

ние и жесткость металлического контакта. М., «Наука», 1975. 76 с. с ил.

Методы повышения долговечности деталей машин. М., «Машиностроение», 1971. 272 с. с ил. Авт.: В. Н. Ткачев, Б. Н. Фиштейн, В. Д. Власенко, В. А. Уланов.

Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М., «Наука», 1977. 221 с. с ил.

Моталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев, «Техніка», 1971. 144 с. с ил.

Надежность и долговечность машин. Киев, «Техніка», 1975. 273 с. с ил. Авт.: Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бернадский и др.

Новые методы оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению. Пер. с англ. Под ред. Ю. Н. Работнова. М., «Мир», 1972. 439 с. с ил.

Олейник Л. В. Выносливость деталей машин. Киев, «Техніка», 1978. 214 с. с ил.

Павлов В. Г., Дроздов Ю. Н. Повышение долговечности узлов сухого трения. — «Вестник машиностроения», 1975, № 11, с. 34—37.

Петухов А. Н. Усталостная прочность материалов и элементов конструкций ГТД в условиях контактной коррозии трения. — «Проблемы прочности», 1972, № 2, с. 99—103.

Петухов А. Н. Методические особенности исследования процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материала. — «Заводская лаборатория», 1974, т. 40, № 10, с. 1246—1250 с ил.

Потак Я. М. Высокопрочные стали. М., «Металлургия», 1972. 208 с. с ил.

Проциков А. С. Надежность машин. М., «Машиностроение», 1978. 592 с. с ил.

Разрушение. Т. I. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. Пер. с англ. Под ред. А. Ю. Ишлинского. М., «Мир», 1973. 418 с. с ил.

Разрушение. Т. 4. Разрушение металлов. Пер. с англ. Под ред. М. Л. Бернштейна. М., «Металлургия», 1976. 496 с. с ил.

Романив О. Н., Зима Ю. В., Карпенко Г. В. Электронная фрактография упроченных сталей. (на укр. языке). Киев, «Наукова думка», 1974. 206 с. с ил.

Семенов А. П., Савинский Ю. Э. Металло-фторопластовые подшипники. М., «Машиностроение», 1976. 192 с. с ил.

Семенов А. П. Схватывание металлов. М., «Машгиз», 1958. 280 с. с ил.

Серенсен С. В. Сопротивление металлов усталостному и хрупкому разрушению. М., Атомиздат, 1975. 191 с. с ил.

Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев, «Наукова думка», 1979. 188 с. с ил. Авт.: Е. Л. Шведко, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун.

Сорокин Г. М. Влияние механических характеристик стали на ее абразивную износостойкость. — «Вестник машиностроения», 1975, № 5, с. 35—38 с ил.

Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. М., «Машиностроение», 1966. 331 с. с ил.

Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М., «Машиностроение», 1975. 271 с. с ил.

Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М., «Машиностроение», 1971. 264 с. с ил.

Трение, изнашивание и смазка. Справочник, кн. 2. Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. М., «Машиностроение», 1978. 400 с. с ил.

Тылкин М. А. Прочность и износостойкость деталей металлургического оборудования. М., «Металлургия», 1965. 347 с. с ил.

Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М., «Металлургия», 1971. 608 с. с ил.

Усталость и хрупкость металлических материалов. М., «Наука», 1968. 215 с. с ил. Авт.: В. С. Иванова, С. Е. Гуревич, И. М. Кошьеv и др.

Финкель В. М. Физика разрушения. М., «Металлургия», 1970. 376 с. с ил.

Фридман Я. В., Гордеева Т. А., Зайцев А. М. Строение и анализ изломов металлов. М., Машгиз. 1960. 128 с. с ил.

Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М., «Наука», 1970. 252 с. с ил.

Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания металлов. М., изд. АН СССР, 1960. 351 с. с ил.

Цесник Л. С. Механика и микрофизика истирания поверхности. М., «Машиностроение», 1979. 264 с. с ил.

Чичинадзе А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М., «Наука», 1967. 215 с. с ил.

Ямпольский Г. Я., Крагельский И. В. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. М., «Наука», 1973. 63 с. с ил.

Ясь Д. С., Подмоков В. В., Диденко Н. С. Испытания на трение и износ. Киев, «Техніка», 1971. 148 с. с ил.

## Глава II

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ

#### 1. Макроскопический анализ

##### Назначение

Макроанализ состоит в изучении строения металла путем осмотра его излома

или поверхности, специально подготовленной для этой цели, невооруженным глазом или через лупу при малых увеличениях ( $\leq 30$ ). Это позволяет наблюдать одновременно значительную часть поверхности и получить сведения об общем строении ме-

талла и о наличии в нем определенных пороков. Как правило, макроанализ позволяет выбрать участки изделия или образца, подвергающиеся в последующем более детально микроскопическому исследованию.

В зависимости от поставленной задачи поверхность, подлежащую макроанализу, осматривают в нетравленном виде или шлифуют и подвергают травлению специально подготовленными реактивами. Приготавливают макрошлиф следующим образом. Вырезанный из изделия образец грубо обрабатывают на строгальном станке, слесарным напильником или на наждачном точилье, а затем шлифуют поперек риска при помощи шлифовальной шкурки. От более грубой шлифовальной шкурки по мере исчезновения риска от предшествующих операций переходят к более мелкой. Иногда тонкое шлифование производят пастами ГОИ или металлическими пропарафиненными кругами с канавками, заливаемыми суспензией, состоящей из абразивов соответствующей зернистости. Для некоторых видов макрооптических исследований (глубокое травление, проба на серу) обработку поверхности шлифа заканчивают шлифованием грубой шкуркой. Выявление макроструктуры травлением растворами Гейна, персульфатом аммония и другими растворами солей и слабых кислот требует обработки тонкой шлифовальной шкуркой.

С помощью макроанализа можно определить различные дефекты литого, пластически деформированного и термически обработанного металла.

Исследование макроструктуры литого металла позволяет определить величину и форму усадочных раковин, усадочную рыхлость, ее протяженность и степень плотности металла, величину и форму ликвационной зоны, характер дендритной ликвации — форму, величину дендритов и их ориентировку, зоны первичной ликвации, газовые пузыри, макропоры, трещины и засоренность металла неметаллическими включениями. Макроисследование металла, подвергнутого обработке давлением (прокатке, ковке или штамповке), дает возможность обнаружить трещины, волосовины, закаты, флокены, распределение в металле серы и фосфора, а также неоднородность строения и линии сдвига в наклепанном металле. По макроструктуре металла, подвергнутого термической обработке или наплавке, можно наблюдать и измерить зоны термического влияния, зоны полной и неполной закалки, глубину цементации и обезуглероживания, протяженность наплавленного слоя и зоны сплавления.

### Способы макроанализа

В зависимости от состава сплава и задач, поставленных в исследовании, применяют следующие способы макроанализа:

1. Выявление дефектов, нарушающих сплошность металла. Для этих целей чаще применяют поперечные макрошлифы (темплеты). Выявление флокенов, строения литой стали, волокон катаной стали осуществляют

с помощью реактивов для глубокого и поверхностного травления. Состав некоторых реактивов для глубокого травления приведен в табл. II.1.

После травления макрошлиф приобретает рельефную поверхность с отчетливо видимыми осями дендритов (литая сталь), ликвационной зоной и трещинами.

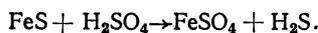
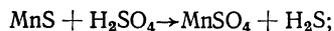
Для поверхностного травления чаще всего применяют реактив Гейна, содержащий на 1000 мл воды 53 г хлористого аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$  и 85 г хлористой меди  $\text{CuCl}_2$ . При погружении макрошлифа в реактив (на 30—60 с) происходит обменная реакция: железо вытесняет медь из водного раствора и она оседает на поверхности шлифа; на участках, недостаточно защищенных медью (поры, трещины, неметаллические включения), происходит травление. Затем макрошлиф извлекают, удаляют ватой под струей воды слой осевшей меди и протирают досуха для предохранения от быстрого окисления на воздухе. Этот реактив более отчетливо выявляет характер ликвации и полосчатость деформированной стали, но менее четко — структуру литого металла и трещины, особенно флокены.

Для выявления структуры литого металла и трещин более целесообразно использовать реактивы для глубокого травления (см. табл. II.1).

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

Распределение серы определяют следующим образом (способ Баумана). Фотографическую (бромосеребряную) бумагу на свету смачивают или выдерживают 5—10 мин в 5%-ном водном растворе серной кислоты и слегка просушивают между листами фильтровальной бумаги для удаления излишнего раствора. После этого на приготовленный макрошлиф укладывают фотографическую бумагу и осторожно, не допуская ее смещения, проглаживают рукой или резиновым валиком для удаления оставшихся между бумагой и макрошлифом пузырьков воздуха, так как эти пузырьки оставляют на фотобумаге белые пятна и вуалируют результаты анализа. Фотобумагу выдерживают на макрошлифе 10 мин.

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



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

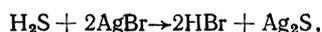


Таблица II.1

Реактивы для глубокого травления стали

Вид стали	Состав реактива			Количество воды, мл	Режим травления	
	HCl (плотность 1,2), мл	HNO <sub>3</sub> (плотность 1,5), мл	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , г		температура, °C	продолжительность, мин
Углеродистая, марганцовистая, хромистая, хромомолибденовая, хромованадиевая . . . . .	50	—	—	50	60—70	15—25
Остальные виды легированной стали (конструкционной и инструментальной) . . . . .	50	—	—	50	60—70	25—35
Ферритные и аустенитные стали, устойчивые против коррозии . . . .	1000	100	250	1000	60—70	30—40

в результате чего образуется сернистое серебро. Темные участки, образующиеся на фотобумаге, указывают форму и характер распределения включений сульфидов в исследуемой стали (или чугуне). Снятую с макрошлифа фотобумагу промывают под струей воды, фиксируют 20—30 мин в растворе гипосульфита, затем 10 мин промывают водой и фиксируют.

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

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

3. Определение неоднородности строения, созданной обработкой давлением (полосчатости). Направление волокон, созданное обработкой давлением, хорошо выявляется реактивом Гейна (85 г CuCl<sub>2</sub> и 53 г NH<sub>4</sub>Cl на 1000 мл воды), так как волокна металла и особенно их пограничные участки, отличающиеся по структуре и содержанию примесей, обладают неодинаковой травимостью.

4. Определение неоднородности в структуре, созданной термической и химико-термической обработками. Для определения толщины закаленного слоя образец ломают. Слой, получивший закалку, отличается по виду излома (он имеет более мелкозернистый, а при закалке без перегрева — фарфоровидный излом). Более точно толщину закаленного слоя определяют после шлифования образца по излому (перпендикулярно оси) и травления в течение 3 мин в 55%-ном растворе соляной кислоты при

80° С. Закаленный слой получает более темную окраску.

Для определения толщины цементованного слоя образец после цементации и закалки ломают. Наружный цементованный и закаленный слой имеет более мелкое зерно и при выполнении цементации и закалки без перегрева отличается матовым фарфоровидным (шелковистым) изломом. По толщине этого слоя судят о глубине цементации. Более точно толщину цементованного слоя определяют после шлифования образца по излому (перпендикулярно оси) и травления в реактиве, содержащем 2 г CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O и 1 мл HCl на 100 мл спирта, в течение 1—2 мин. Мягкая нецементованная сердцевина покроется красноватым налетом меди вследствие вытеснения ее железом из реактива, тогда как цементованный слой останется нетронутым.

При необходимости полного макроскопического исследования и определения как нарушений сплошности, так и дефектов строения целесообразно придерживаться следующей последовательности. Сначала осуществить травление реактивом Гейна, позволяющим выявить строение металла; полученные результаты зарисовать или сфотографировать. Затем образец снова отшлифовать и определить распределение серы по отпечатку на фотобумаге. После этого произвести глубокое травление для определения нарушений сплошности и флокенов.

## 2. Микроскопический анализ

Микроскопический анализ состоит в исследовании структуры материалов при больших увеличениях. В зависимости от требуемого увеличения для четкого наблюдения всех присутствующих фаз, их количества, формы распределения, т. е. структуры в целом, используют оптические или электронные микроскопы.

### Оптическая микроскопия

При использовании оптического микроскопа структуру металла можно наблюдать при общем увеличении от нескольких

десятков до 2000—3000 раз. При таком увеличении можно оценить элементы структуры, по размерам превышающие 0,2 мкм. Поскольку размеры большинства фаз превышают 0,2 мкм, оптические микроскопы широко используют на практике для исследования микроструктуры многих сплавов.

В задачи микроскопического исследования сплавов входит: определение величины и формы кристаллов, составляющих сплав; выявление структуры, сформировавшейся в сплаве в результате термической обработки; обнаружение микропорочков, нарушающих цельность сплава, и неметаллических включений; ориентировочное определение химического состава сплава и отдельных составляющих структуры.

Для изучения структуры сплавов приготавливают микрошлифы — специальные образцы, вырезанные из изделия и имеющие полированную гладкую поверхность, отражающую световые лучи. Деталь или образец небольших размеров можно после соответствующей подготовки поверхности установить непосредственно на столик микроскопа. При значительных размерах детали из различных ее участков вырезают специальные образцы. Так, например, при необходимости изучить структуру отливки образцы вырезают в различных ее сечениях (от максимальных до минимальных) перпендикулярно поверхности отвода тепла (это дает возможность установить микроструктуру поверхностных и срединных участков отливки). Структуру деталей после термической обработки проверяют по всему сечению; соответственно и изготавливают образцы для микроанализа. При исследовании причин разрушения различных деталей в процессе эксплуатации образцы для микроанализа вырезают вблизи места разрушения и в отдалении от него с тем, чтобы можно было определить наличие каких-либо отклонений в строении металла. Кроме того, изучают структуру в продольном и поперечном направлениях. Как правило, площадь поверхности микрошлифа не должна превышать 4 см<sup>2</sup>.

Микрошлифы неправильной формы или с размером меньше 10 мм в поперечнике для облегчения обработки закрепляют в специальном зажиме из двух пластин, которые можно при помощи винтов сближать и раздвигать; иногда их заливают специальными легкоплавкими сплавами с температурой плавления, не превышающей температуру видимых структурных изменений при нагреве материала образца. Для заливки образцов наиболее часто применяют сплав Вуда (50% Bi; 12,5% Cd; 25% Pb; 12,5% Sn) с температурой плавления 76°С, сплав Розе (52,5% Bi; 31,5% Pb; 16% Sn) с температурой плавления 96°С, свинец с температурой плавления 327°С. В последнее время образцы вместо заливки легкоплавкими сплавами иногда запрессовывают в пластмассы.

После получения плоской поверхности образцы шлифуют шлифовальной шкуркой различных номеров (последовательно от наиболее грубой до наиболее тонкой). Направление движения образца по шлифовальной шкурке или положению образца отно-

сительно направления вращения круга при смене сорта шкурки следует периодически изменять на 90° для удаления ранее возникших рисок, имеющих вид гребешков и впадин. При переходе к шлифовальной шкурке с более мелким зерном абразива глубокие риски сменяются все более мелкими.

Оставшиеся после шлифования мелкие дефекты поверхности удаляют полированием. Применяют механический, химико-механический и электрохимический способы полирования.

Механическое полирование проводят на вращающемся круге с натянутым или наклепанным полировальным материалом (фетр, бархат, или тонкое сукно), на который непрерывно или периодически наносят абразивные вещества с частицами очень малых размеров (оксид алюминия, оксид железа, оксид хрома и т. д.). Эти вещества предварительно взмучивают в воде, а затем покрывают ими круг. Полировальный круг должен быть влажным, а нажатие образца незначительным. Частота вращения круга диаметром 250 мм при полировании черных и цветных металлов должна составлять 400—600 мин<sup>-1</sup>.

В тех случаях, когда исследуемые шлифы металлов и сплавов имеют весьма высокую твердость или требуется изучить строение поверхностного покрытия, имеющего резко отличную твердость от твердости основного металла, рекомендуется применять полирование с помощью алмазного порошка. Предварительное шлифование образца проводят в обычном порядке и заканчивают на круге со шлифовальной шкуркой зернистостью 240. Затем готовят диск для полирования: 0,025 г алмазного порошка, частицы которого имеют в поперечнике не более 8 мкм, втирают в сухое тонкое сукно, натянутое на диск, после чего поверхность диска смазывают легким слоем парафина, а сам диск монтируют в полировальном станке; частота вращения круга составляет 200 мин<sup>-1</sup>.

Химико-механическое полирование проводят полировальным кругом, на котором вместе с абразивом нанесены химические вещества, способствующие ускорению полирования. Для полирования черных металлов применяют пасту ГОИ. Эта паста выпускается трех сортов по зернистости и состоит из окиси хрома, стеарина, керосина, олеиновой кислоты и соды. Для полирования цветных металлов применяют химически активные реактивы (например, раствор желтой кровяной соли), которые ускоряют процесс полирования, а в некоторых случаях выявляют также микроструктуру без последующего травления.

Электрохимическое полирование проводят в электролитической ванне, причем образец является анодом. Катодом обычно является пластинка из нержавеющей стали. Шлифованную поверхность образца устанавливают напротив катода. Состав электролита, а также плотность тока на аноде выбирают в зависимости от материала шлифа (табл. II.2).

Под действием тока выступы на шлифо-

Т а б л и ц а 11.2

Состав электролита и режимы электрохимического полирования некоторых металлов и сплавов

Металл или сплав	Состав электролита	Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	Температура, °С
Углеродистая сталь	1. Азотная кислота (плотность 1,48)	8—10	30
	2. 48% ортофосфорной кислоты, 40% серной кислоты, 12% воды	0,1—0,6	35—50
	3. 165 мл соляной кислоты, 765 мл уксусного ангидрида, 50 мл воды, 0,5% (по массе) алюминия	4—6	30
Легированная сталь	1. Азотная кислота (плотность 1,48)	8—10	30
	2. 54 мл соляной кислоты, 800 мл спирта, 146 мл воды	2—4	70
	3. 20% серной кислоты, 60% ортофосфорной кислоты, остальное вода	7—10	50—70
Аустенитная нержавеющая сталь	1. 38% ортофосфорной кислоты, 53% глицерина, 9% воды	0,2—2	20—115
	2. 60% серной кислоты, 30% ортофосфорной кислоты, 10% воды	20—30	20—25
Медь	1. 7,2% хромового ангидрида, 21,7% двухромовокислого натрия, 7% уксусной кислоты, 5,8% серной кислоты, 58,3% воды	2—4	60—75
	2. Ортофосфорная кислота	0,65—0,75	20—25
	3. Пирофосфорная кислота	8—10	20—25
Латунь и бронза	7,2% хромового ангидрида, 21,7% двухромовокислого натрия, 7% уксусной кислоты, 5,8% серной кислоты, 58,3% воды	2—4	60—75
	38% серной кислоты, 48% ортофосфорной кислоты, 14% воды	6—8	70—90
Алюминиевые сплавы	60% серной кислоты, 40% воды	0,2—0,4	25—40
Никелевые сплавы			

ванной поверхности растворяются (анодное растворение), в результате чего поверхность образца постепенно становится ровной (зеркальной).

Электрохимическое полирование более совершенно, чем другие способы полирования, ускоряет процесс полирования, позволяет полностью избежать изменений в структуре поверхностного слоя в связи с возможной деформацией (наклепом) и иногда выявляет особенности микроструктуры, не обнаруживаемые после механического полирования и химического травления.

После полирования независимо от принятого способа микрошлиф промывают водой, затем спиртом и просушивают фильтровальной бумагой.

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

Количество и характер распределения неметаллических включений определяются сравнением вида наблюдаемой поверхности микрошлифа при увеличении в 100 раз со специально разработанной шкалой баллов для неметаллических включений стали (ГОСТ 1778—70). Природа включений при

микроанализе стали может быть установлена травлением специальными реактивами и наблюдением за протравливаемостью и окраской, а также наблюдением шлифа в поляризованном и ультрафиолетовом свете. Оценку графитовых включений в металлической основе отливок из серых чугунов проводят по типовой шкале, установленной ГОСТ 3443—77. Включения графита оценивают по количеству, определяемому по площади, занимаемой графитом в поле зрения микроскопа, и характеру их распределения.

После просмотра нетравленного шлифа для более полного изучения структуры сплава шлиф травят. Существует несколько методов травления, различающихся по воздействию на поверхность металла.

Наиболее распространено травление методом избирательного растворения фаз. Метод основан на различии физико-химических свойств отдельных фаз и пограничных участков зерен. В результате различной интенсивности растворения создается рельеф поверхности шлифа. Если освещать шлиф падающим светом, то из-за присутствия косых лучей образуются теневые картины, по которым можно судить о структуре сплава. Этот метод травления позволяет установить не только структуру многофазных сплавов, но и структуру чистых металлов и твердых растворов. Зерна чистых металлов и твердых растворов имеют неодинаковую кристаллографическую ориентировку. Поэтому на приготовленную плоскость микрошлифа приходятся зерна, срезанные по разным кристал-

Т а б л и ц а 11.3

Реактивы для травления чугунных и стальных микрошлифов

Наименование	Состав	Применение
<i>Для выявления структуры углеродистых сталей и чугунов</i>		
Спиртовой раствор азотной кислоты (реактив Ржешотарского)	Азотная кислота (плотность 1,4 г/см <sup>3</sup> ) 1—5 мл, этиловый спирт 100 мл	Для выявления структуры углеродистой стали и чугуна, а также азотированной и цементованной сталей. Реактив окрашивает перлит* в темный цвет, выявляет границы зерна феррита, структуру мартенсита и продуктов отпуска То же
Спиртовой раствор пикриновой кислоты (реактив Ижевского) Раствор азотной и соляной кислот в глицерине	Пикриновая кислота (кристаллическая) 4 г, этиловый спирт 100 мл Азотная кислота (плотность 1,4 г/см <sup>3</sup> ) 10 мл, соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 20—30 мл, глицерин 30 мл	Для выявления структуры высокохромистой, быстрорежущей и аустенитной марганцовистой стали в закаленном состоянии
Царская водка	Соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 3 части, азотная кислота (плотность 1,4 г/см <sup>3</sup> ) 1 часть	Для выявления структуры нержавеющих сталей и сплавов. Перед применением реактив следует выдержать 20—30 ч
Щелочной раствор пикрата натрия	Пикриновая кислота 2 г, едкий натр 25 г, вода 100 мл	Для выявления цементита (окрашивается в темный цвет, карбиды хрома и вольфрама не окрашиваются). Применяют в кипящем состоянии
Щелочной раствор красной кровяной соли	Красная кровяная соль 10 г, едкий кали 10 г, вода 100 мл	Для выявления карбидов, содержащих хром и вольфрам, а также фосфидов в фосфидной эвтектике (окрашиваются в темный цвет). Применяют в горячем состоянии
<i>Для выявления границ зерен стали**</i>		
Реактив Марбле	20 г CuSO <sub>4</sub> , 100 мл соляной кислоты (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ), 100 мл этилового спирта	Для химического травления сталей аустенитного класса. При замене этилового спирта на такое же количество воды возможно электролитическое травление 10—15 с при напряжении на зажимах ванны 12—15 В
Раствор щавелевой кислоты	Щавелевая кислота 10 г, вода 90 мл	Для электролитического травления сталей мартенситного и аустенитного классов. Режим травления: напряжение на зажимах ванны 2—10 В, продолжительность травления 1—10 с
Раствор соляной и азотной кислот	Соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 10 мл, азотная кислота (плотность 1,4) 3 мл, этиловый спирт 87 мл	Для электролитического травления сталей аустенитного, мартенситного и мартенситно-ферритного классов. Режим травления: напряжение 5—12 В, плотность тока 0,6—0,8 А/см <sup>2</sup> , продолжительность травления до 10 с
Концентрированный раствор азотной и соляной кислот	Соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 50 мл, азотная кислота (плотность 1,4) 8 мл, вода 50 мл	Для электролитического травления сталей аустенитного класса. Режим травления: плотность тока 1 А/см <sup>2</sup> , напряжение 5—12 В, продолжительность травления 10 с

Наименование	Состав	Применение
Раствор хромового ангидрида	Хромовый ангидрид 15 г, вода 90 мл	Для электролитического травления сталей мартенситного класса. Режим травления: плотность тока 1—1,5 А/см <sup>2</sup> при 20°С или при подогреве до 50—70°С
Раствор пикриновой кислоты	Насыщенный раствор пикриновой кислоты в воде и 3—4% мочушей жидкости «Снитол»	Для химического травления (10—30 с при 20—70°С) сталей мартенситного и мартенситно-ферритного классов
Солянокислый раствор хлористой меди	Соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 40 мл, хлористая медь 5 г, вода 100 мл	Для выявления нитридов при дисперсионном твердении стали. Продолжительность травления до 10 с

\* При больших увеличениях (более 400—500) отчетливо обнаруживается, что перлит состоит из двух фаз — феррита и цементита.

\*\* Для выявления действительного или наследственного зерна аустенита углеродистых и низколегированных сталей применяют реактивы Ржешотарского и Ижевского.

