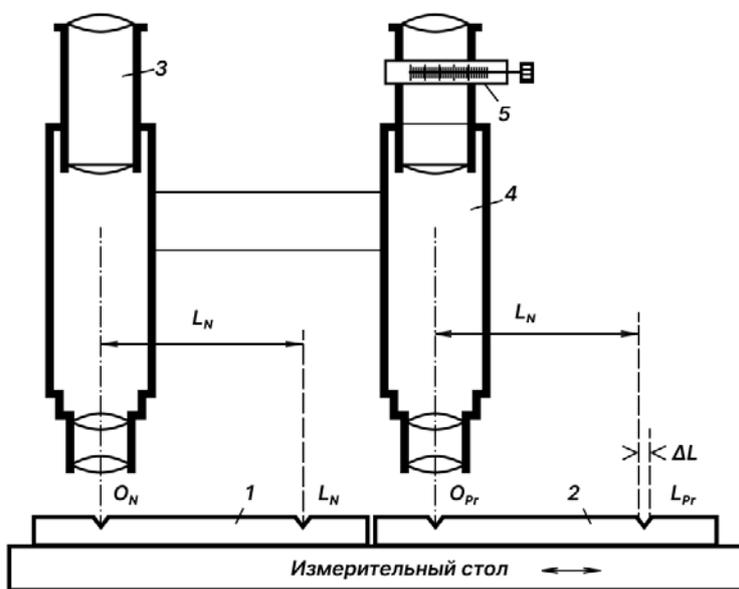


Рис.33. Компараторное устройство для контроля длины объекта: 1-нормальдлины; 2- контролируемый объект; 3, 4- окуляры микроскопов; 5- микрометрический винт

Смещением измерительного стола добиваются попадания в перекрестье окуляра левого микроскопа 3 конечной точки L_N нормы. Далее смещением микрометрического винта 5 окуляра правого микроскопа 4 с перекрестьем этого микроскопа совмещают конечную точку L_{pr} контролируемого объекта. По показаниям микрометрического винта определяют разницу ΔL длин и контролируемую длину:

$$L_{pk} = L_N + \Delta L \quad (21)$$

Для измерения малых перемещений, шероховатости поверхности, длин эталонных пластинок и др. с высокой точностью применяют интерферометры. Одним из таких устройств является двухлучевой интерферометр Майкельсона, схематично изображенный на рис. 34.