Таблица II.4

Реактивы для травления микрошлифов из медных, алюминиевых и титановых сплавов

Наименование	Состав	Применение
<i>Для выявления структуры меди и медных сплавов</i>		
Солянокислый раствор хлорного железа	Хлорное железо 10 г, соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 25 мл, вода 100 мл	Для выявления микроструктуры меди, латуни, оловянной и алюминиевой бронзы, а также макроструктуры бронзы и латуни
Аммиачный раствор двойной соли: хлористой меди и хлористого аммония	Двойная соль 10 г, вода 100 мл, аммиак для получения нейтральной или щелочной реакции	Для выявления микроструктуры меди и ее сплавов, в частности двухфазных латуней
Раствор персульфата (надсернистого) аммония	Персульфат аммония 10 г, вода 90 мл	Для выявления структуры меди, латуни, оловянной бронзы
<i>Для травления алюминиевых сплавов</i>		
Плавиновая кислота	Плавиновая кислота (48%ная) 0,5 мл, вода 99,5 мл	Для выявления структуры дуралюминов и литых сплавов на алюминиевой основе
Едкий натр	Едкий натр 1—10 г, вода 99—90 мл	То же
Раствор кислот	Плавиновая кислота концентрированная 1 мл, соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 1,5 мл, азотная кислота (плотность 1,4) 2,5 мл, вода 95 мл	Для выявления микроструктуры сплавов типа дуралюмина
<i>Для травления титановых сплавов</i>		
Реактив блестящего травления	Плавиновая кислота (48%ная) 25%, азотная кислота (плотность 1,4 г/см <sup>3</sup> ) 25%, глицерин 50%	Плавиновая кислота действует на металл, азотная кислота удаляет пятна или осадки и тем самым придает блеск; глицерин действует как растворитель и стабилизатор

лографическим направлениям и имеющие в этих направлениях неодинаковые свойства. Под действием химически активной среды (растворов кислот, солей, щелочей) степень

травимости отдельных зерен на поверхности микрошлифа оказывается различной. Световой поток, направленный через объектив на микрошлиф, отражается от разных зе-

Таблица 11.5

Реактивы для электролитического травления шлифов

Наименование	Состав	Применение
Хлорное железо и соляная кислота	Хлорное железо 0,5%, соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 1%, метиловый спирт 98,5%	Для травления углеродистой стали. Плотность тока 0,05 А/см <sup>2</sup>
Соляная кислота	Соляная кислота (плотность 1,19 г/см <sup>3</sup> ) 10%, этиловый спирт 90%	Для травления высоколегированной стали (высокохромистой, быстрорежущей). Плотность тока 0,05 А/см <sup>2</sup>
Щавелевая кислота	Щавелевая кислота 2—10 г, вода 100 мл	Для выявления карбидов и основной структуры нержавеющей стали и никелевых сплавов. Напряжение 3—6 В, плотность тока 0,05—0,08 А/см <sup>2</sup>
Ортофосфорная кислота	Раствор ортофосфорной кислоты (плотность 1,5 г/см <sup>3</sup> )	Для выявления структуры сплавов меди (латуни, бронзы). Плотность тока 0,02—0,05 А/см <sup>2</sup>

рен неодинаково; на участках границ зерен возникает значительное рассеяние и отраженные лучи не попадают в поле зрения, поэтому по границам зерен возникают темные линии, которые и воспроизводят картину действительных стыков между зернами. Этот эффект в значительной мере возрастает также и потому, что по границам зерен сосредоточиваются многие примеси, имеющиеся в металле или сплаве; травимость по границам зерен вследствие образования гальванических пар увеличивается, и темные линии, указывающие на границы зерен, выступают весьма отчетливо.

В сплаве, имеющем две или несколько фаз, эти фазы различаются по величине электрохимического потенциала; поэтому зерна каждой фазы имеют различную травимость. Вследствие наличия косых световых лучей выступающие фазы отбрасывают тень на более сильно протравленные и расположенные ниже фазы, в результате чего образуются теневые картины. Этот эффект усиливается из-за рассеяния лучей, отраженных более глубоко расположенными и более сильно протравленными фазами.

Для травления микрошлифов применяют различные реактивы; состав наиболее часто используемых реактивов представлен в табл. 11.3 и 11.4.

Микрошлиф погружают полированной поверхностью в реактив выбранного состава и через некоторое время извлекают. Продолжительность травления зависит от состава изучаемого сплава и состава раствора и легко устанавливается экспериментально. Если после выдержки в реактиве полированная поверхность микрошлифа окажется слегка матовой, травление считается законченным, и шлиф сразу же промывают водой, затем спиртом и высушивают фильтровальной бумагой. Если же после выдержки в реактиве поверхность шлифа сохраняет блестящий вид или структура сплава не выявляется отчетливо, микрошлиф вновь погружают в реактив и дополнительно выдерживают.

Шлифы можно травить и электролитическим методом. При этом анодом является

микрошлиф, а катодом — пластинка из нержавеющей стали или свинца, реже — угольный стержень. В табл. 11.5 приведены наиболее часто применяемые реактивы для электролитического травления.

Реже применяют травление микрошлифов методом окисления. Подготовленный шлиф нагревают в окислительной атмосфере, вследствие чего на разных фазах образуется неодинаковая по толщине и составу пленка, что создает различное окрашивание. Если при выбранной температуре нагрева на воздухе нельзя получить оксидной пленки достаточной толщины, эффект окисления усиливают, помещая на поверхность микрошлифа кристаллики такого сильного окислителя, как бихромат калия ( $K_2Cr_2O_7$ ).

Подготовленные микрошлифы рассматривают в отраженном свете в металлографическом микроскопе. Металлографический микроскоп состоит из следующих систем: оптической, осветительной с фотографической аппаратурой и механической. В отечественной практике наиболее часто применяют вертикальные микроскопы типа МИМ-7 и ММР-2 и горизонтальные типа МИМ-8, МИМ-8М и Нефот-2 (фирмы К. Цейсс, ГДР). Все эти микроскопы позволяют вести исследования в темном или светлом поле при вертикальном или косом освещении, а также в поляризованном свете. В отличие от других микроскопов металлографический микроскоп Нефот-2 снабжен приставкой для измерения микротвердости и приспособлением для интерференционного наблюдения и контроля состояния поверхности.

### Электронная микроскопия

Использование электронных лучей с малой длиной волны позволяет заметно увеличить разрешающую способность оптической системы. Теоретически в электронном микроскопе можно достигнуть разрешающей способности системы в 100000 раз больше, чем в оптическом. Однако в действительности вследствие ряда явлений, сопутствующих прохождению потока электронов, максимальная разрешающая способность электронно-

го микроскопа оказывается лишь в 100—200 раз больше разрешающей способности оптического. Таким образом, максимальное увеличение электронного микроскопа достигает 100000—200000 раз.

Современный электронный микроскоп состоит из источника электронов — электронной пушки, в которой не только происходит эмиссия электронов, но и достигается увеличение их скорости за счет приложенного напряжения. Электроны вылетают при нагреве вольфрамовой спирали, являющейся катодом. Между спиралью и катодом, находящимся на небольшом расстоянии, создается мощное электрическое поле, необходимое для повышения скорости движения электронов. Анод представляет собой пластинку с отверстием посередине. Электроны проходят через отверстие и через расположенные ниже конденсорные линзы (в электростатических микроскопах конденсорные линзы отсутствуют). Затем поток электронных лучей попадает на объект. В зависимости от метода исследования объекта применяют электронные микроскопы различных конструкций:

просвечивающие, в которых поток электронов проходит через объект; получаемое изображение является результатом различного рассеивания электронов на объекте;

отражательные, в которых изображение создается электронами, отраженными от поверхности объекта;

эмиссионные, в которых изображение создается поверхностью, светящейся под действием электронов;

растровые, в которых изображение создается за счет вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов.

Ниже приведены типы и характеристики электронных микроскопов, получивших наибольшее распространение:

Тип	Разрешающая способность, Å	Максимальное увеличение, раз
УЭМВ-100К	8	200000
ЭМВ-100Л	3	400000
УЭМВ-150	5	150000
ЭМ8	5-6	200000
ЭМ9	35	140000
ЭМ114	120	100000

Применяют и микроскопы японских фирм «Джеол» и «Хитачи»: JEM-100В (разрешающая способность 2 Å и увеличение до 500000 раз), JEM-100V и JEM-200A (разрешающая способность 3—4 Å и увеличение до 200000 раз), Хитачи-200F, а также Чехословацкой фирмы «Тесла» (модель В613).

Результаты электронно-микроскопического исследования в значительной степени зависят от качества приготовления специальных объектов — тонких металлических пленок (100—2000 Å) или реплик (слепков) с поверхности металлического шлифа.

Наиболее часто тонкие пленки готовят растворением (утонением) массив-

ных металлических образцов после их механической обработки в результате электролитического полирования. Обычно образец электролитически полируют до тех пор, пока в нем не возникнут дыры. Тонкие участки вблизи дыр вполне пригодны для наблюдения. В ряде случаев путем выбора соответствующего электрода, формы и расположения катода и образца добиваются образования нескольких дыр, промежутки (полоски) между которыми по толщине пригодны для исследования на просвет.

Для получения тонких пленок из сплавов железа целесообразно применять следующие электролиты:

1) 135 мл уксусной кислоты, 25 г хромового ангидрида, 7 мл воды (уксусный электролит); плотность тока 0,1—0,2 А/см<sup>2</sup>, напряжение 26 В. Электролит при полировании не должен разогреваться выше 30° С; продолжительность полирования 1,5—2 ч;

2) 860 мл ортофосфорной кислоты, 100 г хромового ангидрида (ортофосфорный электролит); плотность тока 2—3 А/см<sup>2</sup>, напряжение 18 В. Электролит при полировании не должен нагреваться выше 50—60° С; продолжительность полирования 15 мин.

Слепки, или реплики, нужно изготавливать очень тщательно, так как даже небольшие отклонения их геометрической формы приводят к неправильному представлению о структуре металла. Прежде всего необходимо специально подготовить поверхность микрошлифа. Шлиф подвергают электролитическому полированию и специальному травлению, обеспечивающему рельефную поверхность при полном отсутствии на поверхности продуктов травления, что контролируется при помощи оптического микроскопа. С приготовленных шлифов различными методами изготавливают слепки.

Материал реплики может быть любым, но предпочтение следует отдавать таким, которые в меньшей степени рассеивают электроны и не дают собственной дифракционной картины. Наиболее часто используют углеродные реплики.

Углеродные реплики можно получить распылением угольных электродов в вакууме. Можно использовать угольные электроды, применяемые для спектрального анализа. Контакт между электродами поддерживается с помощью пружинного устройства. Процесс испарения можно заметить по образованию характерного снопа искр от места контакта. Пленка требуемой толщины (200—300 Å) получается при пропускании через электроды тока силой около 50 А в течение 30—60 с. Толщину пленки можно контролировать непосредственно в процессе напыления, если следить за изменениями ее цвета: соломенно-желтый цвет дает тонкая пленка, коричневый — пленка средней толщины (200 Å), синий — слишком толстая пленка. Реплики, используемые без оттенения, дают хороший контраст при толщине около 200 Å. Наилучшее разрешение дает платино-углеродная реплика, получаемая распылением электрода, содержащего уголь и платину. Углерод препятствует кристал-

лизации платины, поэтому пленка не проявляет собственной структуры при увеличении более чем в 10000 раз и не дает дифракционной картины в электронных лучах. Разрешение реплики около 10—20Å.

Отделение реплик, приготовленных одноступенчатыми методами, от металлографических шлифов выполняют двумя способами: 1) механическим сдиранием с предварительным нанесением слоя желатины или другого вещества; 2) электролитическим и химическим растворением металла.

Механическое сдирание реплики вместе с толстым слоем желатины или другого вещества — универсальный способ отделения различных видов реплик (коллоидных, углеродных, металлических). Применимо оно во всех случаях, когда не приходится опасаться коррозии поверхности образца. Вместо желатины можно использовать коллоид (концентрация до 10%), раствор полистирола (2—3%) в бензоле, частично полимеризованный метилметакрилат. Растворители для каждого из этих материалов — соответственно горячая дистиллированная вода, амилацетат, бромистый этил с добавками бензола или изоамилового спирта, дихлорэтан.

Отделение реплики электролитическим или химическим растворением металла при установившейся методике может обеспечить производительную работу. Растворение образца начинается от царапин-надрезов на реплике. Вследствие этого происходит «подмывание» и отслаивание квадратных пленки. При использовании для растворения образца растворов кислот, а также при применении электролитических способов процесс отделения реплики стимулируется также газовой выделением на образце. Слишком интенсивный процесс отделения пленки, сопровождающийся сильным газовой выделением, часто приводит к разрывам и разрушению реплики, особенно при шлифах с грубым рельефом.

Режим отделения реплики зависит от состояния образца — грубо- и тонкодисперсные гетерогенные структуры одного и того же сплава требуют различного режима отделения реплики. Изменения состава сплава также вызывают необходимость изменения режима отделения. Например, изменение содержания углерода в стали, сопровождающееся появлением сетки вторичного цемента, приводит к затруднениям в отделении реплики из-за того, что цементитные участки тормозят ее подмывание. Очень большое число дисперсных карбидов в стали при отделении реплики электрохимическим растворением образца может способствовать образованию под пленкой сцементированного слоя частиц нерастворившихся карбидов, препятствующего нормальному отделению пленки.

Для полного отделения реплики целесообразно перенести образец в сосуд с водой; если сразу пленки не отслаиваются, то следует вынуть образец из воды, выдержать его несколько минут на воздухе и снова медленно опустить в воду. Если отслоения не происходит и в этом случае, следует

продолжать травление. Если пленка удерживается большим числом нерастворяющихся в данных условиях частиц дисперсной фазы, целесообразно поменять полюса электродов электролитической ячейки или использовать реактив, растворяющий данную фазу.

При двухступенчатом способе приготовления реплик для получения отпечатка первой ступени можно использовать в качестве основы фотографическую пленку. Поверхность этой пленки смачивают ацетоном и накладывают на поверхность образца при небольшом давлении. После высыхания отпечаток отделяют от образца простым сдиранием и на него напыляют, например, углерод. Углеродную реплику отделяют растворением нитроцеллюлоидной пленки в ацетоне. Разрешение приготовленной таким образом углеродной реплики не превосходит разрешения обычных лаковых препаратов, но в отличие от последних обеспечивает большую контрастность в изображении. Для приготовления реплик высокого разрешения в качестве отпечатка первой ступени используют серебряную пленку толщиной в несколько микрометров, получаемую путем распыления серебра в вакууме. Реплика может служить углеродная пленка, напыленная на контактную поверхность серебряного отпечатка. Разрешение в этом случае может достигать нескольких десятков ангстрем.

Кроме рассмотренных методов, являющихся косвенными, применяют полупрямой метод (метод Л. М. Утевского). Его применяют для исследования двухфазных структур, например феррита-карбидных в сплавах железа с углеродом. Поверхность шлифа подвергают электролитическому травлению в условиях, обеспечивающих лишь растворение основы. При этом частицы избыточной фазы (карбиды) не растворяются, но некоторые из них за счет растворения основы уже слабо с ней связаны. Затем на поверхность наносят углеродную пленку, при отделении которой от металлического шлифа в результате частичного электролитического растворения последнего в ней остаются частицы карбидов, расположенные таким же образом, как и в исходной металлической поверхности.

Отделенную пленку можно подвергать в том же электронном микроскопе электронно-графическому исследованию для определения природы той фазы, включения которой находятся в пленке или слепке. Электроно-графическое исследование состоит в изучении дифракционной картины (электронная микродифракция), получаемой с поверхности данной фазы в результате взаимодействия атомов, входящих в состав этой фазы, с пучком электронов. Метод микродифракции является одним из наиболее эффективных методов определения фазового состава сплавов.

Растровый электронный микроскоп имеет меньшую разрешающую способность, но позволяет непосредственно наблюдать структуру поверхности объекта без изготовления слепков (реплик) или получения тонких металлических пленок.

## Микрорентгеноспектральный анализ

Свойства металлических материалов зависят не только от структуры, но и от однородности химического состава. Для определения химического состава (от бора до урана, кроме кислорода и фтора) в микрообъемах (3—10 мкм<sup>3</sup>) различных объектов применяют микрорентгеноспектральный анализатор. Среди отечественных приборов этого типа наиболее распространен микроанализатор МАР-2.

Принцип работы микроанализатора состоит в том, что поток электронов, созданный электронной пушкой и имеющий определенную длину волны, взаимодействуя с микрообъемами поверхности объекта, вызывает характеристическое рентгеновское излучение. Его длина волны свойственна только одному определенному элементу, входящему в состав того или иного локального участка объекта. Измеряя интенсивность характеристического излучения и сравнивая ее с интенсивностью излучения от эталона, имеющего известное содержание этого же элемента, можно рассчитать его концентрацию в изучаемом объекте. Результаты анализа с помощью прибора МАР-2 могут регистрироваться непрерывно на площади объекта 200×200 мкм (максимальный размер образца 9×15×8 мм).

Микроанализатор состоит из электронно-оптической системы, камеры для образцов, рентгеновских спектрометров (вакуумного  $\lambda = 12,5 \div 67 \text{ \AA}$  и невакуумного  $\lambda = 0,7 \div 1,25 \text{ \AA}$ ), а также системы регистрации и счета, в которую входят усилитель, амплитудный дискриминатор, пересчетный блок, высоковольтный выпрямитель, блоки питания, цифровпечатная машинка, самописец, контрольный генератор. Кроме того, в приборе МАР-2 имеется электронно-растровое устройство. На экране электронно-лучевых трубок можно получать изображение сканируемого участка в рентгеновских лучах, поглощенных и отраженных электронах, а также концентрационной кривой вдоль любой линии на сканируемом участке.

Микрорентгеноспектральный анализ проводят после комплексного металлофизического анализа, когда требуется определить зависимость тех или иных свойств материала от состава отдельных его фаз, включений или покрытий. В первую очередь определяют тип анализа: качественный, полуколичественный или количественный. Качественный анализ состоит в получении микроизображений анализируемого участка в характеристических лучах. Его проводят при установлении природы неметаллических включений, определении равномерности и глубины диффузионных слоев и др. Полуколичественный анализ заключается в регистрации интенсивности характеристического излучения на диаграммной ленте при перемещении образца под электронным зондом или при сканировании электронным зондом вдоль определенной линии на образце. Оценка состава, глубины слоя, равномерности распределения различных элементов и аналогичные задачи могут быть решены

на основании записи кривых интенсивности излучения в образце и уровня интенсивности на эталоне. По отношению интенсивностей характеристического излучения соответствующего элемента в образце и 100%-ном эталоне можно судить о количественном соотношении анализируемого элемента. Количественный анализ состоит в измерении интенсивности аналитической линии рентгеновского характеристического излучения в образце и эталоне, измерении фона в образце и эталоне и вычислении по относительным интенсивностям концентрации соответствующего элемента.

Если изучают неметаллические включения в стали, то исследователь должен предварительно металлографическим методом исследовать все встречающиеся в стали включения, выбрать наиболее типичные, отметить их с помощью прибора ПМТ-3 и передать описание и образец на анализ вместе с микрофотографией при увеличении 400. Для гомогенных включений размером 5—20 мкм может оказаться достаточным проведение качественного анализа. Если результаты металлографического исследования показывают, что в стали встречаются два или три типа крупных включений и внутри отдельных включений наблюдаются изменения цвета или оттенка, свидетельствующие о сложном конгломератном характере включений, то проводят полуколичественный анализ.

При изучении диффузионных процессов практически всегда оказывается достаточным проведение полуколичественного анализа: результаты анализа выражают в относительной интенсивности без перевода в процентное содержание. Определение глубины диффузионных слоев и расчет диффузионных параметров ведут на основании кривых «относительная интенсивность — расстояние». Следует помнить, что при этом для отдельных точек можно рассчитывать поправки и перевести в процентное содержание полученные на приборе относительные интенсивности. При исследовании многофазных сплавов, в которых в результате наплавки или термической обработки происходит перераспределение элементов между структурными составляющими, проводят количественный анализ.

При выдаче задания на микрорентгеноспектральный анализ указывают цель исследования (качественный, полуколичественный или количественный анализ и на какие элементы), средний химический состав образца (или марку стали), режим термической обработки, дают описание исследуемой области с отметкой зон для анализа на прилагаемой микрофотографии при увеличении 400, указывают способ приготовления шлифа. На исследование передают образец, в котором фазы и включения четко видны при увеличении 400 и имеют размеры более 5 мкм. Участки образца, подлежащие исследованию, обкалывают на микротвердомере. От обколотой области прибором ПМТ-3 намечают дорожку с шагом не более 0,1 мм до внешней грани образца. Используют образцы любой формы, однако исследуемая и противоположная плоскости

должны быть параллельны. Площадь шлифа должна находиться внутри круга диаметром 18 мм. Высота образца не более 7 мм. Образцы с диагональю меньше 8 мм должны быть залиты в обойму электропроводным сплавом. Высота обоймы не более 7 мм, диаметр 21—26 мм.

### 3. Испытания на растяжение

Испытания на растяжение относятся к числу статических испытаний, при которых нагрузка, прилагаемая к образцу, сравнительно медленно и плавно возрастает. Испытания на растяжение при комнатной температуре проводят в соответствии с ГОСТ 1497—73 на разрывных машинах.

В зависимости от принципа действия нагружающего механизма испытательные машины подразделяют на гидравлические и механические. Основной характеристикой разрывной машины является развиваемое ею максимальное усилие. Машины с максимальным усилием более 20—30 тс, как правило, выполняют с гидравлическим приводом. Наиболее мощные из них развивают усилие до 3000—5000 тс. Все разрывные машины, выпускаемые в СССР, снабжены рычажно-маятниковыми силоизмерительными устройствами. Силоизмерительные устройства других типов (пружинные, рычажные, гидравлические) менее точны, недостаточно чувствительны и неудобны в эксплуатации и поэтому в современных испытательных машинах применяются редко. Техническая характеристика часто применяемых разрывных машин представлена в табл. II.6.

### Выбор образцов

В соответствии с ГОСТ 1497—73 для испытаний на растяжение применяют образцы с круглым или прямоугольным поперечным сечением (рис. II.1). Образцы состоят из рабочей части и головок, предназначенных для закрепления их в захватах разрывной машины. Форма и размеры головок определяются конструкцией захватов. Расчетная длина образца  $l_0$  выбирается несколько меньше рабочей длины  $l$ . Размеры образцов стандартизованы. Диаметр  $d_0$  рабочей части нормального круглого образца равен 20 мм. Образцы с другим размером диаметра называют пропорциональными. Минимальный диаметр круглых образцов составляет 3 мм.

Расчетную длину  $l_0$  рекомендуется выбирать равной десяти (длинные образцы) или пяти (короткие образцы) диаметрам. Если используют образцы другого диаметра или прямоугольные (плоские) образцы площадью  $F_0 = a_0 b_0$  ( $a_0$  и  $b_0$  — соответственно толщина и ширина прямоугольного образца), то расчетную длину  $l_0$  вычисляют по формулам:

$$l_0 = 11,3 \sqrt{F_0} \quad (\text{для длинных образцов});$$

$$l_0 = 5,65 \sqrt{F_0} \quad (\text{для коротких образцов}).$$

Минимальная толщина коротких плоских образцов составляет 0,5 мм. Литые образцы и образцы из хрупких материалов допускается изготавливать с расчетной длиной  $l_0 = 2,5 d_0$  или  $l_0 = 2,82 \sqrt{F_0}$ . Вычисленная таким образом расчетная длина округляется до ближайшего числа, кратного

Таблица II.6

Характеристика испытательных машин для определения механических свойств металлов и сплавов

Тип	Наименование	Завод-изготовитель	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
КМ-30	Копер маятниковый для испытания на ударную вязкость с предельным запасом энергии 30 кгс·м	ПО «Точприбор» (г. Иваново)	2100×910××2115	770
УМЭ-10ТМ	Машина испытательная с усилием 10 тс для статических и циклических испытаний растяжением — сжатием или изгибом при одновременной регистрации диаграммы деформирования	ПО «Точмашприбор» (г. Армавир)	1165×2880××2265	2550
Р-10	Машина разрывная с усилием 10 тс для статических испытаний	То же	1416×940××2486	1260
Р-5	То же, с усилием 5 тс	ПО «Точприбор» (г. Иваново)	700×1390××2055	700
Р-20	Машина разрывная с усилием 20 тс для статических испытаний	ПО «Точмашприбор» (г. Армавир)	1553×972××2901	1822
Р-50	То же, с усилием 50 тс	То же	1753×960××3516	2900
Р-100	То же, с усилием 100 тс	» »	2976×1930××4232	7186
КМ-50-1	Машина для испытания образцов на кручение с крутящим моментом до 50 кгс·м	ПО «Точприбор» (г. Иваново)	1167×695××1870	645

5 или 10, и с точностью до 0,1 мм ограничивается на рабочей длине образца неглубокими кернами или рисками.

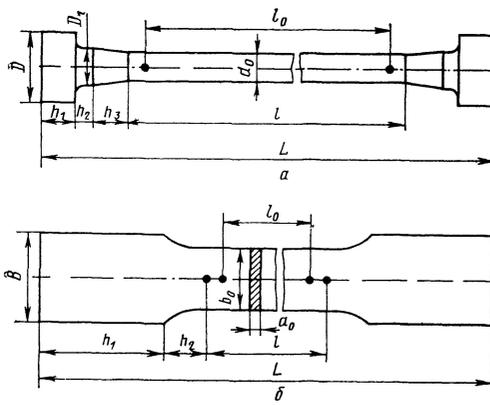


Рис. II.1. Образцы для испытаний на растяжение с круглым (а) и прямоугольным (б) поперечным сечением

**Диаграмма растяжения**

На рис. II.2 приведена диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали. По оси ординат отложено усилие  $P$ , а по оси абсцисс — деформация (абсолютное

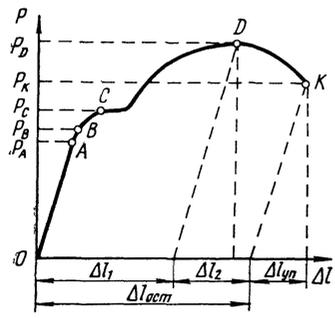


Рис. II.2. Диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали

удлинение образца  $\Delta l$ ). Эта диаграмма характеризует поведение металла при постепенном увеличении растягивающего усилия от момента начала нагружения до разрыва образца.

На диаграмме можно отметить несколько характерных участков. Участок  $OA$  представляет собой прямую и показывает, что при нагружении приращение удлинения прямо пропорционально увеличению нагрузки. При нагрузках выше точки  $A$  линейность диаграммы нарушается и при достижении точки  $C$  происходит резкий перегиб кривой. Образец удлиняется при постоянной нагрузке  $P_C$  («площадка текучести»). При дальнейшем деформировании образца нагрузка вновь начинает возрастать, достигая максимума в точке  $D$ , обычно соответ-

ствующей появлению в образце местного сужения поперечного сечения («шейки»), после чего нагрузка уменьшается и образец разрушается при усилии  $P_K$ .

Диаграмма, приведенная на рис. II.2, характерна для низкоуглеродистой стали. Средне- и высокоуглеродистые стали не имеют на диаграмме растяжения «площадки текучести».

**Свойства, определяемые при испытании на растяжение**

От «первичной» диаграммы растяжения переходят к «условной» диаграмме в координатах «условное напряжение  $\sigma$  — относительная деформация  $\epsilon$ », которые определяют по формулам  $\sigma = P/F_0$  и  $\epsilon = \Delta l/l_0$ . Механические свойства стали обычно определяют по условной диаграмме растяжения. ГОСТ 1497—73 регламентированы следующие прочностные свойства:

временное сопротивление разрыву (или предел прочности при растяжении)  $\sigma_B$  — условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_D$ , предшествующей разрушению образца:  $\sigma_B = P_D/F_0$  кгс/мм<sup>2</sup>;

предел текучести  $\sigma_T$  (физический) — наименьшее условное напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки:  $\sigma_T = P_C/F_0$  кгс/мм<sup>2</sup>; его определяют для низкоуглеродистой отожженной стали;

предел текучести  $\sigma_{0,2}$  (условный) — напряжение, при котором остаточная деформация составляет 0,2% первоначальной расчетной длины; его определяют для большинства марок конструкционной среднеуглеродистой и легированной стали, у которых на диаграмме растяжения отсутствует «площадка текучести». Для определения условного предела текучести от начала координат диаграммы растяжения по оси абсцисс откладывают в соответствующем масштабе отрезок, составляющий 0,2% первоначальной длины; через полученную точку проводят прямую, параллельную начальному линейному участку ( $OA$ ) диаграммы (до пересечения с диаграммой). Ордината точки пересечения и соответствует условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ . Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  можно определить по формуле  $\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$  кгс/мм<sup>2</sup>;

предел пропорциональности  $\sigma_{п.д}$  (условный) — напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и деформацией достигает такой величины, что тангенс угла наклона диаграммы растяжения к оси нагрузок увеличивается на 50% по отношению к тангенсу угла между начальным линейным участком диаграммы и осью нагрузок. Допуск на увеличение тангенса этого угла может быть равным 10 или 25% (при наличии особых указаний в технических условиях). Величину допуска указывают в обозначении (например,  $\sigma_{п.д10}$ ;  $\sigma_{п.д25}$ );

предел упругости (условный)  $\sigma_{0,05}$  — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05% первоначальной длины образца. Величину условного предела упругости определяют по той же методике,

что и величину условного предела текучести;

истинное сопротивление разрыву  $S_K$  — напряжение, определяемое отношением нагрузки  $P_K$  в момент разрыва к фактической площади поперечного сечения образца в месте разрыва  $F_K$ :  $S_K = P_K / F_K$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Модуль нормальной упругости  $E$  — отношение напряжения к соответствующему ему относительному удлинению при растяжении в пределах применимости закона Гука (начального линейного участка кривой растяжения):  $E = \sigma / \epsilon$  кгс/мм<sup>2</sup>.

До точки  $D$  (см. рис. П.2) удлинение  $\Delta l_1$  образца и сужение его поперечного сечения происходят равномерно по всей длине рабочей части. По достижении точки  $D$  деформация образца сосредоточивается в месте наименьшего сопротивления и дальнейшее удлинение  $\Delta l_2$  протекает за счет образования шейки, по которой происходит разрыв образца при нагрузке  $P_K$ . При разрыве упругая деформация  $\Delta l_{уп}$  исчезнет (величина упругой деформации в любой точке кривой будет соответствовать отрезку, отсекаемому на оси абсцисс перпендикуляром, опущенным из этой точки, и прямой, проведенной из этой точки параллельно отрезку  $OA$ ) и абсолютное остаточное удлинение  $\Delta l_{ост}$  будет равно сумме удлинения равномерного  $\Delta l_1$  и удлинения местного  $\Delta l_2$ , т. е.  $\Delta l_{ост} = \Delta l_1 + \Delta l_2$ .

Для оценки пластичности стали (способности ее к пластической деформации) при испытаниях на растяжение используют две характеристики — относительное удлинение после разрыва  $\delta$  и относительное сужение после разрыва  $\psi$ .

Относительное удлинение после разрыва  $\delta$  представляет собой отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к его первоначальной расчетной длине. Для определения длины расчетной части образца после разрыва  $l_k$  разрушенные части складывают так, чтобы их оси составляли прямую линию, и измеряют расстояние между кернами или рисками (наносимыми перед испытанием на образец и ограничивающими расчетную длину). Затем по формуле  $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$  определяют относительное удлинение. Различают  $\delta_5$  — относительное удлинение, определенное при испытании коротких образцов (с пятикратным отношением длины к диаметру), и  $\delta_{10}$  — относительное удлинение, определенное при испытании длинных образцов (с десятикратным отношением длины к диаметру).

Относительное сужение после разрыва  $\psi$  представляет собой отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения образца. Для определения относительного сужения после разрыва цилиндрического образца измеряют минимальный диаметр в месте разрыва  $d_k$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях и по среднему арифметическому значению диаметра определяют площадь поперечного сечения  $F_k$  в месте разрыва. Затем по формуле  $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$  определяют относительное сужение.

формуле  $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$  определяют относительное сужение.

Определять относительное сужение после разрыва на образцах некруглого сечения не рекомендуется. В том случае, когда изготовление круглых образцов не представляется возможным (например, при испытании тонколистовой или полосовой стали), относительное сужение при разрыве приблизительно оценивают по площади  $F_k$ , вычисляемой как произведение наибольшей ширины образца в месте разрыва на наименьшую толщину.

Испытание на растяжение считается недействительным при разрыве образца по разметочным рискам или кернам, по металлургическим дефектам (расслоениям, неметаллическим включениям и др.) и при образовании нескольких шеек или мест разрыва.

### Испытание на растяжение при пониженных температурах

Испытания на растяжение при пониженных температурах производят в соответствии с ГОСТ 11117—75. Испытуемый образец помещают либо непосредственно в охлаждающую жидкость, представляющую собой смесь этилового спирта (ацетона) с твердой углекислотой или жидкий азот (водород, гелий), либо в специальные камеры (криостаты). При температурах от 0 до  $-100^\circ\text{C}$  и при температуре кипения технического жидкого азота определяют следующие свойства: предел текучести (физический и условный), временное сопротивление, истинное сопротивление разрыву, относительное удлинение и относительное сужение. Методика определения этих свойств аналогична рассмотренной выше методике испытаний при комнатной температуре.

### Испытание на растяжение при повышенных температурах

Кратковременные испытания на растяжение при повышенных температурах проводят в соответствии с ГОСТ 9651—73. Для испытаний используют цилиндрические и плоские образцы. Головки цилиндрических образцов выполняют, как правило, с резьбой. Образцы, закрепленные в захватах испытательной машины, нагревают до температуры испытания в печи; время выдержки при температуре испытания не должно превышать 20 мин. В результате испытаний определяют следующие свойства материала: предел текучести (физический)  $\sigma_T^t$ , кгс/мм<sup>2</sup>; предел текучести (условный)  $\sigma_{0,2}^t$ , кгс/мм<sup>2</sup>; временное сопротивление  $\delta_B^t$ , кгс/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $\delta^t$ , %; относительное сужение  $\psi^t$ , %. Методика определения этих свойств не отличается от рассмотренной выше методике определения свойств при комнатной температуре. Результаты кратковременных испытаний при повышенных температурах в связи с явле-

нием ползучести (увеличением деформации под действием постоянной нагрузки при повышенных температурах) не позволяют объективно оценивать поведение материалов при повышенных температурах; в то же время предел текучести и временное сопротивление, определенные при кратковременных испытаниях при повышенных температурах, могут служить основой для сравнительной оценки различных материалов.

#### Испытания на кручение, изгиб и сжатие

К числу статических испытаний, проводимых при комнатной и повышенных температурах, относят также испытания на кручение (ГОСТ 3565—58), на изгиб и на сжатие. Однако эти испытания менее универсальны, чем испытание на растяжение и применяются значительно реже. Так, испытание на изгиб применяют для малопластичных материалов, главным образом чугунов (ГОСТ 14019—68), а также для закаленных и отпущенных сталей, имеющих высокую твердость (например, для инструментальных сталей). Испытания проводят на образцах круглого или прямоугольного (чаще квадратного) сечения.

#### 4. Измерение твердости

Под твердостью понимают сопротивление, которое одно тело оказывает проникновению в него другого, более твердого тела. Из всех видов механических испытаний ме-

Таблица II.7

Приборы для измерения твердости металлов и сплавов

Тип	Метод измерения	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ТШ-2М	Бринелля	730×225×880	180
ТШП-4*	»	340×290×155	20
ТК-2М	Роквелла	500×240×760	70
ТКП-1*	»	225×130×730	20
ТП-7р-1	Виккерса	720×370×1150	195
ТПП-2*	»	220×125×240	18
ТКС-14-250	Супер-Роквелла	580×330×770	117

\* Переносной прибор.

таллов испытание на твердость проводится чаще всего. Это объясняется тем, что испытание на твердость не приводит к разрушению изделий, отличается простотой, скоростью и портативностью применяемых приборов. Методы определения твердости могут быть статическими и динамическими. Динамические методы применяют сравнительно редко, и они не регламентированы стандартами. Характеристика приборов для определения твердости, выпускаемых производственным объединением «Точприбор» (г. Иваново), представлена в табл. II.7.

#### Измерение твердости вдавливанием стального шарика (метод Бринелля)

Испытания по Бринеллю регламентированы ГОСТ 9012—59 (стандарт СЭВ 468—77). Стальной закаленный шарик диаметром  $D$  (10; 5 или 2,5 мм) вдавливаются в испытуемый образец силой  $P$  (3000; 1000 или 750 кгс). В результате на поверхности образца остается отпечаток в форме шарового сегмента диаметром  $d$  (рис. II 3, а). Диаметр отпечатка будет тем меньше, чем тверже материал. Число твердости по Бринеллю (кгс/мм<sup>2</sup>) вычисляют по формуле  $HV = P/F$ , где  $P$  — нагрузка, действующая на шарик, кгс;  $F$  — площадь поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>.

Если площадь поверхности отпечатка выразить через диаметр шарика и диаметр отпечатка, то формула для определения твердости по Бринеллю примет вид:

$$HV = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Диаметр отпечатка  $d$ , измеренный с помощью измерительной лупы или отсчетного микроскопа, служит мерой твердости. Погрешность измерительного прибора не должна превышать  $\pm 0,01$  мм на одно наименьшее деление шкалы и  $\pm 0,02$  мм на всю длину шкалы. В некоторых испытательных приборах шаровой отпечаток проектируется на матовое стекло с масштабом, так что диаметр отпечатка может быть быстро измерен. Его следует измерять в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определять как среднее арифметическое из двух измерений.

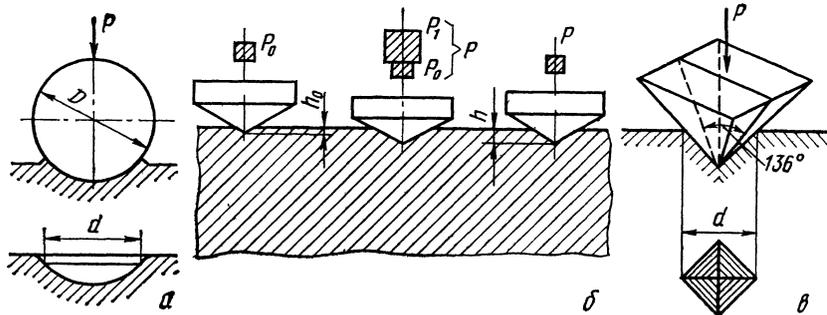


Рис. II 3. Схемы измерения твердости

а — по Бринеллю; б — по Роквеллу; в — по Виккерсу

Т а б л и ц а 11.8

Соотношение чисел твердости, определенной различными методами

Диаметр отпечатка, мм	Твердость по Бринеллю HB			Твердость по Роквеллу			Твер- дость по Выккерсу HV	Твердость по методу упругого отскока (по Шору) HS
	D = 10 мм		D=5 мм	HRC	HRA	HRB		
	P=3000 кгс	P=1000 кгс	P=750 кгс					
2,00	946	316	229	—	—	—	—	—
2,05	899	298	217	—	—	—	—	—
2,10	875	286	207	—	—	—	—	—
2,15	817	273	196	—	—	—	—	—
2,20	782	261	187	72	89	—	1220	107
2,25	744	248	178	69	87	—	1114	100
2,30	713	238	170	67	85	—	1021	96
2,35	683	227	162	65	84	—	940	92
2,40	652	218	156	63	83	—	867	88
2,45	627	209	149	61	82	—	803	85
2,50	600	200	143	59	81	—	746	81
2,55	578	193	137	58	80	—	694	78
2,60	555	185	131	56	79	—	649	75
2,65	532	178	126	54	78	—	606	72
2,70	512	171	121	52	77	—	587	70
2,75	495	166	116	51	76	—	551	68
2,80	477	159	111	49	76	—	534	66
2,85	460	153	107	48	75	—	502	64
2,90	444	148	103	47	74	—	474	61
2,95	430	144	99,5	45	73	—	460	59
3,00	415	140	96,5	44	73	—	435	57
3,05	402	134	92,0	43	72	—	423	55
3,10	387	129	88,0	41	71	—	401	53
3,15	375	125	85,5	40	71	—	390	52
3,20	364	121	82,4	39	70	—	380	50
3,25	351	117	79,5	38	69	—	361	49
3,30	340	114	76,8	37	69	—	344	47
3,35	332	111	74,1	36	68	—	335	46
3,40	321	107	71,6	35	68	—	320	45
3,45	311	104	69,1	34	67	—	312	44
3,50	302	101	66,8	33	67	—	305	42
3,55	293	98	—	31	66	—	291	41
3,60	286	95	—	30	66	—	285	40
3,65	277	92	—	29	65	—	278	39
3,70	269	90	—	28	65	—	272	38
3,75	262	88	—	27	64	—	261	37
3,80	255	85	—	26	64	—	255	36
3,85	248	83	—	25	63	—	250	36
3,90	241	81	—	24	63	100	240	35
3,95	235	78	—	23	62	99	235	34
4,00	228	76	—	22	62	98	226	33
4,05	223	75	—	21	61	97	221	33
4,10	217	73	—	20	61	97	217	32
4,15	212	71	—	19	60	96	213	31
4,20	207	69	—	18	60	95	209	30
4,25	202	67	—	—	59	94	201	30
4,30	196	65	—	—	58	93	197	29
4,35	192	64	—	—	58	92	190	29
4,40	187	63	—	—	57	91	186	28
4,45	183	61	—	—	56	89	183	28
4,50	179	60	—	—	56	88	177	27
4,55	174	58	—	—	55	87	174	27
4,60	170	57	—	—	55	86	170	26
4,65	166	56	—	—	54	85	166	26
4,70	163	54	—	—	53	84	163	25
4,75	159	53	—	—	53	83	159	25
4,80	156	52	—	—	52	82	156	24
4,85	153	51	—	—	52	81	153	24
4,90	149	50	—	—	51	80	149	23
4,95	146	49	—	—	50	79	146	23
5,00	143	48	—	—	50	78	143	22
5,05	140	47	—	—	—	77	140	21
5,10	137	46	—	—	—	75	137	21
5,15	134	45	—	—	—	74	134	19
5,20	131	44	—	—	—	73	131	19
5,25	128	43	—	—	—	72	128	19
5,30	126	42	—	—	—	71	126	19
5,35	124	41	—	—	—	70	124	19
5,40	121	40	—	—	—	68	121	19
5,45	118	39	—	—	—	67	118	19
5,50	116	38,5	—	—	—	65	116	19
5,55	114	38,0	—	—	—	64	114	18
5,60	112	37,0	—	—	—	63	112	18
5,65	109	36,0	—	—	—	61	109	18
5,70	107	35,5	—	—	—	60	107	18
5,75	105	35,0	—	—	—	58	105	18
5,80	103	34,0	—	—	—	57	103	18
5,85	101	33,5	—	—	—	56	101	17
5,90	99	33,0	—	—	—	55	99	17
5,95	97	32,5	—	—	—	53	97	17
6,00	95	32,0	—	—	—	51	95	17

Таблица II.9

Рекомендуемые параметры при измерении твердости по Бринеллю

НВ	H, мм	P/D <sup>2</sup>	D, мм	P, кгс	τ, с
<i>Черные металлы</i>					
140—150	6—3	30	10	3000	10
	4—2	30	5	750	10
< 140	< 2	30	2,5	187,5	10
	> 6	10	10	1000	10
	6—3	10	5	250	10
	< 3	10	2,5	62,5	10
<i>Цветные металлы</i>					
> 130	6—3	30	10	3000	30
	4—2	30	5	750	30
35—130	< 2	30	2,5	187,5	30
	9—3	10	10	1000	30
	6—3	10	5	250	30
8—35	< 3	10	2,5	62,5	30
	> 6	2,5	10	250	60
	6—3	2,5	5	62,5	60
	< 3	2,5	2,5	15,5	60

Для того чтобы не прибегать к длительным и сложным вычислениям твердости по приведенной формуле, на практике пользуются таблицей, по которой в соответствии с условиями испытания и по диаметру отпечатка определяют число твердости по Бринеллю (табл. II.8). В табл. II.8 показано также соотношение между числами твердости, определенными различными методами.

При измерении твердости по Бринеллю диаметр шарика  $D$ , величину нагрузки  $P$ , продолжительность выдержки под нагрузкой  $\tau$  и минимальную толщину  $H$  испытуемого образца выбирают по табл. II.9.

Твердость испытываемых материалов не должна превышать НВ450; при большей твердости испытуемого материала стальной шарик при вдавливании будет деформироваться и результат получится неправильным. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее чем  $2,5d$ , а расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее  $4d$ .

Таблица II.10

Шкалы твердости, тип индентора, пределы измерений и соотношение между числами твердости по Роквеллу и Виккерсу

Обозначения		Тип индентора	Нагрузка, кгс	Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу	Соответствующие приближенные значения чисел твердости по Виккерсу
шкалы	чисел твердости				
A	HRA	Алмазный конус	$P_0 = 10; P_1 = 50; P = 60$	70—85	390—900
C	HRC	Алмазный конус	$P_0 = 10; P_1 = 140; P = 150$	20—67	240—900
B	HRB	Стальной шарик диаметром 1,588 мм	$P_0 = 10; P_1 = 90; P = 100$	25—100	60—240

При измерении твердости на образцах или деталях с криволинейной поверхностью длина и ширина подготовленной плоской поверхности должна быть не менее чем в два раза больше диаметра применяемого шарика. Диаметры отпечатков  $d$  должны находиться в пределах  $0,2D < d < 0,6D$ .

При измерении твердости шариком диаметром  $D = 10$  мм под нагрузкой  $P = 3000$  кгс с выдержкой  $\tau = 10$  с перед числом твердости по Бринеллю пишут символ НВ, например НВ400. При других условиях измерения обозначение НВ дополняется индексом, указывающим условия измерения в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки. Например НВ 5/250/30—200 означает число твердости по Бринеллю 200 при испытании шариком диаметром 5 мм под нагрузкой 250 кгс в течение 30 с.

## Измерение твердости по Роквеллу

Измерения твердости по Роквеллу регламентированы ГОСТ 9013—59 (стандарт СЭВ 469—77). По этому методу испытания на твердость производят путем вдавливания в образец стального шарика диаметром  $D = 1,58$  мм ( $1/16''$ ) или алмазного конуса с углом  $120^\circ$ . Величина твердости определяется разностью между глубиной впадин, получаемых на испытуемом предмете от вдавливания алмазного конуса или стального шарика под двумя нагрузками определенной величины: большей  $P_1$  — основной и меньшей  $P_0$  — предварительной (рис. II.3, б). Предварительная нагрузка составляет 10 кгс, а общая (предварительная плюс основная) — при вдавливании стального шарика составляет 100 кгс (шкала В), а при вдавливании алмазного конуса — 150 (шкала С) или 60 кгс (шкала А).

Твердость по Роквеллу измеряется в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм.

Числа твердости по Роквеллу выражаются следующими формулами:

$$HR = 100 - e \quad (\text{при измерении по шкалам}$$

$$A \text{ и } C);$$

$$HR = 130 - e \quad (\text{при измерении по шкале } B).$$

Т а б л и ц а П.11

Минимально допустимая толщина образцов при определении твердости по Роквеллу

Наименование шкалы	Число твердости по Роквеллу	Минимальная толщина образца, мм
А	70	0,7
	80	0,5
	90	0,4
В	25	2,0
	30	1,9
	40	1,7
	50	1,5
	60	1,3
	70	1,2
	80	1,0
	90	0,8
	100	0,7
С	20	1,5
	30	1,3
	40	1,2
	50	1,0
	60	0,8
	67	0,7

Величина  $e$  определяется по следующей формуле:

$$e = (h - h_0) / 0,002,$$

где  $h_0$  — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием предварительной нагрузки  $P_0$ ;  $h$  — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием общей нагрузки  $P$ , измеренная после снятия основной нагрузки  $P_1$ , с оставлением предварительной нагрузки  $P_0$ .

Стальной шарик (шкала В) используют для определения твердости незакаленной стали, латуни, бронзы и других нетвердых материалов, алмазный конус — для определения твердости термически обработанной, в том числе закаленной стали (шкала С) и твердых сплавов (шкала А). К числам твердости, полученным в результате измерения по этим шкалам, добавляют обозначение шкалы (например, HRC60, HRB90, HRA70). Величина нагрузки, пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу и соответствующие приближенные значения твердости по Виккерсу для шкал А, В и С представлены в табл. П.10.

Минимальная толщина испытуемого образца в зависимости от ожидаемой твердости по Роквеллу приведена в табл. П.11.

Расстояние между центрами соседних отпечатков или расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 3 мм.

#### Измерение твердости алмазной пирамидой (метод Виккерса)

Измерение твердости по методу Виккерса регламентировано ГОСТ 2999—75. Метод Виккерса позволяет измерять твердость как

мягких, так и очень твердых металлов и сплавов; он пригоден и для определения твердости тонких поверхностных слоев (например, при химико-термической обработке). Для определения твердости этим методом в образец вдавливают четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине  $136^\circ$  (рис. П.3, в). После снятия нагрузки с помощью оптического устройства измеряют диагонали отпечатка и определяют число твердости по Виккерсу. Продолжительность выдержки под нагрузкой для стали и чугуна должна составлять 10—15 с, а для цветных металлов 30 с и в обозначении твердости она опускается. В том случае, если продолжительность приложения нагрузки отличается от указанной, то ее величина указывается в обозначении твердости по Виккерсу. Так HV 10/30—500 означает число твердости по Виккерсу 500, полученное под нагрузкой  $P=10$  кгс, приложенной в течение 30 с.

Число твердости HV (кгс/мм<sup>2</sup>) определяют по формуле

$$HV = P/F$$

или

$$HV = 2P \sin \frac{\alpha}{2} / d^2 = 1,8544P/d^2.$$

В этих соотношениях  $P$  — нагрузка, кгс;  $F$  — площадь пирамидального отпечатка, мм<sup>2</sup>;  $\alpha=136^\circ$  — угол между противоположными гранями при вершине пирамиды;  $d$  — среднее арифметическое размеров обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Практически величину HV в зависимости от нагрузки и диаметра отпечатка выбирают из таблиц, приведенных в ГОСТ 2999—75. Нагрузку выбирают из ряда 5; 10; 20; 30; 50; 100 кгс. При наличии соответствующих приборов допускается производить измерение твердости и при меньших нагрузках (1 и 3 кгс). Выбор нагрузки при измерении твердости HV цементованных и других изделий с твердостью поверхностного слоя, не равной твердости сердцевины, производят следующим образом (если толщина слоя неизвестна): измеряют твердость при нескольких нагрузках, например 5; 10; 20, 30 кгс. Если числа твердости HV при увеличении нагрузки изменяются, то применяют меньшие нагрузки до тех пор, пока две смежные нагрузки не дадут совпадающих или близких друг другу результатов.

Минимальная толщина испытуемого образца или слоя должна быть больше диагонали отпечатка для стальных изделий в 1,2 раза, а для цветных металлов в 1,5 раза. Расстояние между центром отпечатка и краем образца или соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка. Методом Виккерса можно измерять твердость образцов толщиной 0,3—0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03—0,05 мм.

Числа твердости по Бринеллю и Виккерсу имеют одинаковую размерность и для материалов с твердостью до HV450 практиче-

ски совпадают. При более высокой твердости величина  $HV$  превышает величину  $HB$ ; это превышение тем больше, чем выше твердость. Метод Виккерса более совершенен, чем другие методы определения твердости. Он дает для всех материалов сквозную однозначную шкалу твердости.

Переводные таблицы, дающие соотношения значений твердости, определенной методами Бринелля, Роквелла, Виккерса и супер-Роквелла для углеродистых и легированных конструкционных и инструментальных сталей после различных видов термической обработки, разработаны на автозаводе им. Лихачева (РТМ 37.105.00600—74).

### Измерение микротвердости

Измерение микротвердости регламентировано ГОСТ 9450—76 (стандарт СЭВ 1195—78). Испытания производят путем вдавливания алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  под действием нагрузки  $P$ , приложенной в течение определенного времени; после снятия нагрузки измеряют диагонали  $d$  квадратного отпечатка, оставшегося на поверхности образца. При испытании на микротвердость применяют одну из следующих нагрузок: 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 кгс. Число твердости вычисляют по той же формуле, что и при определении твердости методом Виккерса. При обозначении перед числом твердости пишут символ  $H$  с индексом, указывающим величину нагрузки в грамм-силах, например  $H_{50}$ —300 кгс/мм<sup>2</sup>. Размерность твердости не указывают в тех случаях, когда это не вызывает неясности.

Этим методом можно определить не только твердость тонких поверхностных слоев, но и твердость отдельных структурных составляющих и фаз сплавов. Обычно микротвердость определяют на приборе ПМТ-3. Образцы для измерения микротвердости подготавливают так же, как и для микроисследования (шлифование, полирование, а в необходимых случаях и травление). Во избежание наклепа тонкого поверхностного слоя рекомендуется проводить электролитическое полирование.