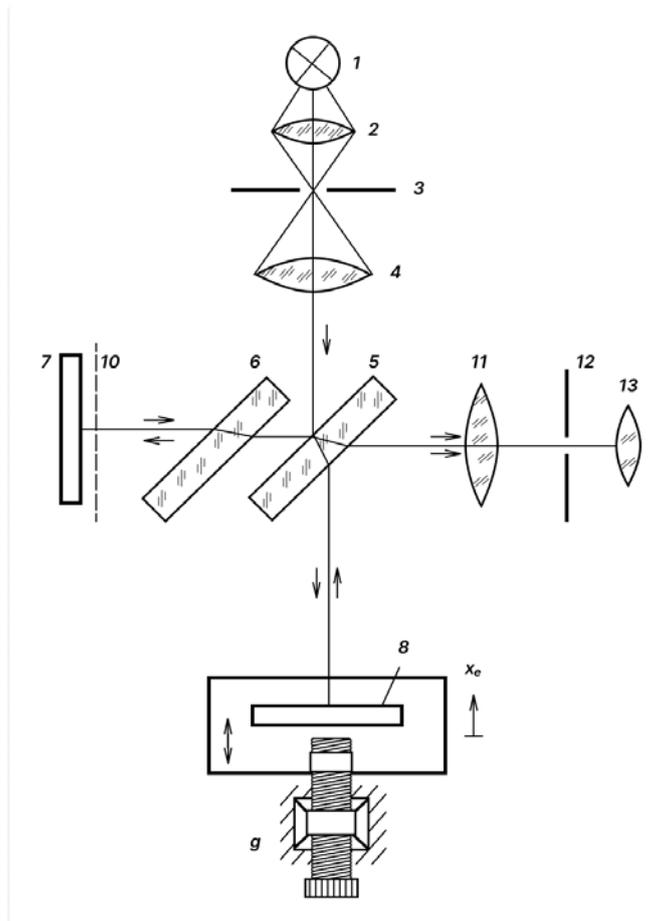


Рис. 34. Схема интерферометра Майкельсона: 1-лазер; 2-конденсатор; 3- диафрагма; 4-объектив; 5-полупрозрачная пластинка; 6-пластина для выравнивания хода луча; 7-неподвижное зеркало; 8-подвижное зеркало; 9- микрометрический винт; 10-мнимое изображение; 11-объектив; 12-диафрагма, 13-окуляр.

На объекте, перемещение X_e которого измеряют (перемещение происходит при вращении микрометрического винта 9), размещено зеркало 8. Излучение одночастотного лазера (длина волны λ) через конденсатор 2 (короткофокусную линзу), диафрагму 3 и объектив 4 передается на полупрозрачную пластинку 5, которой оно расщепляется на два луча. Один луч направляется на зеркало 8 объекта, а второй - на неподвижное зеркало 7.

Пластинка 6 предназначена для компенсации дополнительной разности хода, появляющейся за счет того, что луч в направлении к зеркалу 7 проходит один раз. После отражения от обоих зеркал и повторного прохождения через разделительную пластинку 5 лучи проходят через объектив 11 и интерфериру-

ют в его фокальной плоскости. Наблюдаемая через окуляр 13 интерференционная картина соответствует интерференции в воздушном слое между неподвижным зеркалом 7 и мнимым изображением 10 зеркала 8 в пластине 5. Перемещение объекта равно числу интерференционных полос, умноженному на $\lambda/2$ (дробная часть может быть определена по разностям фаз периодов в начале и конце интерференционной картины). Считывание числа интерференционных полос через окуляр 13 можно осуществлять фотоприемником со счетчиком, что позволяет выполнять измерения в цифровой форме.

6.3. Автоматизация координатных измерений

Для автоматизации измерения геометрических размеров объектов в машиностроении применяются координатно-измерительные машины (КИМ) различных типов с ручным и автоматизированным управлением. В состав системы измерений входят измерительные преобразователи (датчики), различающиеся по принципу действия (электроконтактные, индукционные, оптические, ёмкостные, пьезометрические, тензометрические) и выходному сигналу (аналоговые, дискретные) и способу измерения (контактные, бесконтактные).

Первые КИМ были разработаны в середине XX века, в 1970-х годах в Англии построена первая автоматическая КИМ.

Контрольно-измерительные машины используются в производстве для проверки размеров деталей и проверки качества сборки.

В состав координатно-измерительной машины входят:

- механическая часть;
- система зондирования;
- система управления и сбора данных.

Принцип работы координатно-измерительных машин (КИМ) основан на возможности измерения перемещения щупа относительно контролируемых объектов по трем пространственным осям X, Y, Z. Математический отсчет по измеренным точкам ведется в цифровой форме. Для проведения расчетов и формирования протоколов и графиков используется компьютер со специализированным программным обеспечением.

Основными конструктивными элементами КИМ являются:

- механическая часть, которая обеспечивает установку контролируемой детали и ее перемещение относительно системы ощупывания или наоборот, системы ощупывания относительно любой точки неподвижной детали;
- измерительная часть, которая измеряет и фиксирует координаты, в которых щуп касается точки объекта, полученные при перемещении стола или системы щупов по каждой из осей координатно-измерительной машины;
- система управления перемещениями подвижных органов КИМ и щуповой системы;
- система обработки результатов измерений.

Основными характеристиками для механической части КИМ являются габаритные размеры, форма и масса контролируемых деталей и имеющиеся воз-

возможности осязающей системы. По конструкции измерительная система может быть трех видов: консольная, порталная и мостовая.