Величину нагрузки при однородном испытываемом материале выбирают, исходя из его толщины: минимальная толщина образца или слоя должна быть больше длины диагонали отпечатка в 1,5 раза. На противоположной стороне образца после испытания не должно быть заметных следов деформации. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не меньше двойной длины диагонали отпечатка большего размера.

Величину нагрузки при структурно-неоднородном испытываемом материале выбирают в зависимости от задачи испытания. Если необходимо оценить среднюю твердость материала, то величина диагонали отпечатка должна быть значительно больше размеров структурных составляющих материала. Испытания в разных участках такого материала должны давать одинаковые результа-

ты. Если задачей испытания является оценка твердости отдельных структурных составляющих сплава, то размер диагонали отпечатка должен быть достаточно мал по сравнению с испытываемым кристаллитом; при этом кристаллит может рассматриваться как образец.

### Динамические методы определения твердости

К ним относят определение твердости методом упругого отскока (методом Шора) и путем динамического вдавливания шарика (методом Польши). При измерении твердости методом упругого отскока на поверхность массивной детали, твердость которой нужно определить, с регламентированной высоты падает боек определенной массы. Число твердости  $HS$  отсчитывается по высоте отскока бойка. Приборы для определения твердости методом упругого отскока выпускают с пневматическим и механическим приспособлением для подъема бойка; высоту отскакивания бойка фиксируют по градуированной стеклянной трубке или по отклонению стрелки индикатора.

Для ориентировочного определения твердости динамическим вдавливанием шарика (методом Польши) применяют переносной прибор. Определение твердости производят путем одновременного вдавливания шарика при ударе средней силы в испытываемый предмет и эталон с известной твердостью и последующего установления числа твердости по таблице, прилагаемой к прибору. Число твердости в таблице находят на пересечении граф диаметров отпечатков на испытываемой детали и эталоне. Этот метод целесообразно применять для определения твердости массивных деталей (прокатных валков, станин, крупных поковок), которые невозможно установить на обычные приборы. Приближенность метода обусловлена тем, что при использовании прибора Польши шарик вдавливается динамически, а твердость  $HB$  определяется при статическом вдавливании. Точность определения твердости этим методом находится в пределах  $\pm 7\%$ .

### Зависимость между временным сопротивлением и твердостью стали

Существует определенная зависимость между пределом прочности и твердостью по Бринеллю. Эта зависимость описывается уравнением  $\sigma_b = kHB$ . Коэффициент  $k$  зависит от отношения предела текучести к временному сопротивлению. При  $\sigma_{0,2}/\sigma_b > 0,65$  он составляет 0,32—0,36. При неизвестном соотношении  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  принимают  $k = 0,35$ . Иногда используют следующие соотношения: при  $HB > 175$  величина  $\sigma_b \approx 0,345 HB$  кгс/мм<sup>2</sup>; при  $HB < 175$   $\sigma_b \approx 0,362 HB$ .

Зависимость временного сопротивления разрыву некоторых углеродистых и легированных сталей от чисел твердости по Бринеллю и Виккерсу представлена в табл. II.12.

Т а б л и ц а II.12

Зависимость временного сопротивления разрыву углеродистых и легированных сталей от значений твердости по Бринеллю и Виккерсу

Твердость по Бринеллю (10/3000)		Твердость по Виккерсу HV	Временное сопротивление стали $\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>				
диаметр от- печатка, мм	число твер- дости HB		углеро- дистой	хромомар- ганцево- кремнистой	хромни- келевой	хромомо- либдено- вой	хромистой
2,45	627	803	226	—	213	207	—
2,50	601	746	216	—	204	198	—
2,55	573	693	206	—	195	189	201
2,60	555	649	200	206	189	183	195
2,65	534	606	192	200	182	176	187
2,70	514	587	185	192	175	170	180
2,75	495	551	178	185	168	163	173
2,80	478	534	172	178	162	157	167
2,85	460	502	165	173	156	152	—
2,90	444	474	160	166	151	146	156
2,95	430	460	154	160	146	141	150
3,00	415	435	149	154	141	137	145
3,05	402	423	144	149	136	132	—
3,10	387	401	139	144	132	128	136
3,15	375	390	134	140	127	123	130
3,20	364	380	130	134	123	119	—
3,25	351	361	126	130	119	115	123
3,30	340	344	122	122	116	112	119
3,35	332	345	119	119	112	109	—
3,40	321	320	115	115	109	106	112
3,45	311	312	112	109	106	102	—
3,50	302	305	108	106	102	100	105
3,55	293	291	105	102	100	97	—
3,60	286	285	102	100	97	94	100
3,65	277	278	100	97	94	91	—
3,70	269	272	97	94	91	89	94
3,75	262	261	94	89	89	86	—
3,80	255	255	92	87	86	84	89
3,85	248	250	89	84	84	82	—
3,90	241	240	87	82	82	80	85
3,95	235	235	85	80	80	78	—
4,00	228	226	82	78	77	76	80
4,05	223	221	80	76	76	74	—
4,10	217	217	78	74	74	72	76
4,15	212	213	76	70	72	70	—
4,20	207	209	74	68	70	68	72
4,25	202	201	72	66	68	66	—
4,30	196	197	71	65	67	65	69
4,35	192	190	69	63	65	63	—
4,40	187	186	67	61	63	61	—
4,45	183	183	66	60	62	60	—
4,50	179	177	63	58	60	58	62
4,55	174	174	62	57	59	57	—
4,60	170	170	61	56	57	56	—
4,65	166	166	60	55	57	55	58
4,70	163	163	59	54	55	54	—
4,75	159	159	57	52	54	52	—
4,80	156	156	56	52	53	52	—
4,85	153	156	55	50	52	50	—
4,90	149	149	54	51	51	49	—
4,95	146	146	53	48	50	48	—
5,00	143	143	51	47	48	47	49
5,05	140	140	50	47	46	47	49
5,10	137	137	49	45	47	45	—
5,15	134	134	48	44	46	44	—
5,20	131	131	47	43	44	43	45
5,25	128	128	46	42	44	42	—
5,30	126	126	45	42	43	42	—
5,35	124	124	44	41	42	41	43
5,40	121	121	43	40	41	40	42
5,45	118	118	43	39	40	39	—
5,50	116	116	42	38	39	38	—
5,55	114	114	41	38	39	38	—
5,60	112	112	40	37	38	37	39
5,65	109	109	39	36	37	36	—
5,70	107	107	39	35	36	35	—
5,75	105	105	38	35	36	35	—
5,80	103	103	37	34	35	34	—

## 5. Испытания на ударную вязкость

### Определение ударной вязкости

Способность металла сопротивляться ударному воздействию нагрузки оценивают величиной ударной вязкости, под которой понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора напряжений. Методы определения ударной вязкости при комнатной, пониженной и повышенной температурах регламентированы ГОСТ 9454—78 и соответствуют СТ СЭВ 472—77 и СТ СЭВ 473—77. В соответствии с этими стандартами образец квадратного или прямоугольного сечения с концентраторами вида *U*, *V* и *T* (рис. 11.4) устанавливают на две опоры маятничкового копра с максимальной энергией удара 0,5; 1,0; 5,0; 10; 15 или 30 кгс·м (ГОСТ 10708—76). Удар наносят посередине образца со стороны, противоположной надрезу. За окончательный результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов *U* и *V* и ударную вязкость для образцов с концентратором вида *T* (усталостная трещина, получаемая в вершине начального надреза при циклическом изгибе образца в одной плоскости). Работу (*KU*, *KV* или *KT*) разрушения образца определяют обычно по специальной шкале маятничкового копра. После определения работы разрушения образца вычисляют ударную вязкость *KCU* (*KCV*, *KCT*):  $KC = K/S_0$ , где  $S_0$  — площадь поперечного сечения образца в месте надреза, см<sup>2</sup>.

Работу удара обозначают двумя буквами (*KU*, *KV* или *KT*) и цифрами. Первая буква (*K*) — символ работы удара, вторая буква (*U*, *V* или *T*) — вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца. Цифры не указывают при определении работы удара на копре с максимальной энергией удара маятника 30 кгс·м, при глубине концентратора 2 мм для концентраторов видов *U* и *V* и 3 мм для концентратора типа *T* и ширине образца 10 мм.

Ударную вязкость также обозначают сочетанием букв и цифр. Первые две буквы *KC* обозначают символ ударной вязкости, третья буква — вид концентратора; первая цифра — максимальную энергию удара маятника, вторая — глубину концентратора и третья — ширину образца. Цифры не указывают в тех же случаях, что и для работы удара. Применяют 10 типов образцов с надрезом вида *U*, 4 — с надрезом вида *V* и 6 — с надрезом вида *T*.

Согласно дополнению № 1 к ГОСТ 9454—78 допускается обозначать работу удара и ударную вязкость в соответствии с ранее действовавшим ГОСТ 9454—60 (соответственно  $A_H$  и  $a_H$ ).

Для определения ударной вязкости хрупких материалов (чугунов, сталей с твердостью HRC 55 и выше) допускается применение призматических образцов с размерами 10×10×55 мм без надреза. Ударную

вязкость, полученную при испытании таких образцов, обозначают символом *KC* без индекса.

Для более точной оценки вязкости материалов иногда ударную вязкость как интегральную характеристику делят на две составляющие — удельную работу зарождения  $a_z$  и удельную работу развития  $a_p$  трещины:  $a_H = a_z + a_p$ . При хрупком разрушении работа распространения трещины близка к нулю, а при полухрупком она снижается

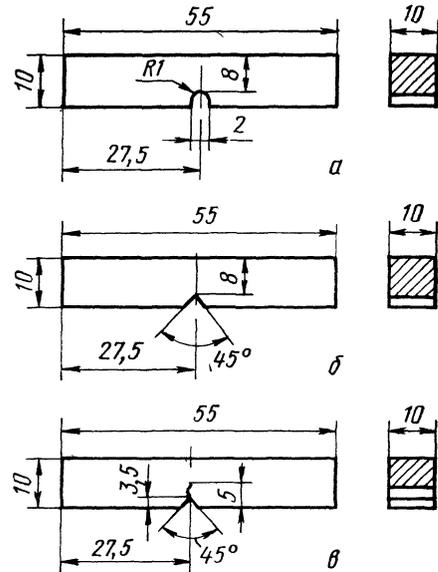


Рис. 11.4. Образцы для испытаний на ударную вязкость:

*a*—*в* — соответственно с концентраторами вида *U*, *V* и *T* (усталостная трещина)

пропорционально проценту вязкой составляющей в изломе, поэтому целесообразно определять  $a_p$  только при полностью вязком изломе. Существует несколько методов определения  $a_z$  и  $a_p$ . Наиболее распространены метод Б. А. Дроздовского (предварительное нанесение на образец усталостной трещины) и метод А. П. Гуляева (испытание образцов с разными надрезами и построение зависимости ударной вязкости от радиуса надреза); экстраполяция прямой до нулевого значения радиуса надреза дает возможность получить величину  $a_p$ .

### Определение порога хладноломкости

При испытаниях на ударную вязкость можно определить температуру перехода в хрупкое состояние (порог хладноломкости). Для низкоуглеродистых сталей эта температура (или интервал температур) при испытаниях на ударную вязкость выявляется весьма резко. Для высокопрочных сталей кривые ударной вязкости по мере понижения температуры снижаются плавно, поэтому установить по ним порог хладноломкости невозможно. Обычно порог хладноломкости высокопрочных сталей более четко опреде-

ляют по кривым, выражающим зависимость процента вязкой составляющей в изломе от температуры испытания при визуальном исследовании излома. Однако в высокопрочном состоянии стали локализованные зоны вязкой и хрупкой составляющих находятся в пределах одного или многих зерен, поэтому и этот метод не всегда приемлем. В настоящее время верхнюю и нижнюю температуры порога хладноломкости более точно определяют электронно-фрактографическим методом. На электронных фрактограммах вязкое разрушение имеет чашечный, а хрупкое — ручьево-узоры. Разрушая образцы при различных температурах и изучая строение их изломов, находят интервал температур, в котором строение излома меняется от вязкого к хрупкому. Верхняя и нижняя границы этого интервала температур будут соответствовать верхней и нижней температурам порога хладноломкости.

### Определение ударной вязкости при отрицательных и повышенных температурах

Для определения ударной вязкости при отрицательных температурах в качестве охлаждающей жидкости для охлаждения до  $-60^{\circ}\text{C}$  применяют смесь сухого льда с незамерзающей при температуре испытания жидкостью, например спиртом, спиртом-сырцом, денатурированным спиртом и другими неокислительными жидкостями. Для достижения температуры  $-60^{\circ}\text{C}$  и ниже рекомендуется применять смесь незамерзающей жидкости со сжиженным невзрывоопасным газом (например, азотом). При температуре ниже  $-80^{\circ}\text{C}$  применяют чистый этиловый спирт. Охлаждение до температуры кипения жидкого азота должно проводиться в жидком азоте. Выдержка образца в ванне с отрицательной температурой (с учетом необходимого переохлаждения) должна быть не менее 15 мин. Интервал времени с момента извлечения замороженного образца из ванны до удара маятника не должен превышать 5 с. Температурой испытания считается температура у поверхности дна надреза в момент начала разрушения.

Для определения ударной вязкости при повышенных температурах образцы от 20 до  $100^{\circ}\text{C}$  нагревают в воде, свыше  $100^{\circ}\text{C}$  — в муфельных печах лабораторного типа. Допускается нагрев образцов в масле и других неагрессивных средах. Интервал времени с момента извлечения образца из печи до удара маятника не должен превышать 5 с. Испытания при серии температур следует начинать с более низких температур с постепенным повышением температуры печи.

Для обозначения работы удара и ударной вязкости при пониженной и повышенной температурах вводится цифровой индекс, указывающий температуру испытания. Цифровой индекс ставят сверху после буквенных составляющих.

Например:  $KCT^{+100}15/3/7,5$  — ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида  $T$  при температуре  $+100^{\circ}\text{C}$ . Максимальная энергия удара маятника 15 кгс·м, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

## 6. Испытания на усталость

### Основные термины и обозначения

Усталостью называют процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к уменьшению долговечности, образованию трещин и разрушению. Свойство материала противостоять усталости называют выносливостью. Методы испытания на усталость регламентированы

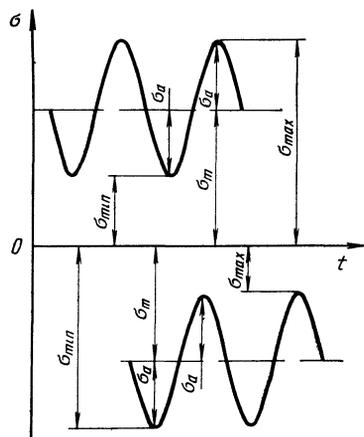


Рис. II.5. Параметры циклов напряжений в области растяжения и сжатия

ГОСТ 23026—78, предусматривающим испытания при простых видах деформирования стандартных образцов (изгиб, растяжение — сжатие, кручение), при наличии и отсутствии концентрации напряжений, при симметричных и асимметричных циклах напряжений или деформаций, при нормальных температуре и влажности в соответствии с ГОСТ 15150—69 и СТ СЭВ 458—77, в много- и малоцикловой упругой и упруго-пластической областях.

Наибольшее напряжение, которое выдерживает металл без разрушения при повторении заранее заданного числа циклов переменных нагрузок называют пределом выносливости.

Основные термины, определения и обозначения, принятые при испытаниях на усталость, представлены в табл. II.13.

Различают следующие основные циклы напряжений (рис. II.5 и II.6):

симметричный — цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по величине, но противоположны по знаку:

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}; \quad \tau_{\max} = -\tau_{\min};$$

асимметричный — цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения имеют разные величины;

знакопостоянный — асимметричный цикл напряжений, изменяющихся только по величине;

знакопеременный — цикл напряжений, изменяющихся только по знаку;

Т а б л и ц а П.13

Термины, определения и обозначения, принятые при испытаниях на усталость

Термин 1	Определение 2
Цикл напряжений	Совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период их изменения
Частота и период цикла	Частотой цикла называют число циклов напряжений в единицу времени, а периодом цикла — продолжительность одного цикла
Максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max}$ , $\tau_{\max}$	Наибольшее по алгебраической величине напряжение цикла; оно равно алгебраической сумме среднего напряжения цикла $\sigma_m$ , $\tau_m$ и амплитуды $\sigma_a$ , $\tau_a$ (см. рис. П.5): $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a; \quad \tau_{\max} = \tau_m + \tau_a$
Минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min}$ , $\tau_{\min}$	Наименьшее по алгебраической величине напряжение цикла (см. рис. П.5): $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a; \quad \tau_{\min} = \tau_m - \tau_a$
Среднее напряжение цикла $\sigma_m$ , $\tau_m$	Статическая (положительная или отрицательная) составляющая цикла напряжений: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad \tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}$
Амплитуда напряжений цикла $\sigma_a$ , $\tau_a$	Наибольшее числовое положительное значение переменной составляющей цикла напряжений: $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$
Размах напряжений цикла	Алгебраическая разность максимального и минимального напряжений цикла; равен удвоенной амплитуде: $2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}; \quad 2\tau_a = \tau_{\max} - \tau_{\min}$
Коэффициент асимметрии цикла напряжений $R_\sigma$ , $R_\tau$	Характеристика степени асимметрии цикла напряжений: $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}; \quad R_\tau = \tau_{\min} / \tau_{\max}$
Номинальное напряжение $\sigma_n$ , $\tau_n$	Напряжение, вычисляемое по формулам из курса сопротивления материалов без учета концентрации напряжений, остаточных напряжений и перераспределения напряжений в процессе деформирования: $\sigma_n = M_{изг}/W$ (при изгибе); $\sigma_n = P/F$ (при растяжении и сжатии); $\tau_n = M_{кр}/W$ (при кручении), где $M_{изг}$ и $M_{кр}$ — соответственно изгибающий и крутящий моменты в расчетном сечении образца; $W$ — момент сопротивления
Предел выносливости	Характеристика выносливости материала, имеющего горизонтальный участок на кривой усталости. При испытании образцов с постоянным коэффициентом асимметрии цикла (или с постоянным средним напряжением цикла) предел выносливости определяют соответственно как наибольшее значение максимального напряжения цикла (или как наибольшее значение амплитуды напряжений цикла), при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов $N$ . Предел выносливости выражают в номинальных напряжениях и обозначают $\sigma_R$ , $\tau_R$ , где $R$ — коэффициент асимметрии цикла. При симметричном цикле предел выносливости обозначают через $\sigma_{-1}$ ; $\tau_{-1}$
Предел ограниченной выносливости	Характеристика выносливости материала в пределах спадающего участка кривой усталости. При испытании образцов с постоянным коэффициентом асимметрии цикла (или с постоянным средним напряжением цикла) предел ограниченной выносливости определяют как наибольшее значение максимального (по величине) напряжения цикла (или наибольшее значение амплитуды цикла), при действии которого (или при которой) образец еще не разрушается при определенном (заданном) числе циклов
База испытаний $N$	Предварительно задаваемое число циклов напряжений, являющееся предельным при испытании образцов на усталость
Усталостная долговечность	Характеристика выносливости материала; определяется числом циклов, пройденных образцом до разрушения при определенном (заданном) напряжении
Концентрация напряжений	Местное повышение напряжений вблизи дефектов, отверстий, резьбы, шпоночных канавок, выточек, галтелей и т. п., а также в пресовых, сварных и других соединениях

Термин	Определение
1	2
Коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma, \alpha_\tau$	Характеристика степени концентрации напряжений в пределах упругости материала; его определяют как отношение максимального напряжения в зоне концентрации к номинальному напряжению в том же месте: $\alpha_\sigma = \sigma_{\max}/\sigma_n; \alpha_\tau = \tau_{\max}/\tau_n$
Эффективный коэффициент концентрации напряжений $k_\sigma, k_\tau$	Характеристика влияния концентрации напряжений на величину предела выносливости. При симметричных циклах его определяют как отношение предела выносливости гладкого образца ( $\sigma_{-1}, \tau_{-1}$ ) к пределу выносливости образца с концентрацией напряжений ( $\sigma_{-1k}, \tau_{-1k}$ ) при прочих равных условиях: $k_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}}; k_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{-1k}}$
Предельные напряжения цикла Предельная амплитуда цикла	Максимальное и минимальное напряжения цикла, соответствующие пределу выносливости (или пределу ограниченной выносливости) Амплитуда напряжений, соответствующая пределу выносливости (или пределу ограниченной выносливости)

отнулевой — знакопостоянный цикл напряжений, изменяющихся от нуля до максимума ( $\sigma_{\min}=0$ ) или от нуля до минимума ( $\sigma_{\max}=0$ ); в том и другом случае средние напряжения и амплитуда имеют одинаковую величину.

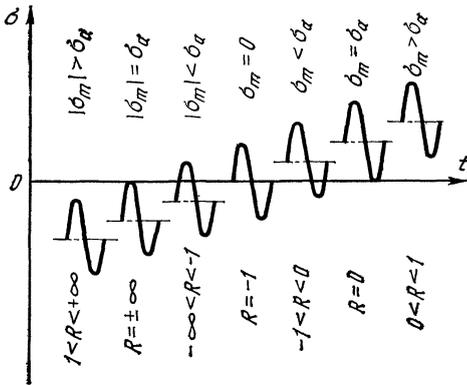


Рис. II.6. Разновидности циклов напряжений и соответствующие им значения коэффициентов асимметрии R

Нагружение образцов в процессе испытания производят при постоянных в течение всего испытания заданных максимальных или амплитудных: а) напряжениях цикла; б) деформациях цикла.

**Кривые усталости**

Для определения предела выносливости обычно испытывают партию из 8—10 образцов (деталей). При этом каждый образец испытывают только на одном уровне напряжений до разрушения или до достижения базового числа циклов. На уровне предела выносливости должно быть испытано не менее двух образцов. По результатам

испытаний образцов (деталей) строят кривую усталости (рис. II.7) в пропорциональных ( $\sigma_{\max}-N$ ), полулогарифмических ( $\sigma-\lg N$ ) или логарифмических ( $\lg \sigma-\lg N$ ) координатах. Для стали кривая усталости в

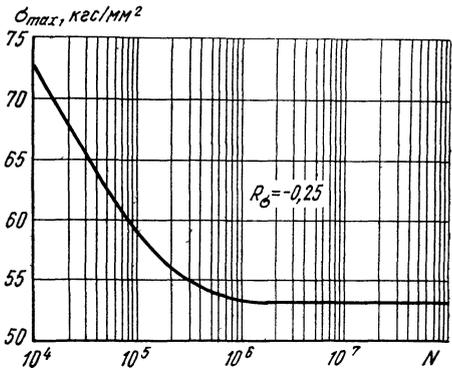


Рис. II.7. Кривая усталости в полулогарифмических координатах

нижней (правой) части имеет асимптотический характер, приближаясь к горизонтальной асимптоте с ординатой, равной так называемому физическому пределу выносливости  $\sigma_R(\tau_R)$ .

База испытаний  $N$  для определения пределов выносливости в обычных условиях должна быть не ниже:  $10 \cdot 10^6$  циклов — для материалов и сплавов, имеющих горизонтальный участок на кривой усталости (например, для конструкционных сталей);  $100 \cdot 10^6$  циклов — для легких сплавов и других материалов, кривые усталости которых не имеют горизонтальных участков. Основным критерий при определении пределов выносливости и построении кривых усталости — полное разрушение образцов. Предел выносливости считается установленным, если раз-

ность между наименьшими напряжениями, вызвавшими разрушение образца при заданной базе  $N$ , и наибольшим напряжением, при котором образец не разрушился при той же базе, не превышает 5% и не более 1 кгс/мм<sup>2</sup> (для стали).

Для испытания металлов на усталость применяют гладкие образцы круглого и прямоугольного сечений, а для определения чувствительности материала к концентрации напряжений — образцы с надрезами: в виде кольцевой выточки  $V$ -образного профиля

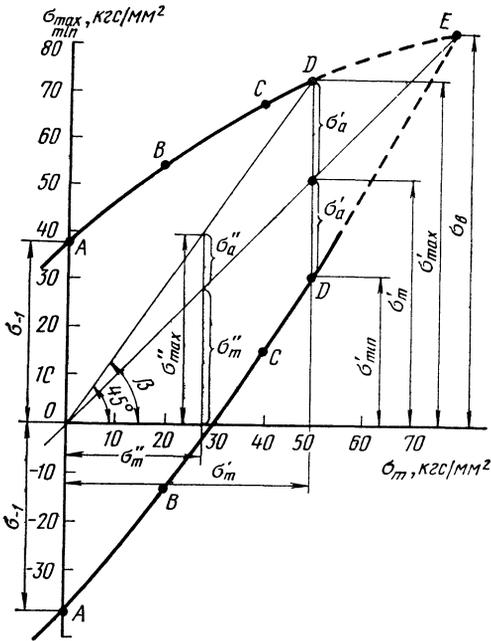


Рис. II.8. Диаграмма предельных напряжений цикла

или двусторонних  $V$ -образных вырезов (соответственно для круглых и прямоугольных образцов) и в виде симметричного поперечного отверстия. Величины пределов выносли-

вости при прочих равных условиях зависят от размеров поперечного сечения (диаметра) образцов, снижаясь по мере увеличения сечения (масштабный эффект). Масштабный эффект особенно заметен в интервале диаметров 0,5—50 мм.

Выносливость материала недостаточно характеризовать только величиной предела выносливости  $\sigma_R$  ( $\tau_R$ ), так как последний при прочих равных условиях зависит от коэффициента асимметрии цикла  $R$ . Эту зависимость устанавливают экспериментально (определяют пределы выносливости при различных значениях  $R$ ) и представляют графически в виде диаграммы предельных напряжений в координатах  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$  (рис.

II.8). По оси абсцисс диаграммы откладывают среднее напряжение цикла  $\sigma_m$ , а по оси ординат — соответствующие предельные значения максимального и минимального напряжений цикла  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$ . Если среднее напряжение цикла равно  $\sigma_m$ , то диаграмма дает возможность установить предельные величины напряжений  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  и предельные амплитуды цикла  $\sigma'_a$ , т. е. найти предел выносливости при любом коэффициенте асимметрии  $R_\sigma$  (или  $R_\tau$ ). Отрезки  $OA$ , отсекаемые двумя осями диаграммы на оси ординат, определяют предел выносливости  $\sigma_{-1}$  при симметричном цикле, когда среднее напряжение  $\sigma_m = 0$ . Испытания на усталость проводят, как правило, при средних напряжениях ниже предела текучести стали. Поэтому при средних напряжениях, превышающих предел текучести  $\sigma_t$ , диаграмму предельных напряжений не строят. Теоретически обе ветви должны сходиться в точке  $E$  с ординатой  $\sigma_B$ , равной пределу прочности материала, т. е.  $\sigma_m = \sigma_B$ .

К числу специальных испытаний на усталость относят испытания при повышенных и пониженных температурах, а также в условиях агрессивной среды. Эти испытания выполняют при тех же видах деформации и на тех же образцах, что и обычные испытания на усталость (при комнатной температуре и при отсутствии агрессивной среды).

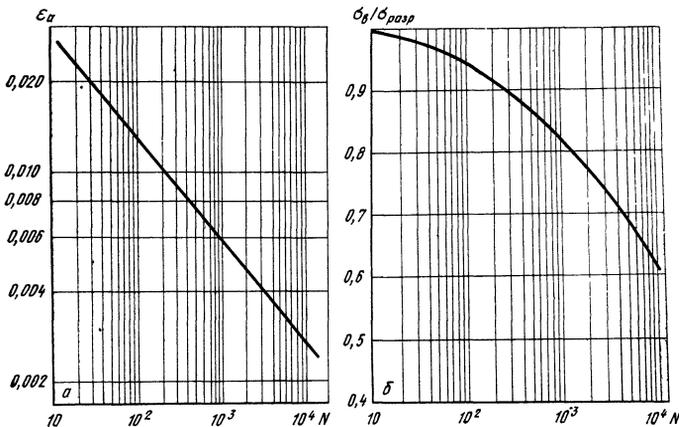


Рис. II.9. Кривые усталости для упруго-пластической малоциклового области

## Испытания в малоцикловой области

Испытания в малоцикловой области выполняют при переменном изгибе, растяжении — сжатии и кручении. В пределах данной партии образцов нагружение осуществляют по заданным: а) деформациям или перемещениям; б) напряжениям или нагрузкам. Частота смены напряжений (усилий) — не более 50 циклов в минуту.

Кривую усталости для малоцикловой области строят по осредненным результатам испытания образцов на 3—4 уровнях напряжений (усилий) или деформаций (перемещений), вызывающих полное разрушение или появление макротрещин при испытании до  $2 \cdot 10^5$  циклов. Верхний уровень напряжений (усилий) или деформаций (перемещений) выбирают на высоте 0,7 от соответствующего разрушающего фактора, приложенного однократно, или на уровне 0,7 от предела прочности исследуемого металла при растяжении.

Кривые усталости для малоцикловой области приведены на рис. II.9. По оси ординат может быть отложено максимальное или амплитудное значение разрушающей деформации или перемещения (рис. II.9, а) или коэффициент нагрузки (рис. II.9, б) — частное от деления циклического номинального напряжения или усилия на соответствующее разрушающее номинальное напряжение или нагрузку, приложенные однократно; по оси абсцисс — число циклов до разрушения в пропорциональном, полулогарифмическом или логарифмическом масштабах.

## 7. Соотношения между пределом выносливости и статическими характеристиками материалов

Наличие сходства в характере усталостных и статических разрушений свидетельствует о существовании связи между усталостными и статическими механическими характеристиками и является основанием для установления количественных зависимостей между ними. Различия в характере разрушения при приложении переменных и статических нагрузок объясняют количественные различия характеристик прочности при этих видах нагружения.

Ниже приведены зависимости между пределом выносливости  $\sigma_{-1}$  и свойствами, определенными при статических испытаниях ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $S_k$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , НВ), полученные различными исследователями. Прочностные свойства выражены в кгс/мм<sup>2</sup>, относительное удлинение и относительное сужение — в %.

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от предела прочности  $\sigma_B$ :

$$\sigma_{-1} = 0,29\sigma_B + 7,92 \text{ (углеродистые стали);}$$

$$\sigma_{-1} = 0,35\sigma_B + 5,3 \text{ (легированные стали);}$$

$$\sigma_{-1} = 0,35\sigma_B + 12,2;$$

$$\sigma_{-1} = 0,45\sigma_B + 7,6;$$

$$\sigma_{-1} = 0,43\sigma_B;$$

$$\sigma_{-1} = 0,468\sigma_B - 0,26$$

(при  $\sigma_B < 110$  кгс/мм<sup>2</sup>).

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от предела текучести  $\sigma_T$ :

$$\sigma_{-1} = 0,45\sigma_T + 12,2;$$

$$\sigma_{-1} = 0,45\sigma_T + 9,54;$$

$$\sigma_{-1} = 0,24\sigma_T + 27,5;$$

$$\sigma_{-1} = 0,493\sigma_T + 7,95.$$

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от истинного сопротивления разрушению  $S_k$ :

$$\sigma_{-1} = 0,35S_k - 1,0; \quad \sigma_{-1p} = 0,31S_k - 5,3;$$

$$\sigma_{-1} = 0,25S_k + 4,3; \quad \sigma_{-1p} = 0,25S_k + 12.$$

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от относительного удлинения  $\delta$ :

$$\sigma_{-1} = -0,50\delta + 44,6;$$

$$\sigma_{-1} = -0,44\delta + 34,51;$$

$$\sigma_{-1} = -0,878\delta + 50,24;$$

$$\sigma_{-1} = -0,38\delta + 40,3.$$

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от относительного сужения  $\psi$ :

$$\sigma_{-1} = -0,234\psi + 65,6;$$

$$\sigma_{-1} = -0,312\psi + 45,6.$$

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от твердости:

$$\sigma_{-1} = 0,18\text{НВ}; \quad \sigma_{-1} = 0,096\text{НВ} + 7,32;$$

$$\sigma_{-1} = 0,013\text{НВ} + 4,64;$$

$$\sigma_{-1} = 0,059\text{НВ} + 18,9.$$

Зависимость  $\sigma_{-1}$  от сочетания нескольких характеристик:

$$\sigma_{-1} = 0,138(\sigma_B + \sigma_T) + 20,5;$$

$$\sigma_{-1} = 0,877\sigma_T - 0,096S_k - 0,293\delta + 3,31;$$

$$\sigma_{-1} = 0,22(\sigma_B + \sigma_T) + 5,4;$$

$$\sigma_{-1} = 0,2(\sigma_B + \sigma_T + \psi);$$

$$\sigma_{-1} = 0,25(\sigma_B + \sigma_T) + 5;$$

$$\sigma_{-1} = 0,175(\sigma_B + \sigma_T - \delta + 100);$$

$$\sigma_{-1} = 0,484\sigma_B + 0,27\sigma_T - 0,214\delta - 1,78.$$

## 8. Испытания на ползучесть и длительную прочность

### Построение кривой ползучести

Под ползучестью понимают свойство металла медленно и непрерывно пластически деформироваться при постоянном напряжении, которое может быть ниже предела текучести. Эта деформация может постепенно прекратиться или, наоборот, продолжаться вплоть до разрушения в зависимости от величины нагрузки и температуры, а также от степени сопротивления, которое данный металл оказывает воздействию этих двух факторов. Испытания на ползучесть проводят в соответствии с ГОСТ 3248—60.

Наиболее часто ползучесть определяют в условиях испытаний на растяжение. Обычно для испытаний применяют цилиндрические образцы диаметром 10 мм и с расчетной длиной 100 и 200 мм и плоские шири-

ной 15 мм и длиной 100 мм. Образец устанавливают в захватах испытательной машины, нагревают до заданной температуры и выдерживают в течение 1 ч. Затем к образцу плавно прикладывают предварительную нагрузку, равную 10% от заданной, и снимают показания прибора для измерения деформации. После этого плавно нагружают образец до заданной нагрузки, одновременно замеряя деформацию. Предел ползучести

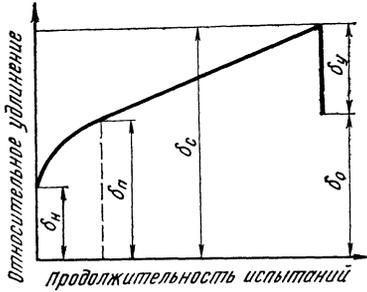


Рис. П.10. Кривая ползучести:

$\delta_n$  — удлинение при нагружении;  $\delta_p$  — полное (упругое+остаточное) удлинение на криволинейном участке;  $\delta_c$  — суммарное (упругое+остаточное) удлинение за время испытания;  $\delta_v$  — упругое удлинение;  $\delta_o$  — остаточное удлинение

определяют при допусках на удлинение 0,1—1,0% и продолжительности испытания 100, 300, 500, 1000 ч.

В процессе испытания строят первичную кривую ползучести (рис. П.10) и определяют напряжение, соответствующее условному пределу ползучести материала. Под условным пределом ползучести понимают напряжение, которое за установленное время испытаний при данной температуре вызывает заданное удлинение образца (суммарное или остаточное) или заданную скорость ползучести на линейном участке кривой ползучести. На основе полученных кривых ползучести, построенных в результате испытания нескольких образцов при одинаковой температуре и разных напряжениях, строят диаграммы зависимости между напряжением и относительным удлинением (или средней скоростью ползучести на прямолинейном участке первичных кривых) в логарифмических координатах. По этим диаграммам и находят условный предел ползучести.

После того как условный предел ползучести будет найден при нескольких температурах (не менее чем при трех), можно построить диаграмму зависимости предела ползучести от температуры.

Предел ползучести обозначают буквой  $\sigma$  с числовыми индексами. Если его определяют по величине деформации, то обозначение имеет вид  $\sigma_{0,3/200}$  (предел ползучести при допуске на деформацию 0,3% за 200 ч при температуре 600° С); при определении предела ползучести по скорости ползучести —  $\sigma_{3 \cdot 10^{-5}}$  (предел ползучести при скорости ползучести  $3 \cdot 10^{-5}$  %/ч при 700° С).

## Испытания на длительную прочность

Испытания на длительную прочность проводят в соответствии с ГОСТ 10145—62. Они состоят в определении постоянного (во времени) напряжения, вызывающего разрушение образца за определенный промежуток времени при постоянной температуре. Это напряжение называют пределом длительной прочности и обозначают буквой  $\sigma$  с двумя индексами ( $\sigma_{5000}^{900}$  — предел длительной прочности при базе испытания 5000 ч и температуре 900° С). ГОСТ 10145—62 рекомендует определять пределы длительной прочности при базах 50, 100, 500, 1000, 3000, 5000 и 10000 ч.

Образец устанавливают в захватах испытательной машины, нагревают до заданной температуры, выдерживают в течение 1 ч и плавно прикладывают нагрузку. Продолжительность испытания устанавливают в зависимости от назначения материала. В результате испытаний устанавливают зависимость между напряжением и временем до разрушения и выражают ее в логарифмических или полулогарифмических координатах. По полученным графикам путем экстраполяции или интерполяции определяют предел длительной прочности материала. Для некоторых марок стали экстраполяция на большие длительности может дать ошибочные результаты, поэтому не рекомендуется проводить экстраполяцию на срок службы, превышающий максимальную продолжительность испытаний более чем на один-полтора порядка.

Для испытаний на длительную прочность используют то же оборудование и аппаратуру, что и для испытаний на ползучесть. Применяют цилиндрические образцы диаметром 5, 7 и 10 мм и длиной 25, 70, 50 и 100 мм и плоские с начальной расчетной длиной  $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ , где  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца.

## 9. Определение сопротивления термической усталости

В настоящее время отсутствует единая общепринятая методика испытаний материалов на термическую усталость.

Так, изучают сопротивление термической усталости материалов для труб, лопаток газовых турбин, дисков турбин, деталей металлургического оборудования, штампов и др. В каждом конкретном случае применяют свою методику, позволяющую моделировать условия эксплуатации конкретных деталей. Подобные работы позволяют выявить работоспособность конструкции, сопоставить ряд материалов для выбора наиболее термостойкого, оценить характер изменения размеров, выбрать наиболее рациональный вид и разработать технологию упрочняющей обработки деталей. Однако они не дают возможности выявить обобщающие закономерности влияния различных факторов и сопоставить результаты различных исследований.

## Критерии оценки

Анализ имеющихся методик показывает, что в основу классификации методов испытаний на термическую усталость могут быть положены следующие принципы:

1) материал испытываемых деталей: керамика, металлокерамика, углеродистые и легированные стали, жаропрочные стали и сплавы;

2) форма образцов: пластины, цилиндры, параллелепипеды, треугольники, листы, трубы, образцы с концентраторами напряжений;

3) назначение: материалы для деталей многоразового применения, работающих длительное время при большом числе теплосмен (циклов), и материалы для деталей одноразового применения;

4) условия нагрева и охлаждения: нагрев током, проходящим через образец, током извне, токами высокой частоты, погружением в расплав, в потоке продуктов сгорания, в пламени газовой горелки, в потоке нагретого воздуха; охлаждение в жидкости или на спокойном воздухе, потоке газа или жидкости;

5) особенности температурного поля: крайне резкие температурные перепады, тепловые удары, приводящие к разрушению за одну или несколько (менее 10) теплосмен, и многократные температурные перепады, обуславливающие разрушение за большое число циклов теплосмен (как правило, сотни и тысячи);

6) температурный уровень работы и интервал температурных перепадов: диапазоны температур, в которых не происходит каких-либо изменений структуры и материал нагружается только температурными напряжениями, действующими аналогично механическим напряжениям, и температурные диапазоны, включающие те или иные фазовые превращения и изменения структуры сплава;

7) чередование теплосмен и механических нагрузений: сочетание действия теплосмен с внешней статической или вибрационной нагрузкой; жесткое защемление образца и использование температурных напряжений как напряжений от внешних статических повторно действующих нагрузок или создание в свободном образце внутренних объемных температурных напряжений;

8) характер испытаний: испытания типа технологических проб, дающие сравнительные показатели, действительные для данного типа образца, для данных условий и порядка изменения теплового режима; испытания с количественным определением напряжений и деформаций, возникающих при действии теплосмен;

9) критерии сопротивления термической усталости: использование в качестве критерия числа циклов до появления первых трещин, их развития до заданной протяженности и глубины, разрушения образца на части, а также оценка действия теплосмен такими косвенными показателями, как скорость роста трещины, накопление остаточной деформации, накопление устойчивости и т. д.

Сопротивление термической усталости может быть представлено графиками, отобра-

жающими распространение трещин по поверхности циклирования и вглубь от нее в зависимости от числа циклов теплосмен. Такие графики содержат также информацию о начале видимого разрушения. Отражая в достаточной мере кинетическую сторону трещинообразования и влияние на него свойств материала, эти зависимости не связаны непосредственно с термическими напряжениями. Метод исследования сопротивления термической усталости материалов, который состоит в одновременном испытании в одинаковых температурных условиях достаточно большого числа образцов, имеющих форму толстостенного кольца, позволяет значительно продвинуться в решении данной проблемы. Разница в напряженном состоянии при выбранном способе нагрева — охлаждения задается в этом случае величиной наружного диаметра. Расчетным путем определяются значения температур и напряжений в зависимости от принятых условий испытаний или параметры испытаний, которые обеспечивают различные значения амплитуды термических напряжений. Это позволяет получать зависимости, подобные кривым Велера для усталостных испытаний при механическом нагружении.

Важным критерием оценки сопротивления материалов термической усталости является уменьшение долговечности при механических испытаниях в связи с наложением теплосмен. Этот критерий особенно целесообразно использовать для эксплуатационной оценки материалов, подвергнутых поверхностной закалке, химико-термической обработке и др.

Таким образом, в связи с отсутствием до настоящего времени критерия обобщенной количественной оценки сопротивления термической усталости такими критериями чаще всего служат кривые термической усталости, связывающие число циклов до разрушения с величиной конкретного температурного перепада, суммарной (упругой и пластической) деформацией, накопленной деформацией или с условными напряжениями, вычисленными по значениям деформаций.

## Установки для испытаний

Для испытания материалов на термическую усталость применяют большое число различных установок. Некоторые из этих установок схематически представлены на рис. II.11.

При использовании для нагрева образцов токов высокой частоты применяют установку, показанную на рис. II.11, а. Она состоит из индуктора 1, спрейера 3 и гидравлического цилиндра 4, с помощью которого образец 2 перемещается из зоны нагрева в зону охлаждения, и наоборот. Для гидравлического цилиндра и спрейера используют воду из заводской магистрали. Изменение подачи воды осуществляют с помощью золотника, перемещаемого электромагнитом. Последний соединен с реле времени лампового генератора. Включение генератора на нагрев и реле на новый цикл осуществляется концевым выключателем в конечный момент подъема образца. Отработку темпера-

турных условий нагрева и продолжительности цикла выполняют с помощью образца с зачеканенной термопарой  $T$ .

Для проведения массовых испытаний на термическую усталость большого числа образцов разработана автоматическая уста-

ноу она поворачивается с помощью двух направляющих упоров  $5$  со скосами. Первая часть поворота осуществляется с помощью верхнего упора. При этом один из трех стержней траверсы скользит по его наклонной поверхности до ограничительного высту-

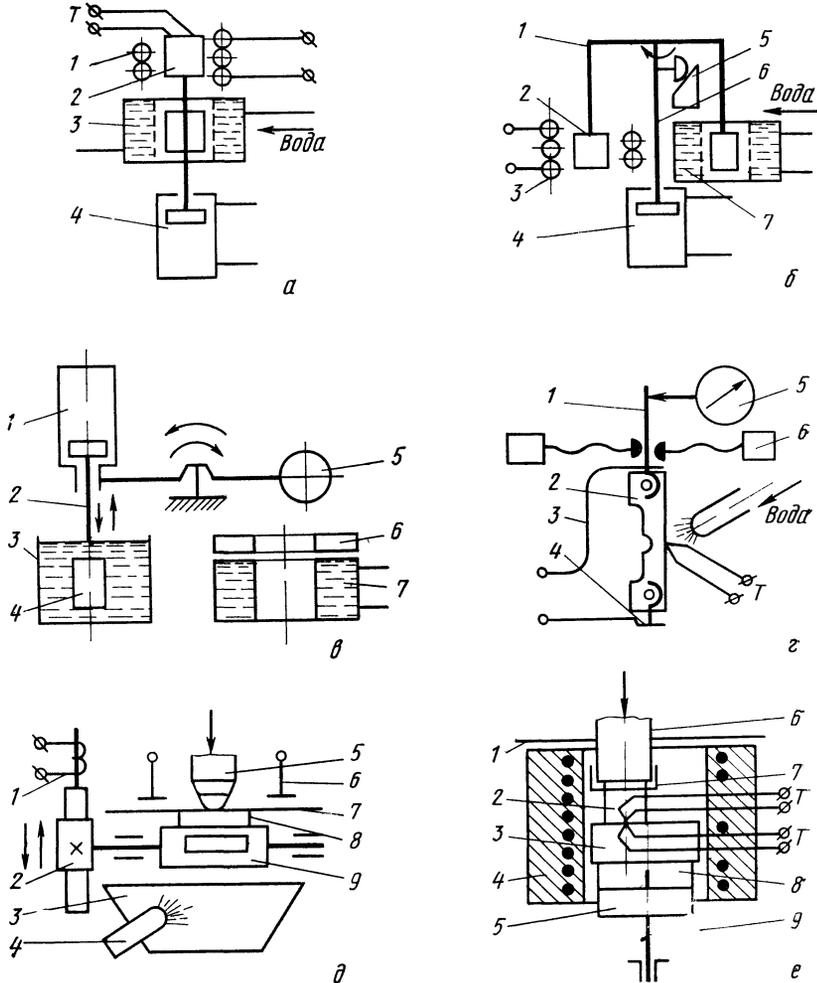


Рис. II.11. Схема установок для определения сопротивления термической усталости

новка, схема которой представлена на рис. II.11, б. Установка является универсальной — термоциклирование может быть проведено в различных условиях: нагрев — в индукторе, соляной или металлической ваннах, а охлаждение — в воде, водяном или воздушном спрейерах. Цикл испытаний следующий: нагрев до заданной температуры индуктором  $3$ , охлаждение с помощью спрейера  $7$  и подсушка образцов в воздушном спрейере (на схеме не показан).

Для проведения испытаний образцы собирают в пакеты  $2$ , которые подвешивают к траверсе  $1$ . Перемещение траверсы с образцами вверх и вниз и поворот ее осуществляются с помощью пневматического подъемника  $4$ . Траверса свободно перемещается на верхнем конце штока  $6$ . В новую пози-

цию она поворачивается с помощью двух направляющих упоров  $5$  со скосами. Первая часть поворота осуществляется с помощью верхнего упора.

При этом один из трех стержней траверсы скользит по его наклонной поверхности до ограничительного высту-

па. Дополнительный поворот происходит во время опускания при попадании другого стержня траверсы на скос нижнего упора. Управление работой установки осуществляется при помощи реле времени, связанного с электромагнитной катушкой. При включении ее обмотки перемещается поршень золотникового распределителя и сжатый воздух поступает в нижнюю или верхнюю часть цилиндра пневматического подъемника.

Разработан также упрощенный вариант этой установки (рис. II.11, в), которая хорошо зарекомендовала себя при проведении многочисленных экспериментов по изучению сопротивления термической усталости штамповых материалов. Установка имеет два пневматических цилиндра  $1, 5$  для переме-

щения набора образцов 4 соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Цилиндр 1 закреплен на подвижной каретке 2. Управление последовательным перемещением поршней пневматических цилиндров и выполнение заданных режимов нагрева и охлаждения осуществляется с помощью блока реле и двух конечных выключателей. Нагрев образцов производится в ванне или индукторе 3. Для охлаждения их предусмотрены водяной 7 и воздушный 6 спрейеры, заблокированные в один агрегат. Воздушный спрейер обеспечивает сдувание влаги и подсушку образцов на выходе их из водяного спрейера.

Для исследования поведения материалов в условиях теплосмен, сопровождающихся механическим нагружением, применяют установку с нагревом образцов за счет электросопротивления (рис. II.11, е). Она изготовлена на базе сварочного трансформатора. Ток к головкам образца 2 подводят с помощью двух медных шин 3 и 4, одна из которых (3) является гибкой. Гнезда для головок выполнены по их профилю. Механическое нагружение осуществляют с помощью нагрузочной вилки 1 и винтовой пары 6. Верхний конец вилки изготовлен как упругий динамометр, что позволяет, используя индикатор 5, измерять прилагаемое усилие.

При циклическом механическом нагружении винтовую пару заменяют кулачковым устройством с механическим приводом. Тем самым обеспечивают проведение не только термоусталостных испытаний при различных параметрах цикла нагрев — охлаждение, но и испытаний на механическую усталость с нагревом до заданной температуры за счет электросопротивления образца. Форма образцов обеспечивает возможность проведения испытаний на растяжение после заданного числа теплосмен.

Для изучения сопротивления термической усталости в условиях теплоконтактного нагрева применяют установку, схема которой показана на рис. II.11, д. Нагрев образцов происходит во время прижима разогретой шины 7 из жаростойкого сплава, ток к которой подводят с помощью медных токопроводов 6. Вывод установки на заданный режим термоциклирования осуществляют с помощью образца с зачеканенной термопарой. Образцы 8 расположены под углом 45° друг к другу на опорном валу 9. Поворот вала производится с помощью реечной передачи 2 при включении или выключении магнитной подушки 1. Вода, охлаждающая нагретый образец после поворота его в горизонтальное положение, поступает из двух боковых спрейеров 4, стекает в бачок 3 и в канализацию.

Установка может эксплуатироваться с любым нагружающим устройством 5, подходящим по развиваемому усилию и приспособленным для автоматического переключения, например, с прессом Бринелля. Полная автоматизация работы достигается с помощью блока реле времени, обеспечивающего попеременную выдержку обоих образцов под нагрузкой.

Для изучения контактного взаимодейст-

вия поверхностей в условиях, имитирующих систему «гравюра штампа — деформируемый металл», используют устройство, схема которого приведена на рис. II.11, е. Оно позволяет осуществлять запись температур двух образцов: штамповой стали 2 и деформируемого металла 3. Для этого оба образца снабжены термопарами, зачеканенными в их поверхность. Для нагрева и испытаний образец 3 помещают в пространство печи сопротивления 4, где поддерживают заданную температуру. Образец 2 вводят в печь; при определенном давлении он контактирует с поверхностью деформируемого металла.

Устройство устанавливают на деформирующей установке, например прессе Бринелля. Сборная эксцентриковая подставка 5, 8 закрепляется на винтовом валу прибора 9; образец 2 с помощью специальной оправки 6, 7 крепят к шпинделю. Перемещение образца 3 относительно образца 2 производят поворотом верхней части подставки 8 относительно нижней 5. К оправке 6 присоединен также экран 1. В нерабочем состоянии верхнее отверстие печи закрыто крышкой, которая убирается непосредственно перед сближением образцов. Последнее обеспечивается подъемом винтового вала прессы. В конечный момент подъема включается запись температур обоих образцов.