Консольная конструкция позволяет производить установку и контроль детали наиболее простым способом, но в тоже время ее жесткость и координатные перемещения становятся меньше.

Портальная конструкция сочетает в себе портал и консоль, благодаря этому обеспечивается более высокая жесткость и большие координатные перемещения. При этом сохраняется удобство загрузки детали, так как во время загрузки портал можно отвести на расстояние от измеряемых деталей.

Мостовая конструкция состоит из консоли, располагающейся между двух передвижных колонн и имеющей наибольшую жесткость и наибольший размер перемещений по осям. Однако присутствие в мостовой конструкции боковых колонн ограничивает доступ к детали и снижает диапазон измерений.

Функции координатно-измерительной машины:

- измерение размеров деталей;
- измерения резьбы;
- измерения углов и др.

Координатно-измерительные машины производятся в широком диапазоне размеров и конструкций с различными видами зондов в различных конфигурациях.

Измерительная часть служит для измерения перемещений щупа или стола по трем осям рабочего пространства КИМ. Конструктивно она может быть фотоэлектрической, линейной или круговой, индуктивной, лазерной.

Выбор метода осязания (формы контактирующего элемента и принцип действия головки) зависит от множества факторов, связанных с деталью и задачей измерения. Применяемые щуповые головки по принципу действия делятся на механические, электроконтактные, индуктивные и др. Механические щупы жестко крепятся к подвижной пиноли и имеют различную форму: конусный наконечник применяют для определения расстояний между отверстиями; сферический – для измерения плоских цилиндрических или выпуклых поверхностей; плоские – для измерения выпуклых поверхностей; дисковые – для измерения глубоких поверхностей или внутренних канавок и т. д. В сочетании с жесткими наконечниками используются различные удлинители и крепежный кубик (сфера) на конце пиноли, обеспечивающий установку щупа в любом направлении. Жесткие щупы применяют при ручном осязании и управлении; измерительное усилие и положение контакта зависят от усилия рук. Отсчет производится при стабилизации показания на отсчетном приборе. Электроконтактные щупы основаны на использовании замыкания токовой цепи в момент контакта щупа с деталью. При этом выдается звуковой и световой сигнал на снятие отсчета. Такой щуп малонадежен и не применим при токонепроводящих деталях. Другим вариантом электроконтактного щупа является электроконтактный преобразователь, замыкающий или размыкающий электрические контакты во время касания.

Привод и управление КИМ определяют производительность, точность и удобство обслуживания. Ручной подвод пиноли к месту измерения применяется

в КИМ с малыми диапазонами измерениями. При этом возрастают погрешности из-за влияния температуры руки оператора и нестабильности измерительного усилия. При моторном приводе применяются два варианта управления – цифровое перфорационное через управляющие блоки и числовое управление через микро-ЭВМ, служащей для обработки измеренных значений.

В автоматизированных КИМ осуществляется автоматический ввод программы, автоматическое управление подвижными узлами КИМ, автоматическая обработка данных измерений и оценка результатов. Все эти задачи решаются путем составления программ для КИМ.

Портальная координатно-измерительная машина с щуповой системой изображена на рис. 35.

Область применения: входной контроль, контроль геометрических показателей качества (измерение регулярной геометрии и поверхностей сложной формы) в условиях действующего производства.

Применение координатно-измерительных машин на производстве способствует решению многих метрологических задач, таких как оперативное измерение геометрических размеров простых и сложных деталей, включая те детали, измерение которых традиционными способами требует дорогостоящей специальной оснастки или измерение которых невозможно вообще.



Рис. 35. Трехкоординатная измерительная машина

Кроме того, применение КИМ позволяет сокращать время на наладку станков ЧПУ за счет достоверного контроля первых обработанных деталей из последующей партии; исключать брак, используя постоянный контроль точности процесса обработки деталей и своевременно корректируя его.