## 10. Испытания на изнашивание

### Способы оценки износостойкости

Наиболее надежной проверкой правильности выбора материала или способов его обработки применительно к определенным деталям машин являются испытания детали непосредственно на машине в условиях эксплуатации (натурные испытания). Такой метод используется наиболее часто, однако он связан с практическими трудностями (длительность испытаний, необходимость демонтирования машины для установления величины износа). Результаты испытания на изнашивание в этом случае могут оцениваться по изменению служебных свойств машины (например, по уменьшению точности обработки изделия), по изменению размеров деталей, а также косвенным путем (например, по увеличению утечки масла между плунжером и цилиндром). Наиболее часто величину износа определяют путем микрометража или взвешивания деталей до и после испытания. Применяют также следующие методы: искусственных баз — измерение изменения формы и глубины лунки, вырезанной на поверхности трения алмазным резцом, в процессе изнашивания; определения содержания железа в масле — по мере изнашивания испытываемой детали содержание железа в смазке увеличивается; радиоактивный — измерение изменения интенсивности излучения продуктов износа, попадающих в масло в процессе изнашивания поверхности детали, которой сообщена радиоактивность

### Испытания в лабораторных условиях

Весьма широкое распространение на практике получили лабораторные методы испы-

таний на изнашивание. Многообразие схем испытаний на абразивное изнашивание (наиболее часто встречающееся на практике) можно условно разбить на следующие группы:

- 1) изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы;
- 2) изнашивание при трении об абразивную прослойку;

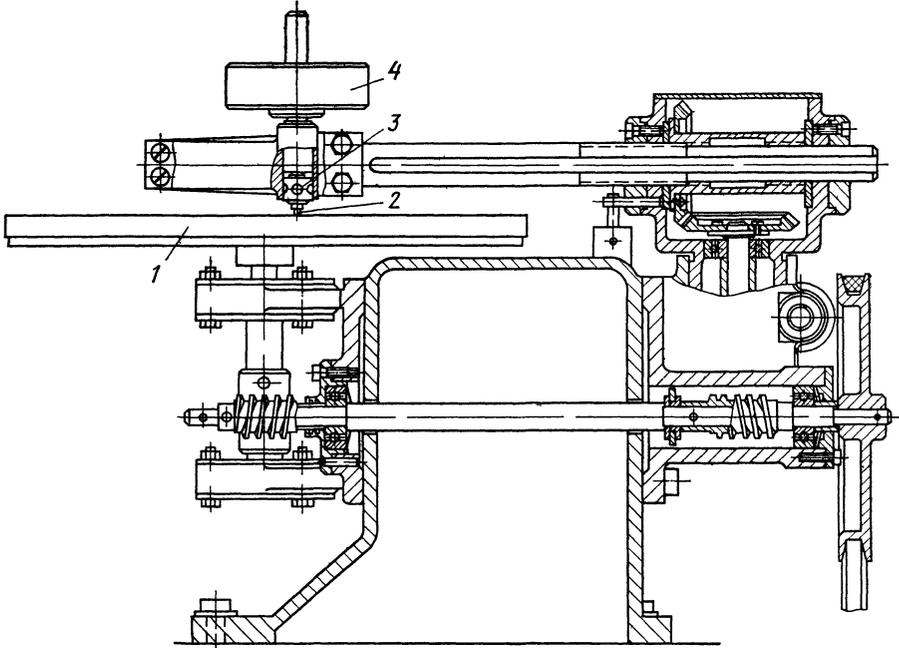


Рис. II.12. Схема машины X4-Б для испытания на изнашивание образца при трении о закрепленные абразивные частицы

- 3) изнашивание при трении в абразивной массе;
- 4) ударно-абразивное изнашивание;
- 5) изнашивание в струе абразивных частиц;
- 6) изнашивание в газовом потоке (или в потоке жидкости), увлекающем абразивные частицы.

К наиболее распространенным схемам испытания на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы относятся испытания на машине X4-Б и испытания по немецкому стандарту (ДИН). Машина X4-Б разработана в Институте машиноведения. На плоской стороне вращающегося металлического диска 1 (рис. II.12) закреплена абразивная шкурка. Цилиндрический образец 2 диаметром 2 мм и длиной 10—15 мм, помещенный в державку 3 и находящийся под нагрузкой 4, трется своим торцом о шкурку и перемещается при вращении диска в радиальном направлении; путь трения представляет собой спираль Архимеда. Поверхность шкурки разделена на зоны с равной длиной пути трения. В этих зонах ведется испытание изучаемого и эталонного материалов. Износ определяется по уменьшению длины или массы. Результаты испытаний выражаются в виде относительной износостой-

кости, равной отношению износа эталона к износу испытуемого материала за равные пути трения в одинаковых условиях испытания.

Существенными отличиями испытаний по методике ДИН от рассмотренной методики являются увеличение размеров испытуемого образца (диаметр 10 мм, длина 30 мм), изменение кратности его прохождения по од-

ной и той же поверхности шкурки (по ДИН — 20 раз, на X4-Б — 2 раза), а также неодинаковое выражение результатов испытаний.

Изнашивание при трении об абразивную прослойку происходит тогда, когда между поверхностями двух твердых тел, находящихся в относительном движении, имеются свободные абразивные частицы, через которые от одного тела к другому передается нагрузка. Прослойка может состоять из одного или нескольких слоев таких частиц. Абразив может быть различной природы и прочности, обладать разными абразивной способностью, зернистостью и формой. Нагрузки, передаваемые через абразивные зерна, могут быть неодинаковой величины. Характер относительного движения твердых тел также может быть различным (скольжение, качение, сочетание скольжения с качением, возвратно-поступательное движение, возвратно-вращательное движение, скольжение с периодическими разобращениями поверхностей и т. д.). Могут наблюдаться разные соотношения механических свойств трех тел (двух твердых тел и абразивных частиц). В зависимости от этих свойств и условий трения может произойти шаржирование абразивом одной из поверхностей (бо-

лее мягкой), т. е. прочное внедрение в нее абразивных частиц и их закрепление. В этом случае условия изнашивания будут аналогичны абразивному изнашиванию о закрепленные абразивные частицы. Степень закрепленности может быть различной, что зависит от соотношения твердостей и других свойств твердых тел.

шего абразива. В таких же условиях испытывается эталонный материал; относительная износостойкость определяется как отношение износа эталонного и испытываемого материалов.

Машина X-1 позволяет устанавливать износостойкость материалов при возвратно-поступательном движении сопряженных образ-

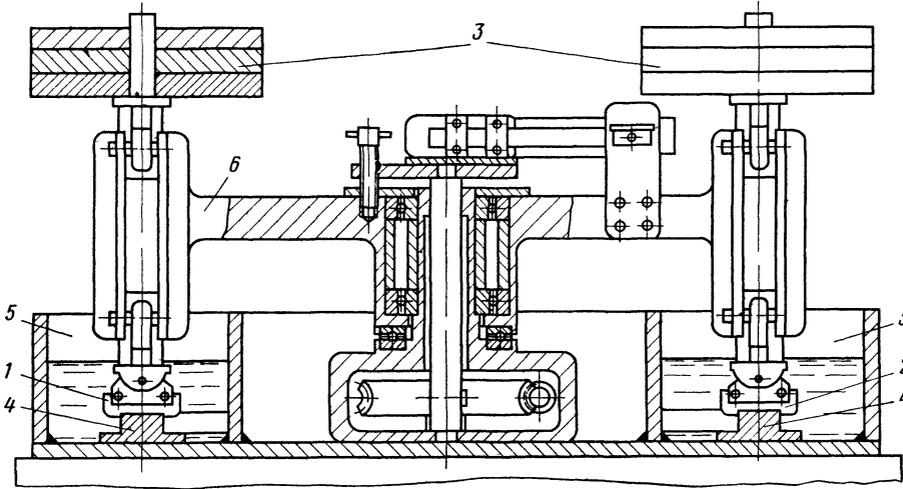


Рис. II.13. Схема машины НК для испытания на изнашивание при трении об абразивную прослойку

Известен ряд методов и машин для испытания по этой схеме абразивного изнашивания. Более других распространены испытания на машине НК, по схеме Бринелля—Хаворта и на машине X-1.

Испытательная машина НК (неподвижное кольцо) сконструирована Институтом машиноведения на базе лабораторных бегунов для размола. Два одинаковых образца 1 и 2 (рис. II.13) — первый из испытываемого, второй из эталонного материала — скользят под нагрузкой 3 по плоской поверхности кольцевой полосы 4 из красной меди, уложенной на дно кольцевого сосуда 5, в котором находятся вода и песок. Песок попадает на поверхность трения (при помощи скребков, движущихся перед образцами), вызывая изнашивание образцов. Державки образцов движутся на шариковых опорах в вертикальных направляющих, закрепленных по концам вращающейся поперечины 6. Износ определяется по потере массы образцов. Результат испытания выражается в виде относительной износостойкости, равной отношению износа эталона к износу испытываемого материала.

При испытании по схеме Бринелля—Хаворта (рис. II.14) к вращающемуся резиновому диску 1 под нагрузкой прижимается своей плоской стороной образец 3. Из бункера через воронку 2 и трубочку с калиброванным отверстием просыпается дозированное количество абразивных частиц (кварцевый песок), которые захватываются диском и протаскиваются им по поверхности образца. Износ определяется по потере массы образца при определенном количестве прошед-

цов или деталей при наличии абразивных частиц на поверхности трения. Схема этой машины показана на рис. II.15. К детали 1, играющей роль ползуна и получающей возвратно-поступательное движение в цилинд-

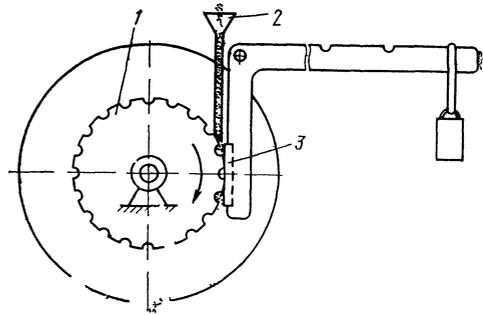


Рис. II.14. Схема испытания на изнашивание по методу Бринелля—Хаворта, усовершенствованная институтом машиноведения

ре 2 посредством механизма, состоящего из кривошипа 3 и шатуна 4, прикреплен цилиндрический образец 5. В неподвижном адаптере 6 лежит разрезанное чугунное кольцо, которое стягивается стальной тонкой лентой так, что это кольцо прижимается к поверхности образца с заданным удельным усилием. В сосуд 7 налито масло с замешанными в нем мелкими абразивными частицами. При движении образец периодически погружается в масло, взбалтывая его и не давая абразиву осесть. На поверхности

трения образца и кольца попадает масло с абразивом и обе детали постепенно изнашиваются. Величина износа определяется по потере массы (взвешиванием). Для устранения разбрызгивания масла сосуд подвешивают на пружинах.

Есть много вариантов испытания на изнашивание металлов при трении в абразивной массе, отличающихся друг от друга схемой

шваивания; при очень больших удельных нагрузках может интенсивно разрушаться сам абразив. Самая малая интенсивность изнашивания металлического образца наблюдается при его скольжении по поверхности уплотненной сыпучей абразивной массы под малой нагрузкой.

Среди машин для испытания на изнашивание этого типа следует в первую очередь

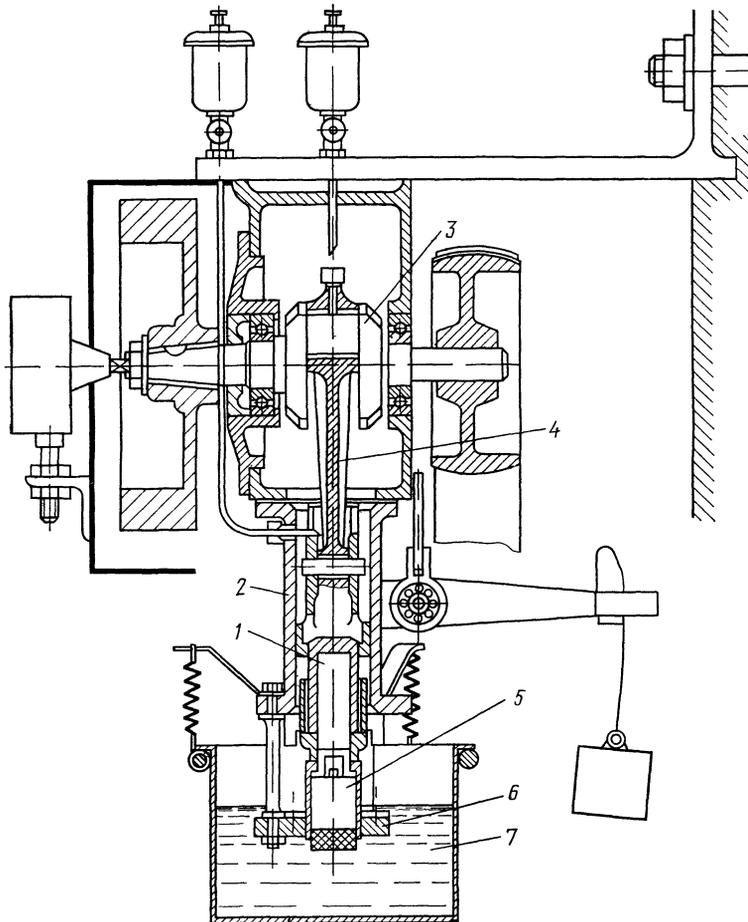


Рис II 15. Схема машины X-1 для испытания на абразивное изнашивание

и условиями испытания. Обычно при выборе схемы и условий испытания исходят из необходимости с большим или меньшим приближением воспроизвести эксплуатационные условия изнашивания. Удобным признаком для подразделения методов испытания на изнашивание в абразивной массе является интенсивность изнашивания, которая зависит от нагрузочного режима и соотношения свойств испытуемого металла и абразива. Условно испытания по величине удельной нагрузки на поверхность трения можно разделить на три группы. Испытания при малых, средних и больших удельных нагрузках. При очень малых удельных нагрузках изнашивание может проходить с чрезвычайно малой интенсивностью, соответствующей переходу к окислительному характеру изна-

навать машину типа «вращающаяся чаша» (рис. II.16). В машине имеется два конических уплотняющих катка 1, служащих для выравнивания слоя абразивной массы. Чаша 2 вращается вокруг вертикальной оси с частотой 60 мин<sup>-1</sup>. Державка 3 для крепления образца 5 (их две, расположенные симметрично) удерживает образец на определенном расстоянии (150 мм) от оси вращения чаши. Имеется счетчик числа оборотов 4. Для получения свежей абразивной поверхности служат рыхлители. Толщина слоя абразивной массы равна 40 мм. Испытуемый образец имеет форму пластинки; он скользит плоской стороной, установленной под небольшим углом к поверхности сыпучей смеси. Изнашивание металла на этой машине имеет малую интенсивность.

Представляет интерес шнековая машина для испытаний на абразивное изнашивание (рис. II.17), разработанная В. Н. Ткачевым. При испытании на этой машине резец из испытуемого материала режет непрерывно подводимую к нему уплотненную абразив-

масса определенного состава и влажности, засыпанная в бункер, подается вращающимся вертикальным шнеком в нижнюю часть машины, где при помощи другого вращающегося горизонтального шнека уплотняется до заданной степени плотности и затем вы-

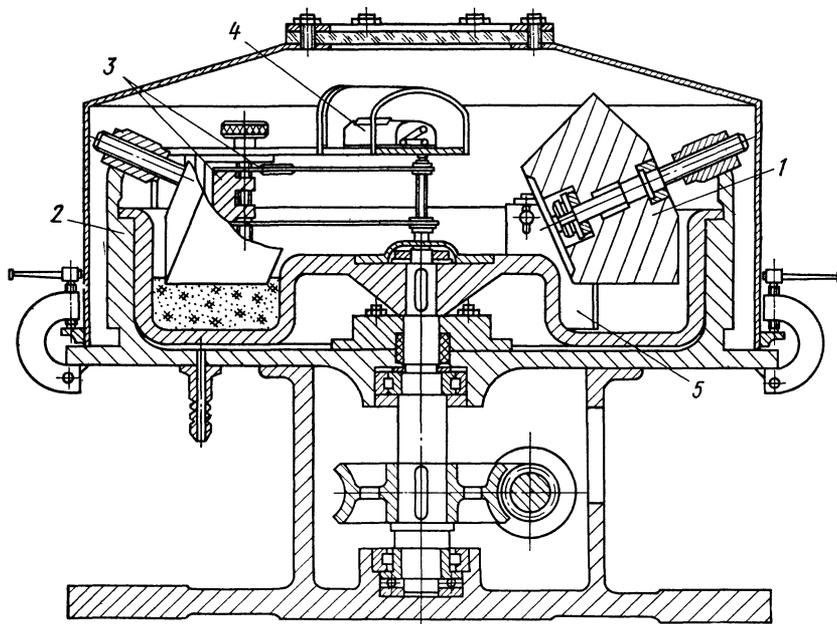


Рис. II.16. Схема машины типа «вращающаяся чаша» для испытания на изнашивание

ную массу. Этим испытанием в лабораторных условиях воспроизводится изнашивание лезвия резца, аналогичное изнашиванию лез-

жимается через кольцевую горловину; образец в виде резца специальной формы, закрепленный в диске, быстро вращающемся вокруг оси, совпадающей с осью кольцевой горловины, режет выдавленную из горловины абразивную массу и постепенно изнашивается. Показателем износа служит изменение длины образца.

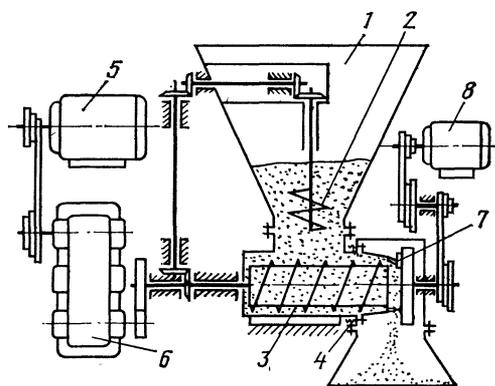


Рис. II.17. Схема шнековой машины для испытания на абразивное изнашивание:

1 — бункер; 2 — вертикальный шнек; 3 — горизонтальный шнек; 4 — пружинное крепление горловины; 5 — электродвигатель, приводящий шнеки; 6 — редуктор; 7 — образец, закрепленный во вращающемся диске; 8 — электродвигатель, приводящий диск с образцами

вий почворезущих машин. Конструкция машины предусматривает возможность менять плотность абразивной массы, подаваемой к резцу, в широких пределах. Абразивная

Во многих случаях абразивное изнашивание происходит при ударном приложении нагрузки с такой интенсивностью, при которой проявляется хрупкость твердых материалов или их твердых структурных составляющих. В поверхностном слое материала появляются трещины, наблюдается выкрашивание, сколы и существенное понижение износостойкости. Динамическое воздействие на материал может быть разных характера и интенсивности; при ударе разрушается и меняет свои абразивные свойства само абразивное тело. Возможных вариантов условий изнашивания при ударно-абразивном изнашивании много, поэтому разнообразны и конструкции установок для испытания материалов при этом виде изнашивания.

Одной из машин, получивших распространение в лабораторной практике при испытаниях на ударно-абразивное изнашивание о закрепленные частицы, является машина типа Х4-БМ2 и ее модернизированный вариант — машина УАМ. Схема испытания на машине УАМ показана на рис. II.18. Барабан 1, на котором закреплена шлифовальная шкурка, вращается прерывисто; число остановок за один оборот достигает 172.

В период остановки образец 2 действием своей массы, массы державки 3 и груза 4 падает, ударяется о шкурку и начинает подниматься для следующего удара. Пока он поднимается барабан поворачивается, а образец продольно перемещается.

Более совершенная машина для испытания на ударно-абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы создана

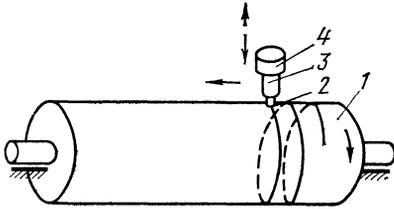


Рис. 11.18. Схема испытания на машине УАМ

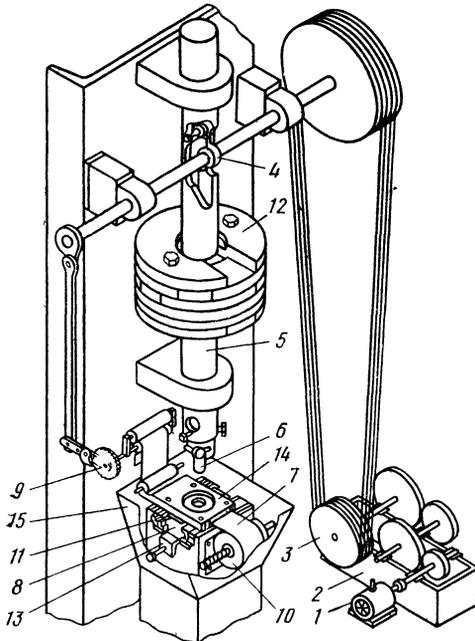


Рис. 11.19. Схема машины для испытания на ударно-абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы

В. Н. Виноградовым, Г. М. Сорокиным и Г. К. Шрейбером в Московском институте нефтехимической и газовой промышленности.

Образец цилиндрической формы диаметром 10 мм и длиной 25—30 мм падает с некоторой высоты, ударяясь своим торцом о шлифовальную шкурку, лежащую на наковальне. Пока образец поднимается, шкурка перемещается, подставляя при этом свою свежую поверхность для нового удара. От электродвигателя 1 (рис. 11.19) через редуктор 2 и клиноремennую передачу 3 приводится во вращение вал, на котором установлен кулачок 4. Шпиндель 5 вместе с образцом 6 поднимается с помощью кулачка и совершает повторные удары по шлифо-

вальной ленте-шкурке 7, лежащей на наковальне 8. Подача ленты происходит синхронно с движением шпинделя с помощью храпового механизма 9. Оработанная лента наматывается на катушку 10. Для устранения влияния износа самой наковальни на результаты испытания применяют вкладыш 11, который перемещается после каждого опыта или поворачивается другой гранью. Масса грузов 12, закрепленных на шпинделе, может меняться. Приспособление 13 служит для обеспечения постоянства расстояния от торца образца до наковальни, поскольку это расстояние может изменяться вследствие

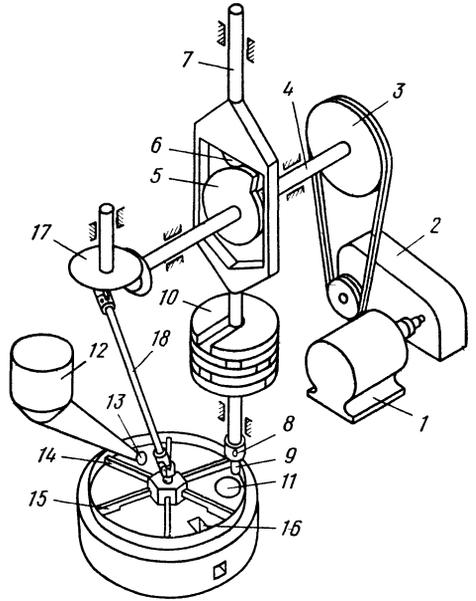


Рис. 11.20. Схема машины для испытания на ударно-абразивное изнашивание о слой свободных абразивных частиц

износа образца. Для предотвращения прилипания шкурки к образцу служит прижим 14. Во время испытания на ленту в зону удара образца подают воду, охлаждающую образец и устраняющую прилипание к нему абразивных частиц. Кожух 15 защищает от разбрызгивания воды. Износ определяют взвешиванием (по потере массы образца за время испытаний).

Для испытания на ударно-абразивное изнашивание при ударе по слою свободных абразивных частиц, лежащих на стальной наковальне, в том же институте разработана машина, схема которой показана на рис. 11.20. От электродвигателя 1 через редуктор 2 и клиноремennую передачу 3 вращение передается на вал 4 и кулачок 5, который с помощью ролика 6 поднимает шпиндель-боек 7, на торце которого в оправке 8 помещен испытуемый образец 9. Под действием грузов 10 шпиндель 7 падает; при этом происходит удар образца по наковальне 11, на которой имеется слой абразива.

Необходимо, чтобы каждый удар образца приходился по свежей порции абразива

постоянной толщины, лежащего на поверхности наковальни, не имеющей следов изнашивания. Поэтому во время подъема образца после очередного удара наковальню следует освободить от отработанного абразива и подать на нее порцию свежего абразива. Эти операции выполняют с помощью специальных приспособлений. За период одного удара осуществляют: подачу из бункера 12 очередной порции абразива, отмеренной дозатором 13; формирование из этой порции подвижными ножами 14 слоя определенной заданной толщины; очистку наковальни от отработанных абразивных частиц

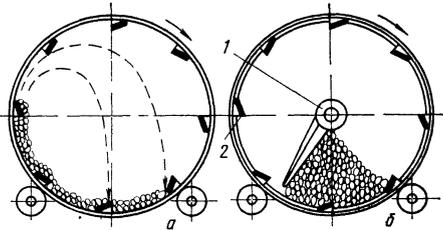


Рис. 11.21. Поперечный разрез барабана машины ЧП-1 со свободным (а) и ограниченным (б) движением абразива:

1 — неподвижный щиток; 2 — кассета с образцами

щетками 15; транспортировку этих частиц щетками в бункер 16. Абразив в зону удара подают щетки, приводимыми в движение с помощью приводного механизма, состоящего из конической передачи 17 и валика 18. Машина снабжена устройством для регулирования толщины слоя абразива на наковальне и приспособлением для перемещения вкладышей наковальни после каждого цикла испытаний. Диаметр образца 10 мм, толщина слоя абразива (кварцевого песка) 1 мм, число ударов в минуту 55, 100 или 120. Износ определяют взвешиванием по потере массы образца за время испытаний.

Представляет интерес машина типа ЧП-1, разработанная К. П. Чудаковым и И. В. Петровым в Московском инженерно-строительном институте им. В. В. Куйбышева. Машина предназначена для испытания на изнашивание наплавленного металла при ударно-абразивном воздействии с ударами высокой интенсивности. С ее помощью оценивают работоспособность материалов рабочих деталей строительных и дорожных машин, контактирующих с твердым грунтом, рудой или камнями. На рис. 11.21 приведен схематический разрез барабана машины, который опирается на ролики и приводится во вращение от электродвигателя. Испытуемые образцы закрепляются на внутренней поверхности барабана, частично заполняемого кусками абразивного материала (руда, базальт, гранит). Конструкция машины допускает широкое варьирование условий испытания. В барабане одновременно устанавливают большое число образцов, собранных в кассеты. Интенсивность ударно-абразивного воздействия оценивается с помощью коэффициента динамичности, представляющего собой отношение твердости НВ ста-

ли 110Г13Л (эталона) после испытания к ее твердости НВ до испытания.

Изнашиванию абразивными частицами, увлекаемыми потоком воздуха или газов (называемому также эрозией), обычно подвергаются трубы и приемные устройства пневматического транспорта различного назначения; детали дымососов; трубы экономайзеров и детали котлов; лопатки компрессоров; направляющие и рабочие лопатки газовых турбин; детали загрузочных устройств доменных печей и т. д. В ряде случаев газовый поток имеет повышенную температуру и содержит агрессивные компоненты, что усложняет условия изнашивания.

Среди большого числа установок, применяемых для испытания на изнашивание в этих условиях, заслуживает внимания установка конструкции ЦНИИТмаша, схема которой приведена на рис. 11.22. В испытательной установке воспроизводятся основные условия работы материала лопаток газовой турбины: температура, напряженное состояние и изнашивание горячим газовым потоком, несущим абразивные частицы. Образцами являются лопатки, которые могут быть разной длины, что обеспечивает разную величину растягивающих напряжений. Направление движения частиц абразива относительно лопаток определяется по следам износа на образцах, смонтированных в ротор. Скорость движения частиц зависит от скорости потока. Износ лопаток определяют взвешиванием по потере массы лопаток за время испытаний.

Эффективна установка для испытания на изнашивание в газо-абразивном потоке при повышенных температурах, разработанная Ю. А. Юзвенко в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Схема этой установки показана на рис. 11.23. К подогревателю 1 через регулятор давления 2 и расходомер 3 подводится сжатый воздух, который подогревается до 830°С природным газом, проходящим через вентиль 4. Вытекающий из насадки 5 газ увлекает абразив, поступающий из дозатора 6. Регулирование работы дозатора осуществляется с помощью вентиля 7 и дифференциального манометра 8. В трубопроводе 9 абразивные частицы разгоняются и нагреваются, проходя через сопла; затем струя попадает на образец. В испытательной камере может быть помещено шесть образцов, испытываемых поочередно. Износ оценивается по потере массы образцов за время испытания.

К числу машин универсального типа, широко применяющихся в лабораторной практике, относится машина типа МИ-1М. По конструкции она аналогична известной машине Амслера. На этой машине можно проводить испытания при трении скольжения, при трении качения, при трении качения с проскальзыванием; испытания можно проводить с подачей смазки и без нее. При необходимости в пространство между трущимися поверхностями с помощью специального приспособления можно подводить абразив.

Размеры и форма образцов для испытания на изнашивание на машине типа МИ-1М приведены на рис. 11.24. Диаметр образцов

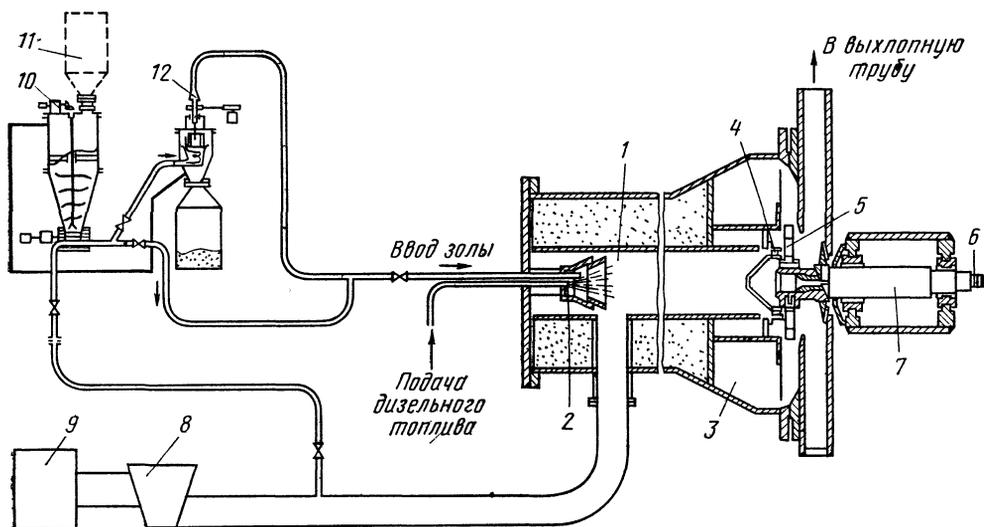


Рис. 11.22. Схема установки конструкции ЦНИИТмаша для испытания на изнашивание в газо-абразивном потоке при повышенных температурах:

1 — камера сгорания; 2 — форсунка; 3 — лопаткоулавливатель; 4 — направляющие лопатки; 5 — рабочие лопатки; 6 — токосъемник; 7 — ротор; 8 — компрессор; 9 — фильтр; 10 — отвейатель; 11 — устройство для подачи золы; 12 — питатель

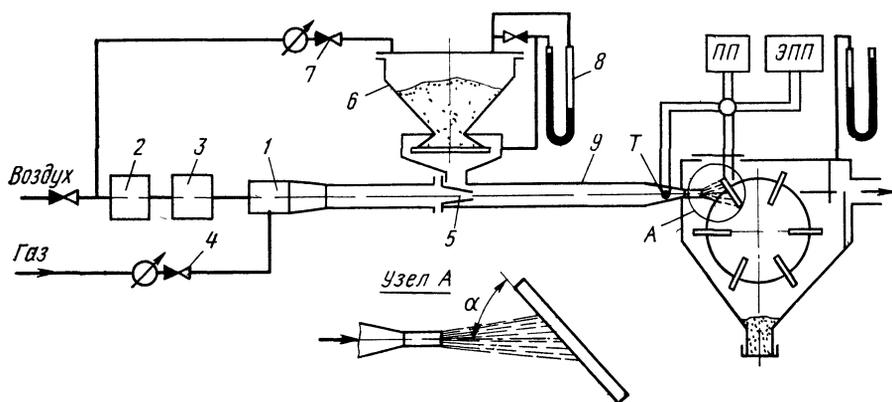


Рис. 11.23. Схема установки для испытания на изнашивание в газо-абразивном потоке при повышенных температурах, разработанной в Институте электросварки им. Е. О. Патона

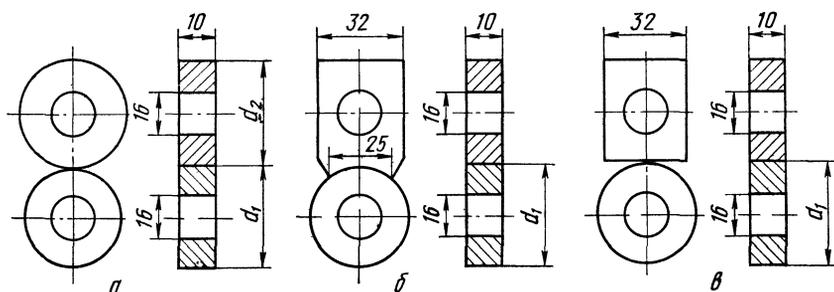


Рис. 11.24. Образцы для испытания на изнашивание на машине типа МИ-1М:

а — при чистом качении (верхний образец свободно насажен на оси) и при качении с проскальзыванием (верхний образец вращается вместе с осью); б — при скольжении; в — при скольжении, схема испытания «врезанием»

может быть от 30 до 50 мм, но обычно его принимают равным 40 мм. Образцы вместе с валами, на которые их насаживают, вращаются в разные стороны. Частота вращения верхнего вала с образцом  $180 \text{ мин}^{-1}$ , нижнего —  $200 \text{ мин}^{-1}$ . Поэтому при образцах одинакового диаметра отмечается прокаливание, равное 10%. Процент прокаливания можно регулировать за счет изменения соотношения диаметров образцов. Для решения проблемы повышения стой-

тательных машин с записью индикаторных диаграмм. Сопоставление усилий в любой момент испытаний позволяет определить величину коэффициента трения. Одна из машин для приложения нормального деформирующего усилия может быть заменена любым нагружающим устройством с силоизмерителем. Для проведения испытаний при повышенных температурах к пластинам 5 и 7 подводят ток от вторичной обмотки трансформатора.

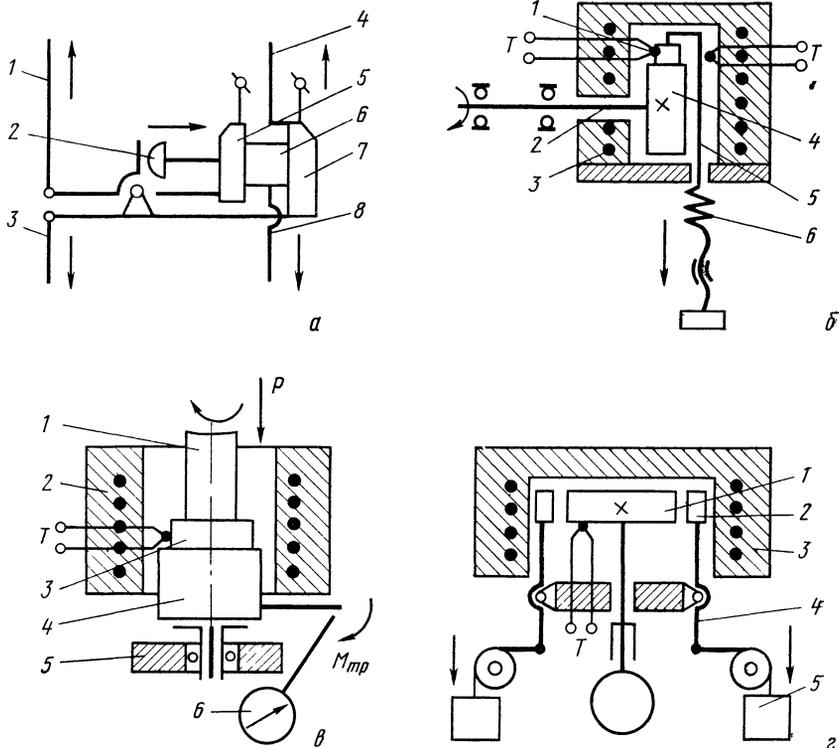


Рис. 11.25. Схема установок для определения износостойкости

кости ряда изделий (в частности, штампового инструмента) определение коэффициента трения и исследование свойств материалов пары трения имеют первостепенное значение. При этом должно быть изучено влияние таких важнейших факторов, определяющих стойкость инструмента, как давление, смазка, температура и др.

На рис. 11.25, а представлена установка, которая позволяет путем непосредственного измерения сил трения и нормального давления установить коэффициент трения при различных значениях давления по мере развития пластической деформации. При этом возможно получение этой зависимости при разных температурах. Установка рычажного типа. Образец 6 деформируется между двумя пластинами 5 и 7 с помощью рычажной системы 1, 3 и ползуна 2. Смещение образца относительно пластин осуществляется с помощью двух тяг 4, 8.

Деформация и смещение образца происходят одновременно с помощью двух испы-

При исследовании износостойкости материалов кузнечных штампов большое внимание уделяют приближению условий испытаний к условиям работы инструмента (давление, температура). Машина для испытаний на изнашивание типа МИ-1М не рассчитана на проведение таких опытов, не позволяет разместить нагревающее устройство так, чтобы образец, контргрело и сопрягаемые с ними детали находились в зоне нагрева. В модернизированном варианте машины предусмотрено размещение дополнительного нагружающего устройства (рис. 11.25, б). Образец 1, ролик 4 и сопрягаемые с ними детали нагружающего устройства размещаются в рабочем пространстве печи. Для этого к валу главного привода машины присоединен удлинительный вал 2, для чего на ее станине размещен дополнительный подшипник. Петлеобразная тяга 5, нагружающее 6 и нагревающее 3 устройства размещаются на специальном кронштейне, прикрепленном к свободной боковой поверхности станины.

Температура измеряется с помощью термомпары *T*.

Для изучения износостойкости материалов в условиях интенсивной пластической деформации поверхностного слоя образцов, а также характера деформации и свойств материала деформированного слоя применяют установку, сконструированную на базе вертикально-сверлильного станка. Такой станок имеет широкий диапазон скоростей, осевое нагружение шпинделя обеспечивает получение высоких нормальных давлений на образце, рабочее пространство станка позволяет расположить необходимые измерительные и нагревающие устройства. Подвижная часть установки 4 (рис. II.25, в) вместе с нагревательным устройством 2 с помощью радиального и радиально-упорного подшипников монтируется на плите 5, прикрепляемой к столу станка. К подвижной части присоединяется динамометр 6 для определения момента трения  $M_{тр}$ . Трубчатый или цилиндрический индикатор (контртело) 1 вводится в нагревательное пространство через отверстие в крышке печи. Температура образца 3 измеряется термомпарой *T*.

Для проведения ускоренных сравнительных испытаний на изнашивание при повышенных температурах целесообразно применять установку, схема которой показана на рис. II.25, г. В основу испытаний положен известный принцип изнашивания сухариков 2 (испытуемый материал) диском 1 из металлокерамического твердого сплава. Нагружение с помощью рычажных устройств 4 осуществляется четырьмя грузами 5 (по числу образцов). Температура в нагревательном пространстве печи 3 поддерживается на заданном уровне автоматически. Износ может быть измерен либо взвешиванием образцов, либо измерением протяженности лунки на их поверхности с последующим пересчетом на величину потери массы.

## 11. Методы неразрушающего контроля

### Классификация и чувствительность методов

В соответствии с ГОСТ 4.27—71 и ГОСТ 4.28—71 существующие средства неразрушающего контроля по видам контролируемых параметров можно разделить на следующие группы:

дефектоскопы, т. е. приборы и установки, предназначенные для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности (трещин, раковин, расслоений и т. д.);

приборы для контроля геометрических параметров (наружных и внутренних диаметров, толщины стенки, покрытий, степени износа, ширины и длины изделия т. д.);

приборы для определения физико-механических и физико-химических характеристик (электрических, магнитных и структурных параметров, отклонений от заданного химического состава, измерения твердости, пластичности, контроля качества упрочненных

слоев, содержания и распределения ферритной фазы и т. п.);

приборы технической диагностики для предсказания возникновения различного рода дефектов, в том числе нарушений сплошности, изменения размеров и физико-механических свойств изделий на период эксплуатации.

Контроль с применением дефектоскопов основан на получении информации в виде электрических, световых, звуковых и других сигналов о качестве проверяемых объектов при взаимодействии их с физическими полями (электрическим, магнитным, акустическим и др.) или веществами.

В зависимости от принципа работы контрольных средств все известные методы неразрушающего контроля в соответствии с ГОСТ 18353—79 подразделяются на акустические, капиллярные, магнитные, визуально-оптические, радиационные, радиоволновые, тепловые, методы контроля течением, электрические, ультразвуковые и токовихревые.

В дефектоскопии для контроля металлов и изделий чаще всего применяются визуально-оптические, капиллярные, магнитные, токовихревые, ультразвуковые и радиационные методы, которые позволяют осуществлять сплошной контроль. Указанные методы позволяют автоматизировать процесс контроля, благодаря чему достигается его высокая производительность. В движущихся изделиях или изделиях, нагретых до высоких температур, дефекты обнаруживаются путем бесконтактного контроля.

Дефектом называют каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным технической документацией. Дефекты подразделяют на явные и скрытые. Явные поверхностные дефекты выявляют глазом, а скрытые (внутренние и поверхностные, неразличимые глазом) — специальными средствами.

Выявленные дефекты в зависимости от возможного влияния их на служебные свойства детали могут быть критическими, значительными и малозначительными. При классификации учитывают характер, размеры, место расположения дефекта на детали, особенности деталей, их назначение, условия эксплуатации. Критическим называют дефект, при наличии которого использование детали по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности; значительным — дефект, который существенно влияет на использование детали по назначению и на ее долговечность, но не является критическим; малозначительным — дефект, который не оказывает такого влияния.

По происхождению дефекты изделий подразделяют на производственно-технологические — металлургические, возникающие при литье и прокатке; технологические, возникающие при изготовлении и ремонте деталей (сварке, пайке, склеивании, клепке, механической, термической и других видах обработки, нанесении гальванических покрытий и др.); эксплуатационные, возникающие после некоторой наработки деталей в результате усталости, коррозии, изнашивания и т. д.,

**Т а б л и ц а П.14**  
**Основные виды дефектов в металлах и сплавах**

Наименование дефекта	Характеристика и причины возникновения дефекта
1	2
<i>Литейные дефекты</i>	
Горячие трещины	Хорошо видимые разрывы поверхности отливки, распространяющиеся по поверхности кристаллов и имеющие неровную окисленную поверхность. Образуются в результате усадки при кристаллизации металла в форме. Характерные признаки — неровные (рваные) края и значительная ширина
Холодные трещины	Тонкие разрывы поверхности отливки, имеющие чистую, светлую или с цветами побежалости поверхность. Образуются из-за внутренних напряжений или механического воздействия при температуре ниже температуры свечения отливки. В отличие от горячих трещин холодные трещины распространяются по зернам, а не по их границам; располагаются они преимущественно в острых углах и других участках концентрации напряжений
Термические трещины	Хорошо видимые глубокие разрывы поверхности отливки. Поверхность излома раскрытой трещины — мелкозернистая с цветами побежалости. Обнаруживаются в отливках после термической обработки. Причина возникновения — высокие температурные растягивающие напряжения, совпадающие по знаку с остаточными напряжениями
Газовые раковины	Закрытые и открытые полости округлой формы с чистой и гладкой, иногда окисленной поверхностью, находящиеся в теле отливки. Причина образования — быстрое охлаждение металла в литейных формах, при котором растворенные газы (кислород, азот, водород, окись углерода и водяные пары) не успевают выделиться из отливки
Усадочные раковины	Открытые и закрытые сравнительно большие полости произвольной формы с грубой шероховатой, иногда окисленной, поверхностью, находящиеся в теле отливки. Образуются вследствие неравномерной усадки металла при кристаллизации в утолщенных участках отливки, где металл кристаллизуется в последнюю очередь. Усадочные раковины расположены между коркой и сердцевиной отливки
Рыхлость	Местное скопление мелких усадочных раковин при крупнозернистой структуре металла
Пористость	Местное скопление мелких газовых или усадочных раковин. Усадочная пористость часто располагается под концентрированной усадочной раковиной, являясь как бы ее продолжением
Песчаная (или шлаковая) раковина	Полость в теле отливки, заполненная формовочным материалом (или шлаком)
Неметаллические включения	Включения неметаллических частиц, попавших в металл извне (шлак, огнеупорный материал, графит, песок) или образовавшихся внутри металла при химическом взаимодействии в процессе выплавки и разливки (оксиды, сульфиды, силикаты, нитриды). Первые располагаются обычно в верхних частях отливок или на их поверхности, последние — в виде цепочек или сетки по границам зерен
Металлические включения Утяжина	Инородные металлические тела в основном металле отливок (неразплавленный легирующий компонент, модификатор и др.) Углубление с пологими краями, образовавшееся в результате усадки металла при кристаллизации. Под утяжиной возможны внутренние дефекты
Пленки в отливках	Пленки на поверхности или внутри отливки, состоящие из оксидов, часто с включениями формовочных материалов. К образованию пленки склонны высоколегированные стали. Причина возникновения — взаимодействие составляющих расплава при заполнении формы с атмосферой и материалом формы, в результате чего образуется тугоплавкая и плотная пленка. При механическом разрушении этой пленки в процессе заливки формы отдельные ее куски оседают в различных местах формы
Спаи	Сквозные или поверхностные с закругленными краями щели или углубления в теле отливки, образованные неслившимися потоками преждевременно закристаллизовавшегося металла. При прерывистой заливке и неравномерном поступлении металла в форму иногда возникают внутренние спаи (неслитины), одной из причин появления которых могут быть оксидные пленки, создающие значительное сопротивление движению расплава

Наименование дефекта	Характеристика и причины возникновения дефекта
1	2
Ликвационные зоны	Неоднородность химического состава в теле отливки (дендритная или зональная ликвация)
<i>Дефекты прокатанного и ковального металла</i>	
Рванины	Разрывы или надрывы металла разнообразного очертания с рваными краями
Закаты	Вдавленные и закатанные в прокатываемом металле заусенцы или возвышения (бугорки) на поверхности, образовавшиеся при предшествующем пропуске слитка через калибр прокатного стана. При этом металл заусенца или возвышения не сваривается с основной массой проката. Закат, образовавшийся от заусенца, похож на продольную трещину, а от возвышения—на плену с криволинейным незамкнутым контуром. Иногда закат образуется от остатков усадочной раковины после обрезки верхней части слитка с усадочной раковины. При прокатке раковина не заваривается из-за оксидов на ее стенках
Волосовины	Мелкие внутренние или выходящие на поверхность трещины, образовавшиеся из газовых пузырей или неметаллических включений при прокатке или ковке. Они направлены вдоль волокон металла и в поперечном изломе видны как точки. Шлаковые и песчаные включения не способны пластически деформироваться и при обжатии слитка распадаются на большое число обломков с острыми углами, образуя при вытяжке цепочки вдоль волокон. Силикаты железа, марганца и других элементов при температуре прокатки могут быть пластичны, поэтому вытягиваются вдоль волокон прокатанного металла. Обычно длина волосовин 20—30 мм, иногда она доходит до 100—150 мм. Встречаются волосовины во всех конструкционных сталях
Расслоения	Нарушения сплошности внутри прокатанного металла, представляющие собой раскатанные крупные дефекты слитка (усадочные раковины, усадочная пористость, скопления пузырей или неметаллических включений). Характерным для расслоения является то, что поверхность нарушения сплошности параллельна плоскости прокатки. Так, раскатанные неметаллические включения дают внутреннюю прослойку, разделяющую лист или профиль на две, три или несколько частей
Флокены	Волосные трещины с кристаллическим строением поверхностей стенок, образующиеся внутри проката или поковок из сталей перлитного и мартенситного классов. Флокены можно наблюдать на изломах в виде пятен круглой или овальной формы, имеющих серебристо-белую блестящую окраску и называемых «хлопьями», а на макро- и микрошлифах— в виде прямых, иногда извилистых и зигзагообразных линий длиной от нескольких десятков долей миллиметра до 5—10 мм и более. Причина образования флокенов — возникновение значительных структурных напряжений и охрупчивание стали в сердцевине, вызванное присутствием водорода, не успевшего выделиться из металла при быстром охлаждении
Внутренние разрывы	Крупные нарушения сплошности внутренней части заготовки, периодически повторяющиеся по ее длине. Поверхность излома по разрыву — крупнокристаллическая. Разрывы возникают под влиянием сил растяжения вследствие неодинаковой деформации наружных и внутренних слоев прокатываемого металла с малой пластичностью. Наблюдаются при прокатке высоколегированных сталей. Разрывы, возникшие в начальной стадии прокатки, при дальнейшей значительной деформации могут образовать расслоения
Плены прокатанного металла	Плены представляют собой сравнительно тонкие плоские отслоения по поверхности металла. В большинстве случаев плены имеют вид «языка», у которого уширенный и утолщенный конец составляет одно целое с основной массой металла. Иногда наружный контур плен приближается к замкнутому. По размеру плены бывают от мелких едва заметных чешуек до 3—5 мм и более. Причинами образования плен при прокатке могут быть неудовлетворительное качество слитков и нарушение режимов прокатки

Наименование дефекта	Характеристика и причины возникновения дефекта
1	2

*Дефекты, возникающие при различных видах соединения деталей*

Трещины в наплавленном металле	Трещины в наплавленном металле могут быть продольными и поперечными; участок трещины, как правило, сильно окислен, темный; иногда он светлый, с цветами побежалости. Причины образования трещин: неправильно выбранная марка присадочного материала; неудовлетворительное качество присадочной проволоки, обмазки или флюса; неправильные режимы и техника наплавки и сварки; высокие внутренние напряжения в швах; наличие в швах пористости и шлаковых включений
Холодные трещины в шве и переходной зоне	В изломе они светлые или со слабыми цветами побежалости. Возникают холодные трещины при охлаждении деталей в зоне пониженных температур, преимущественно при дуговой сварке низколегированной стали большой толщины. Чаще всего трещины возникают в переходной зоне вследствие неправильной техники сварки или неправильно выбранного материала (например, при сварке валиковыми швами замкнутых контуров)
Микротрещины в шве или надрывы в переходной зоне	На нетравленных шлифах под микроскопом мелкие трещины видны в виде тонких линий. Возникают они вследствие неудовлетворительного качества присадочной проволоки, обмазки или флюса
Трещины, образующиеся в сварных соединениях при термообработке деталей или узлов	Такие трещины могут иметь любое направление. Возникают они из-за несоблюдения режимов и условий термической обработки (в основном закалки) сварных узлов или вследствие неудовлетворительной (нетехнологичной) конструкции детали или узла
Непровар	Отсутствие сплавления между основным и наплавленным металлом
Поры и раковины в металле шва	Пузыри (как правило, сферической формы) различной величины, заполненные газами (водородом, окисью углерода). Образуются из-за присутствия газов, поглощаемых жидким металлом сварочной ванны в процессе сварки или наплавки
Шлаковые включения в металле шва	Неметаллические вещества (шлаки, оксиды), заполняющие небольшие объемы. Величина их колеблется в широких пределах (от микроскопических размеров до нескольких миллиметров). Форма может быть самой различной — от сферической до плоской, вытянутой в виде пленки, которая разделяет прилегающие объемы наплавленного металла
Непропай	Полное или частичное незаполнение паяльного зазора припоем
Непроклеи	Отсутствие сцепления (склеивания) в отдельных участках клееного соединения

*Дефекты, возникающие при различных видах обработки деталей*

Закалочные трещины	Разрывы металла, возникающие при охлаждении деталей преимущественно сложной формы, в процессе закалки из-за высоких напряжений. Они могут появиться и после закалки на деталях, длительное время не подвергавшихся отпуску, уменьшающему внутренние напряжения. Отличительным признаком закалочных трещин является неопределенность их направления и извилистая форма. Закалочные трещины встречаются группами, но большей частью число их на детали невелико
Шлифовочные трещины	Группа мелких и тонких разрывов, как правило, в виде сетки на шлифованной поверхности металла. Возникают при шлифовании сталей некоторых марок, склонных к образованию трещин, — закаленных высокоуглеродистых и легированных, цементованных, азотированных и хромированных. Причинами образования шлифовочных трещин являются, во-первых, неправильный режим предшествующей шлифованию термической обработки, способствовавший возникновению значительных напряжений — в этом случае даже небольшие дополнительные напряжения при шлифовании приводят к появлению поверхностных трещин, и, во-вторых, локальный перегрев металла при нарушении режима шлифования. При шлифовании низкоуглеродистых сталей шлифовочные трещины образуются редко

Наименование дефекта	Характеристика и причины возникновения дефекта
1	2
Надрывы	Неглубокие трещины, возникающие в деталях в результате холодной деформации металла, например при сверлении или развертке отверстий тупым сверлом или разверткой, накатке резьбы, изготовлении пружин, холодной штамповке, особенно когда металл имеет невысокие пластические свойства из-за дефектов структуры
<i>Дефекты, возникающие в деталях при эксплуатации машин</i>	
Усталостные трещины	Возникают под действием высоких знакопеременных напряжений. Их особенности и причины возникновения рассмотрены выше (см. гл. I).
Коррозионные повреждения	Степень коррозионного повреждения зависит от наличия агрессивных сред, качества защитных покрытий, сочетания материалов в узле и др. Коррозией часто поражены закрытые, труднодоступные для осмотра внутренние полости
Термические трещины	Возникают при резком охлаждении деталей (особенно в интервале мартенситного превращения), а также при недостаточной смазке или при заедании (схватывании) трущихся деталей, в результате чего их поверхности нагреваются до высоких температур. Термические трещины часто наблюдаются на поверхности азотированных, цементованных или поверхностно закаленных деталей, работающих при высоких удельных нагрузках
Трещины термической усталости	Возникают в результате циклически изменяющегося теплового состояния. Их особенности и причины возникновения рассмотрены выше (см. гл. I)
Трещины-надрывы в поверхностном слое	Возникают в результате высоких однократно приложенных напряжений (растяжения, изгиба, кручения), когда нагрузка превышает предел прочности детали, например при нарушении технологии правки, демонтаже и монтаже деталей с хрупким поверхностным слоем или при перегрузке деталей в эксплуатации
Механические повреждения поверхности	Забойны, вмятины, задиры, риски, местный наклеп

Таблица II.15

Чувствительность методов неразрушающего контроля

Метод неразрушающего контроля	Минимальные размеры обнаруживаемых трещин*, мм		
	ширина раскрытия	глубина	протяженность
Визуально-оптический . . . . .	0,005—0,01	—	0,1
Люминесцентно-красочный . . . . .	0,001—0,002	0,01—0,03	0,1—0,3
Люминесцентно-порошковый . . . . .	0,01—0,03	0,1—0,3	2—3
Магнитопорошковый . . . . .	0,001	0,01—0,05	0,3
Токовихревой . . . . .	0,0005—0,001	0,15—0,2	0,6—2
Ультразвуковой импульсный эхо-метод . . . . .	0,001—0,03	0,1—0,3	—
Рентгенографический . . . . .	—	1,5—3% от толщины	—
γ-графический . . . . .	—	4—6% от толщины	—

\* Меньшие размеры относятся к контролю деталей и образцов в лабораторных условиях.