6.4. Проверка знаний для студентов

Проверка знаний студентов по данной теме проводится в виде теста.

1. Допуск расположения, числовое значение которого не зависит от действительного размера нормируемого элемента, называется:

- a) независимый
- b) свободным
- c) нулевым

2. Что не относится к отклонениям поверхностей деталей:

- a) отклонения формы поверхности
- b) отклонение по весу детали
- c) величина шероховатости

3. Шероховатость поверхности – это:

- a) совокупность микронеровностей на поверхности детали
- b) совокупность дефектов на поверхности детали
- c) совокупность трещин на поверхности детали

4. Главная характеристика шероховатости в машиностроении – это:

- a) геометрическая величина неровностей
- b) количество неровностей
- c) отражающая способность

5. Техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и хранящие единицу физической величины, размер которой принимают неизменным – это...

- a) инструмент измерений
- b) единица измерений
- c) средство измерений

6. Какие средства измерений представляют собой совокупность измерительных преобразователей и отсчетного устройства:

- a) измерительные системы;
- b) измерительные установки
- c) вещественные меры;
- d) индикаторы;
- e) измерительные приборы

7. Калибры представляют собой ...

- a) устройства, предназначенные для контроля и нахождения в заданных границах размеров;
- b) средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера;
- c) средства измерения предназначены для определения действительных размеров.

8. Виды измерительных инструментов:

- a) штангенинструменты, микрометрические инструменты.

- b) штангенциркули, микрометры, оптиматоры.
- c) индикаторные головки, штангенрейсмусы.

6.5. Контрольные вопросы

1. Какие методы характерны для измерения геометрических величин?
2. Какова точность линейных измерений при использовании различных типов измерительных приборов?
3. Объясните, как измерить линейный размер объекта с помощью штангенциркуля?
4. Для каких линейных измерений применяют оптико-механические измерительные приборы?
5. Какова точность измерений с помощью КИМ?
6. Объяснить принцип координатных измерений.
7. Описать основные узлы КИМ.
8. Описать принцип работы КИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, испытания и контроль – основные методы оценки соответствия и управления качеством. Особенности их применения определяются задачами, которые решает предприятие при определении параметров производимой продукции.

Знания о методах и средствах контроля характеристик объекта необходимы для специалистов в области стандартизации, сертификации, управления качеством и эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, так как инструментальный контроль является наиболее целесообразным для получения объективной, полной и достоверной информации о параметрах исследуемого объекта.

Данное учебное пособие по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» состоит из нескольких частей, раскрывающих многообразие измерительных задач и видов измерений. В первой части пособия рассмотрены основные виды измерений, контроля и испытаний при производстве продукции. В следующих частях приведены основные средства измерений параметров качества продукции.

Приведённая в пособии информация поможет сформировать у студентов системное представление о средствах измерений, испытаний и методологии их использования в обеспечении качества продукции.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютная погрешность – погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины.

Входной контроль (верификация) - составная часть системы качества предприятия, целью которого служит контроль качества продукции поставщика для предупреждения запуска в производство материалов, несоответствующих установленным требованиям.

Вязкость (внутреннее трение) – способность металла поглощать энергию внешних сил при пластической деформации и разрушении (определяется величиной касательной силы, приложенной к единице площади слоя металла, подлежащего сдвигу).

Градуировочная характеристика – зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально.

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Дополнительная погрешность – составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального её значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений.

Действительное значение физической величины – значение физической величины, полученное экспериментальным путём и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Дифференциальный метод измерений – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами.

Задача испытания – получение количественных или качественных оценок характеристик продукции, т.е. оценивание способности объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях.

Значение физической величины – выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для неё единиц.

Измерение – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с её единицей и получение значения этой величины.

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) – функционально объединённая совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных уст-

ройств, предназначенная для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

Измерительная машина (ИМ) – измерительная установка крупных размеров, предназначенная для точных измерений физических величин, характеризующих изделие.

Измерительный прибор (ИП) – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительная задача – задача, заключающаяся в определении значения физической величины путём её измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений.

Измерительная система – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещённых в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

Измерительная установка (ИУ) – совокупность функционально объединённых мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте, например, установка для измерения характеристик транзистора, установка для измерения мощности в трёх-фазных цепях и др.

Измерительное устройство – часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение.

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

Контроль – процедура оценивания соответствия путём наблюдений и суждений, сопровождаемых соответствующими измерениями, испытаниями и калибровкой.

Метод измерений – приём или совокупность приёмов сравнения измеряемой физической величины с её единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

Нулевой метод измерений – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля.

Объект испытаний – продукция, подвергаемая испытаниям.

Объектами технического контроля являются материалы и полуфабрикаты, поступающие на предприятие со стороны, продукция предприятия как в готовом виде, так и на всех стадиях ее производства, технологические процессы, орудия труда, технологическая дисциплина и общая культура производства.

Операционный контроль, проводимый в процессе обработки изделий с целью проверки качества выполнения операций, своевременного выявления и изъятия брака, устранения дефектов.

Оптические расходомеры - это расходомеры, основанные на зависимости от расхода вещества того или иного оптического эффекта в потоке.

Основная погрешность – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях.

Относительная погрешность – безразмерная величина, определяющаяся отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой ФВ.

Погрешность результата измерения – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Пластичность – способность твердых тел необратимо деформироваться под действием внешних сил.

Прибор с емкостным датчиком – измерительное средство с электрическим преобразованием, в котором линейные (или угловые) перемещения преобразуются в изменения электрической ёмкости электрической цепи.

Прибор с индуктивным датчиком – измерительное средство с электрическим преобразованием, в котором линейные или угловые перемещения преобразуются в изменения индуктивности электрической цепи.

Приведённая погрешность средства измерения – погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всём диапазоне измерений или в части диапазона.

Приемочный контроль, выполняемый по окончании процесса изготовления изделий, деталей, сборочных единиц с целью определения соответствия качества требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Разрушающий метод контроля – обнаружение предельно допустимых базовых способностей объекта, с применением испытаний на контрольных образцах, до абсолютного разрушения последних.

Средство измерения – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Твердость – это сопротивление материала проникновению в него другого, более твердого тела.

Термометр – это прибор, применяемый для измерения температуры путем преобразования ее в показания или сигнал измерительной информации, являющийся известной функцией температуры.

Термоэлектрический термометр (ТТ) – это измерительный преобразователь, чувствительный элемент которого (термопара) расположен в специальной защитной арматуре, обеспечивающей защиту термоэлектродов от механических повреждений и воздействия измеряемой среды.

Технический контроль – проверка соблюдения технических требований, предъявляемых к качеству продукции на всех стадиях ее изготовления, а также производственных условий и факторов, обеспечивающих требуемое качество.

Ультразвуковые (или акустические) расходомеры – это приборы, основанные на измерении зависящего от скорости потока измеряемой среды (расхода) эффекта, возникающего при прохождении акустических колебаний через поток жидкости или газа.

Универсальные осциллографы – электронно-лучевые осциллографы, в которых исследуемый сигнал подаётся на вертикально отклоняющую систему, а горизонтальное отклонение осуществляется генератором развёртки.

Условия испытаний – совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при испытаниях.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ОТК – отдел технического контроля
БЦК – бюро цехового контроля
ВК – входной контроль
НТД – нормативно-техническая документация
СТО – стандарт организации
ТИ – технологическая инструкция
ЦЗЛ – центральная заводская лаборатория
НК – неразрушающий контроль
НМК – неразрушающий метрологический контроль
СИ – средства измерения
УВК – управляющий вычислительный комплекс
АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом
т.э.д.с. – термоэлектродвижущая сила
э.д.с. (ЭДС) – электродвижущая сила
ИП – источник питания
ТТ – термоэлектрический термометр
ПИ – пирометр излучения
ПСИ – пирометр суммарного (полного) излучения
ПЧИ – пирометр частичного излучения
ПСО – пирометры спектрального отношения
АЧТ – абсолютно черное тело
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
ДТ – преобразователи давления дифференциально – трансформаторного типа
LVDT – датчик - Linear Variable Differential Transformer — линейный дифференциальный трансформатор с переменным коэффициентом передачи
УЗП – устройство защиты от перенапряжений
ПКМД – плоскопараллельные концевые меры длины
КИМ – контрольно-измерительные машины

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: Учебник для студентов вузов. –М.: Академия, 2004.-311с.
2. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф.Папуловский, В.Н. Скуров: Под ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-352 с.
3. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. для студ. вузов по спец. “Автоматизация технологических процессов и производств”. –М.: Высш. шк. 1989.-456 с.
4. Датчики тепловых и механических параметров: Справочник в трех томах. Т.1 (кн. 1) / Под общ. ред. Ю.Н.Коптева; Под ред. Е.Е. Багдатьяна, А.В. Горша, Я.В. Малкова. –М.: ИПРЖР, 1998.-458 с.
5. Баранов И. Н. Создание полупроводниковых датчиков давлений на основе структуры "кремний на диэлектрике" // Автоматизация и управление в технических системах, 2005. - Вып. 24.
6. Бармин А.В. Радарные системы контроля уровня. //Современные технологии автоматизации. №4, 2002.
7. Белевцев А. и др. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие. //Современные технологии автоматизации. №2, 2004.
8. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. – М., Энергоатомиздат, 1992.
9. Государственный стандарт РФ ГОСТ 8.585-2001. Термодатчики. Номинальные статические характеристики преобразования. – Москва: Госстандарт России, 2001.
10. Гуртовцев А. Измерение давления в автоматизированных системах. //Современные технологии автоматизации. №4, 2001.
11. Жданкин В.К. Сигнализаторы изменения уровня. //Современные технологии автоматизации. №2, 2002.
12. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник.- 4-е изд., стер. –М.: Альянс, (гриф МО),2008.
13. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования – М.: Стандартинформ, 2007.
14. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.2-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2007.
15. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.3-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2007.
16. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.4-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств.

Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2007.

17. Белкин, И.М. Допуски и посадки (Основные нормы взаимозаменяемости): учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.

18. Васильев, А.В. Основы метрологии и технические измерения: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

19. Методика выполнения измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода: МИ 41-75. – М.: Изд-во стандартов, 1975.

20. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: В 2 книгах. Книга 1. / П.П. Кремлевский. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 409 с. – ISBN 5-7325-0709-4 – Текст: непосредственный.

21. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: В 2 книгах. Книга 2. / П.П. Кремлевский; Под общ. ред. Е.А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с. – ISBN 5-7325-0410-9 – Текст: непосредственный.

22. ГОСТ Р 8.615-2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемой из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2005 г. № 411-ст: введен впервые: дата введения 2006-03-01 / разработан ОАО «ГНЦ». – Москва: Стандартинформ, 2007. – 21 с. – Текст: непосредственный.

23. ПНСТ 360-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемой из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 сентября 2019 г. № 30-пнст: введен впервые: дата введения 2019-10-01 / разработан ФГУП «ВНИИР». – Москва: Стандартинформ, 2019. – 11 с. – Текст: непосредственный.

Учебное текстовое электронное издание

**Зотов Сергей Владимирович
Касаткина Елена Геннадиевна
Бережная Галина Андреевна**

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Ответственность за содержание возлагается на авторов
Издается полностью в авторской редакции

1,79 Мб
1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2023 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра технологии, сертификации и сервиса автомобилей
Библиотечно-информационный комплекс
e-mail: bik@magtu.ru