а также неправильных технического обслуживания и эксплуатации. Основные виды дефектов, возникающих в металлах и сплавах при изготовлении и эксплуатации, представлены в табл. II.14.

Важнейшими характеристиками технических возможностей методов контроля являются: чувствительность и разрешающая способность, достоверность результатов

контроля, надежность аппаратуры и простота технологического процесса контроля, требования по технике безопасности и к квалификации специалистов по проведению контроля.

Чувствительность метода определяется наименьшими размерами выявляемых дефектов: у поверхностных — шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяженностью в

глубь металла и по поверхности детали; у глубинных — размерами дефекта с указанием глубины залегания. Чувствительность зависит в основном от особенностей метода неразрушающего контроля, технических данных применяемой аппаратуры и дефектоскопических материалов, чистоты обработки поверхности контролируемой детали, ее материала, условий контроля и других факторов. Сравнительные данные по чувствительности наиболее распространенных методов неразрушающего контроля приведены в табл. II.15.

Разрешающая способность дефектоскопа определяется наименьшим расстоянием между двумя соседними минимальными выявляемыми дефектами, при котором возможна их раздельная регистрация. Измеряется она в единицах длины или числом линий на 1 мм. Предусматривается в ТУ на оптические приборы и радиационные дефектоскопы; для ультразвуковых и токовихревых дефектоскопов согласно ГОСТ 4.27—71 и ГОСТ 4.28—71 может оговариваться лишь при необходимости; для магнитных дефектоскопов не указывается.

Достоверность результатов дефектоскопического контроля определяется вероятностью пропуска деталей с явными дефектами или необоснованной браковкой годных деталей. При проверке дефектоскопа на достоверность результатов контроля ответственной продукции обращают особое внимание на случаи необнаружения дефектов.

### Выбор метода контроля

Характерные особенности и области применения методов дефектоскопического контроля приведены в табл. II.16.

Требования по технике безопасности при применении различных методов неразрушающего контроля существенно различаются. Магнитный, ультразвуковой и токовихревой контроль не требуют применения специальных мер защиты. При капиллярном контроле необходима защита от жидкостей, паров и органических растворителей, а также от ультрафиолетового облучения, а при радиационном — от воздействия ионизирующих излучений и образующихся в воздухе вредных для организма человека газов — озона и оксидов азота.

Для выбора метода или комплекса методов для дефектоскопического неразрушающего контроля конкретных деталей или узлов необходимо учитывать, кроме специфических особенностей и технических возможностей каждого метода, следующие основные факторы: характер (вид) дефекта и его расположение, условия работы деталей и технические условия на отбраковку, состояние и класс шероховатости обработанной поверхности (ГОСТ 2789—73 и ГОСТ 2.309—73), форму и размер деталей, зоны контроля, доступность детали и зоны контроля, условия контроля. Устанавливают также критерии на отбраковку. По этим данным, руководствуясь табл. II.17, определяют возможные методы неразрушающего контроля, позволяющие решить поставленную задачу. Затем, принимая во внимание критерии на

отбраковку, чувствительность и специфику методов (см. табл. II.15 и II.16), выбирают методы и средства неразрушающего контроля для применения. При равной чувствительности предпочтение отдается тому методу, который проще и доступнее в конкретных условиях применения, у которого выше достоверность результатов контроля и производительность.

### Визуально-оптический контроль

При визуально-оптическом контроле деталей в основном применяют лупы: для общего осмотра поверхности деталей — обзорные, а для осмотра малых зон деталей и анализа характера обнаруженных дефектов — складные карманные. Обзорные лупы имеют следующую техническую характеристику:

	ЛПК-470	ЛПК-471
Увеличение . . .	≤2	≤2
Фокусное расстояние, мм . . .	199,4	199,4
Световой диаметр (размер окна), мм	50×95	∅78.
Расстояние от поверхности линзы, мм:		
до объекта . . .	≤140—150	≤140—150 <sup>а</sup>
до глаза . . .	100—700	100—700

Техническая характеристика складных карманных луп представлена в табл. II.18. Иногда применяют телескопические лупы типов ЛПШ-474 и ТЛА.

### Капиллярные методы

Капиллярные методы неразрушающего контроля предназначены для обнаружения поверхностных дефектов типа несплошности материала, не видимых невооруженным глазом. Они основаны на использовании капиллярных свойств жидкостей. Этими методами выявляют дефекты путем образования индикаторных рисунков с высоким оптическим (яркостным и цветовым) контрастом и с шириной линий, превышающей ширину раскрытых дефектов.

При контроле на деталь наносят специальную смачивающую жидкость (проникающую жидкость, индикаторный пенетрант), которая под действием капиллярных сил заполняет полости поверхностных дефектов. Дефекты выявляют, обнаруживая либо жидкость, оставшуюся в их полости после удаления ее с поверхности, либо скопления частиц порошка, взвешенного в жидкости и отфильтрованного на поверхности детали при заполнении полости дефекта жидкостью. В первом случае оставшаяся в полостях дефектов жидкость обнаруживают чаще всего после нанесения проявителя. Он поглощает жидкость, образуя индикаторный рисунок, а также создает фон, улучшающий видимость рисунка. Во втором случае скопление порошка обнаруживают без применения проявляющего вещества.

Т а б л и ц а П.16

Характерные особенности и области применения распространенных методов неразрушающего контроля

Наименование метода	Дефекты	Назначение	Преимущества	Недостатки
Визуально-оптический	Крупные трещины, механические и коррозионные повреждения поверхности, нарушения сплошности защитных покрытий, изменения характера неразъемных соединений, течь, следы износа	Осмотр деталей и узлов как демонтированных, так и непосредственно в агрегате	Возможность осмотра больших поверхностей деталей из различных материалов; возможность проведения эффективного контроля в труднодоступных участках агрегата или конструкции	Малая вероятность обнаружения мелких поверхностных дефектов; зависимость выявляемости дефектов от субъективных факторов (острота зрения, усталость оператора, опыт работы) и условий контроля (освещенность, оптический контраст и др.)
Люминесцентно-красочный	Поверхностные открытые трещины, поры и коррозионные поражения	Контроль деталей и узлов в основном из немагнитных материалов	Возможность контроля деталей, различных по размерам и форме; высокая чувствительность; простота методики контроля; наглядность результатов контроля; возможность механизации и автоматизации процессов контроля	Необходимость удаления с поверхности деталей защитных покрытий, смазок, окислы и др.; значительная длительность процесса контроля; необходимость высокой чистоты обработки поверхности
Магнито-порошковый	Поверхностные и подповерхностные дефекты — трещины, волосовины, неметаллические включения, флокены, надрыпы и др.	Контроль полуфабрикатов, деталей и узлов из ферромагнитных материалов	Возможность контроля различных по размерам и форме деталей; высокая чувствительность, производительность и достоверность результатов контроля; простота методики контроля; документальность результатов контроля	Необходимость удаления относительно толстых защитных покрытий (толщиной более 0,1—0,3 мм); в ряде случаев затруднена расшифровка результатов контроля в связи с выявлением мнимых дефектов
Токовихревой	Открытые и закрытые поверхностные и подповерхностные дефекты	Контроль полуфабрикатов, деталей и узлов из электропроводных материалов. Метод эффективен для локального контроля демонтированных деталей и в агрегате (накладными датчиками)	Возможность выявления трещин без удаления защитных покрытий, оксидов и смазки; выявления малораскрытых трещин; бесконтактного контроля; большая скорость и малая трудоемкость ручного контроля малых поверхностей	Зависимость чувствительности метода от размеров датчика; отсутствие наглядности результатов контроля; относительная сложность определения характера дефектов и их размеров
Ультразвуковой импульсный эхо-метод	Внутренние скрытые дефекты, а также поверхностные трещины в труднодоступных местах конструкции или узла	Контроль полуфабрикатов, деталей и узлов из магнитных и немагнитных материалов, обладающих свойствами упругости	Высокая чувствительность; возможность выявления дефектов на значительном расстоянии от места ввода ультразвуковых колебаний; высокая производительность и малая стоимость контроля	Необходимость разработки специальных методик и ультразвуковых сканеров для каждой контролируемой детали; относительная сложность расшифровки результатов контроля, определения места расположения, размера и характера дефектов
Рентгенографический	Внутренние скрытые дефекты, дефекты закрытых деталей	Контроль полуфабрикатов, деталей, узлов и агрегатов	Возможность контроля деталей различной формы; документальность результатов контроля	Громоздкость и сложность рентгеновской аппаратуры, малая производительность и высокая стоимость контроля; низкая чувствительность к усталостным трещинам; необходимость устройства защиты работающих от рентгеновского излучения
γ-графический	То же	То же	Автономность, портативность и маневренность γ-дефектоскопов; документальность результатов контроля	Ограниченная интенсивность излучения и невозможность регулирования его энергии; необходимость набора изотопов; изменение интенсивности излучения применяемых источников с течением времени

Т а б л и ц а П.17

Рекомендации по применению методов неразрушающего контроля

Дефекты, объекты контроля, их характеристика и условия контроля	Применимость методов дефектоскопии					
	магнито-порошкового	капиллярного	токовых-резового (накладных датчиков)	ультра-звукового импульсного эхо-метода	акустического	рентгено-графического и γ-контроля
<i>Дефекты производственного происхождения</i>						
В поковках, штамповках и профилях:						
закаты, заковы . . . . .	Ш	О	О	Ш	Н	Н
флокены . . . . .	О	Н	О	Ш	Н	Н
расслоения, внутренние трещины . . . . .	Н	Н	Н	Ш	Н	О
трещины и рванины, выходящие на поверхность . . . . .	Ш	Ш	О	Ш	Н	Н
включения . . . . .	О	О	Н	Ш	Н	О
Возникшие при сварке:						
трещины . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Н	О
непровары . . . . .	Ш	Н	Н	Ш	Н	О
шлаковые включения . . . . .	Н	Н	Н	О	Н	Ш
раковины, пористость . . . . .	Н	О	Н	О	Н	Ш
Возникшие при пайке и склеивании:						
трещины . . . . .	Н	О	Н	О	О	О
непропаи . . . . .	Н	О	Н	О	О	Ш
непроклеи . . . . .	Н	Н	Н	Н	Ш	Н
пористость . . . . .	Н	Н	Н	О	Н	Ш
Возникшие при механической обработке:						
шлифовочные трещины . . . . .	Ш	Ш	О	О	Н	Н
рихтовочные трещины . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Н	О
надрывы . . . . .	Ш	Ш	Н	Н	Н	Н
разностенность и подрезы . . . . .	Н	Н	Н	Н	Н	Ш
Возникшие при термической обработке:						
закалочные трещины . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Н	О
несоответствие структуры (твердости) . . . . .	Н	Н	О	Н	Н	Н
несоответствие толщины упрочненного слоя . . . . .	Н	Н	О	Ш	Н	Н
Возникшие при литье:						
раковины, пористость . . . . .	Н	О	Н	Ш	Н	Ш
трещины (поверхностные) . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Н	О
разностенность . . . . .	Н	Н	Н	Н	Н	Ш
ликвация . . . . .	Н	Н	Н	Ш	Н	Ш
спай . . . . .	Ш	О	О	Ш	Н	Н
включения . . . . .	О	Н	Н	Ш	Н	Ш
<i>Дефекты, возникающие при эксплуатации</i>						
Усталостные и другие открытые трещины . . . . .						
Точечные коррозионные поражения . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Н	О
Механические повреждения поверхности (забоины, вмятины, риски и др.) . . . . .	Н	Ш	Н	О	Н	Ш
Растрескивание и межкристаллитная коррозия . . . . .	Н	Н	Н	О	Н	Н
Деформация и разрушение закрытых деталей . . . . .	Н	Ш	О	Ш	Н	О
Трещины и коррозионные поражения в закрытых участках . . . . .	Н	Н	Н	О	Н	Ш
	Н	Н	Н	О	Н	О

Дефекты, объекты контроля, их характеристика и условия контроля	Применимость методов дефектоскопии					
	магнито-порошкового	капиллярного	токовых-реверного (накладных датчиков)	ультразвукового импульсного эхо-метода	акустического	рентгенографического и γ-контроля
<i>Зоны и условия контроля</i>						
Контроль всей поверхности . . . . .	Ш	Ш	О	О	О	Ш
Местный контроль (отдельных зон) . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
Демонтированные детали . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
Недемонтированные детали (контроль в узле):						
при доступе с двух сторон	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
при доступе с одной стороны (дефект с противоположной) . . . . .	Н	Н	О	Ш	Ш	Н
при ограниченных подходах (в труднодоступных местах)	Н	Н	О	О	Н	О
при отсутствии подходов (закрытые детали) . . . . .	Н	Н	Н	О	Н	О
<i>Место расположения дефектов</i>						
Поверхностные . . . . .	Ш	Ш	Ш	О	Н	Ш
Подповерхностные (на глубине 0,3—1 мм) . . . . .	О	Н	О	О	О	Ш
Внутренние (глубинные дефекты) . . . . .	Н	Н	Н	Ш	О	Ш
Дефекты, расположенные в ослабленных участках детали (галтелях, пазах, отверстиях, на острых кромках и т. д.)	Ш	Ш	Ш	О	Н	Ш
<i>Физические свойства материала контролируемых объектов</i>						
Ферромагнитные . . . . .	Ш	Ш	О	Ш	Ш	Ш
Немагнитные с мелкозернистой структурой . . . . .	Н	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
Немагнитные с крупнозернистой структурой . . . . .	Н	Ш	Ш	О	Ш	Ш
Неметаллические . . . . .	Н	О	Н	Ш	Ш	Ш
<i>Форма и размеры контролируемых деталей</i>						
Простая (одинакового сечения) . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
Сложная (с различной кривизной в зоне контроля) . . . . .	Ш	Ш	О	О	Н	Ш
Крупногабаритные и массивные . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	О
Микродетали (миниатюрные изделия) . . . . .	Н	О	О	Н	Н	О
То же, толщиной, мм:						
>1 . . . . .	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
<1 . . . . .	Ш	Ш	Ш	О	Н	О

Примечание. Применение метода: Ш — широкое; О — ограниченное; Н — неприменим.

Т а б л и ц а П.18

Лупы складные карманные (ГОСТ 7594—75)

Тип	Увеличе- ние	Фокусное расстоя- ние, мм	Световой диаметр, мм	Линейное поле зре- ния, мм	Расстояние от предмета до поверхнос- ти линзы, мм	Габаритные размеры в сложенном положении, мм	Масса, г
ЛП1	2,5 <sup>×</sup>	100	36	95	98	66×50×15	40
	4 <sup>×</sup>	62,5	29	45	54	51×42×15	30
	7 <sup>×</sup>	32,7	20	25	33	42×31×11,5	15
ЛАЗ	6 <sup>×</sup>	41,7	22	30	35	45×36×21,5	45
	10 <sup>×</sup>	25	13	15	21	38×23×16	20
ЛАН4	10 <sup>×</sup>	25	8	12	13	40,5×18×24,5	25
	16 <sup>×</sup>	15,6	5	6,5	7	34×14×20	10

Т а б л и ц а П.19

Характер индикаторного рисунка дефектов, выявляемых основными методами капиллярной дефектоскопии

Метод капиллярной дефектоскопии	Характеристика рисунка дефекта
Яркостный (ахроматический)	Ахроматический, черный или серый, имеет только яркостный контраст с фоном и виден при дневном свете Имеет цветовой и яркостный контраст с фоном и виден при дневном свете Имеет цветовой и яркостный контраст в ультрафиолетовых лучах Имеет цветовой и яркостный контраст при дневном свете и в ультрафиолетовых лучах Имеет цветовой и яркостный контраст при дневном свете и в ультрафиолетовых лучах. В месте дефекта накапливаются отложения окрашенных или люминесцирующих частиц (изменяется микрорельеф наблюдаемой поверхности)
Цветной (хроматический)	
Люминесцентный	
Люминесцентно-цветной	
Фильтрующихся частиц	

Индикаторные рисунки, образующиеся при контроле, либо обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовых лучах, либо имеют окраску, вызываемую избирательным поглощением (отражением) части падающих на них световых лучей. Поэтому рисунок обнаружить легче, чем сам дефект, и тем легче, чем шире индикаторная линия и выше ее контраст с фоном. Наличие рисунка не только свидетельствует о существовании дефекта, но также указывает место его расположения, форму или протяженность по поверхности детали.

Характер индикаторного рисунка дефектов, выявляемых основными методами капиллярной дефектоскопии, представлен в табл. П.19. Основные комплекты (наборы) материалов для капиллярной дефектоскопии приведены в табл. П.20, а чувствительность метода — в табл. П.21. Техническая характеристика отечественной аппаратуры для капиллярного контроля представлена в табл. П.22.

### Магнитопорошковый метод

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля позволяет обнаружить не

только поверхностные, но и подповерхностные дефекты. Подповерхностные дефекты на глубине до 100 мкм могут быть обнаружены при такой же чувствительности, что и поверхностные дефекты. При большем расстоянии от поверхности до дефекта (2—3 мм) могут быть обнаружены более грубые дефекты, чем при выявлении поверхностных нарушений сплошности. Метод применим только для контроля деталей из ферромагнитных материалов.

Магнитопорошковый метод основан на обнаружении магнитных полей рассеяния над дефектами с помощью ферромагнитных частиц, нанесенных на контролируемый участок. Ферромагнитные частицы (порошок) наносят на испытуемый участок изделия в сухом виде либо в виде суспензии порошка в жидкой дисперсионной среде, как, например, в трансформаторном масле, керосине или в мыльном водном растворе с антикоррозионными добавками.

Магнитный поток в бездефектной части детали не меняет своего направления. Если же на пути магнитного потока встречаются участки с пониженной магнитной проницаемостью, например дефекты в виде нарушения сплошности металла, то часть магнит-

## Основные комплекты (наборы) материалов для капиллярной дефектоскопии

Проникающая жидкость	Очищающая жидкость	Проявитель	Метод
Проникающая жидкость «К» (ТУ 6-10-750—74)	Масляно-керосиновая смесь состава, %: масло трансформаторное или МК-8 — 70; керосин — 30	Проявляющая краска «М» (ТУ 6-10-749—74)	Цветной красочный
Жидкость «Д» (бензол — 950 мл; масло МК-8 или трансформаторное — 50 мл; жирорастворимый темно-красный краситель — 30 г)	То же	Краска «В» (коллодий медицинский — 700 мл; бензол — 200 мл; ацетон — 100 мл; цинковые белила — 50 г)	То же
Жидкость «Е» (керосин — 800 мл; темно-красный краситель — 10 г)	» »	Краска «Г» (растворитель — 645—600 мл; бензол — 400 мл; коллоксилин — 22 г; цинковые белила — 50 г)	Цветной красочный
Жидкость «КР» (растворитель — 940 мл; масло трансформаторное или МК-8 — 30 мл; жирорастворимый темно-красный краситель — 9 г; нигрозин — 1 г)	» »	Краска «БР» (растворитель — 500 мл; коллодий на растворителе — 400 мл; паста СВП на цинковых белилах белая — 70 г)	То же
Жидкость состава: керосин — 800 мл; ацетон — 100 мл; бензин — 100 мл; темно-красный краситель — 30 г	» »	Краска «В»	» »
Жидкость состава: бензин — 600 мл; керосин — 300 мл; масло льняное — 30 мл; этилацетат — 30 мл; темно-красный краситель — 10 г; бутилацетат — 30 мл; амилацетат — 30 мл	То же	Краска состава: коллодий — 800 мл; ацетон — 200 мл; этилацетат — 30 мл; бутилацетат — 30 мл; белила цинковые — 50 г	Цветной красочный
Жидкость состава: керосин — 80%; масло трансформаторное — 15%; скипидар — 5%; темно-красный краситель — 10 г	5%-ный водный раствор кальцинированной соды	Суспензия (каолин — 600—700 г; вода — 1 л)	Цветной суспензионный
Жидкость состава: керосин — 60%; масло вазелиновое или трансформаторное — 30%; скипидар — 10%; темно-красный краситель — до насыщения	Проточная вода	Суспензия (каолин — 200—400 г; вода — 1 л)	То же

Жидкость состава: керосин — 85%; норниол — 15%; темно-красный краситель — до насыщения	Проточная вода	Суспензия (каолин — 300—350 г; эмульгатор — 20 г; вода — 1 л)	Цветной суспензионный
Жидкость состава: тетралин — 480 мл; ксилол — 480 мл; пропиловый спирт — 40 мл; темно-красный краситель — 10—20 г	Органический растворитель (ацетон или др.)	Тальк, силикагель, аэросил	Цветной порошок
Жидкость состава: бутиловый лактат — 900 мл; толуол — 100 мл; темно-красный краситель — 10—20 г	Вода	Суспензия (мел — 200—300 г; вода или бутилацетат — 1 л)	Цветной суспензионный
Жидкость состава: ксилол — 20%; керосин — 6%; скипидар — 20%; темно-красный краситель — до насыщения	»	Суспензия (мел — 300 г; спирт этиловый — 1 л)	То же
Жидкость АЭРО-12А (спирт этиловый — 900 мл; эмульгатор — 100 мл; краситель — 30 г)	Жидкость состава, мл: спирт этиловый — 800, эмульгатор — 200	Краска ПР-1 состава, мл: белая нитроэмаль — 300; коллодий медицинский — 300; ацетон — 400	Люминесцентно-цветной красочный
Жидкость состава, %: масло авиационное — 25; керосин — 75	5%-ный водный раствор кальцинированной соды	Оксид магния, тальк, бентонит, кремнезем	Люминесцентный порошок
Жидкость состава: бензин — 25%; масло трансформаторное — 25%; керосин — 50%; дефектоль зелено-золотистый — 0,025—0,03 г/л	Вода	Силикагель	То же
Жидкость состава, %: масло трансформаторное — 61,2; керосин — 23,8; олеиновая кислота — 9,7; триэтаноламин — 5,3	»	Порошки: маршаллит, мел, тальк, оксид магния	» »
Жидкость состава, %: керосин — 73; эмульсол нефтяной — 27	Вода	Суспензия (каолин — 300 г; вода — 1 л)	Люминесцентный суспензионный
Жидкость состава: керосин — 70%; норниол — 30%; эмульгатор — 3 г/л	»	Тальк	Люминесцентный порошок
Жидкость состава, %: керосин — 80; масло веретенное или авиационное — 20	Жидкость состава: тринатрийфосфат — 20—30 г; едкий натр — 10—12 г; жидкое стекло — 25—30 г; эмульгатор — 3 г; вода — 1 л	Оксид магния	То же

Т а б л и ц а II.21

## Чувствительность методов капиллярной дефектоскопии

Наименование метода	Размеры наименьшего обнаруживаемого дефекта, мм		
	ширина раскрытия у выхода на поверхность	глубина	протяженность
Цветной суспензионный . . . . .	0,005—0,01	0,04—0,05	2—3
Цветной красочный . . . . .	0,001—0,002	0,01—0,03	0,1—0,3
Люминесцентный порошковый . . . . .	0,01—0,03	0,1—0,3	2—3
Люминесцентный суспензионный . . . . .	0,005—0,01	0,03—0,04	1—2
Люминесцентный красочный . . . . .	0,001—0,002	0,01—0,03	0,1
Люминесцентно-цветной красочный . . . . .	0,001	0,01	0,1
Фильтрующихся частиц . . . . .	0,002	0,5	0,5—1

Т а б л и ц а II.22

## Техническая характеристика средств капиллярного контроля

Наименование аппарата	Техническая характеристика	Объект контроля
Люминесцентный дефектоскоп авиационный ЛДА-3	Метод — люминесцентный с сорбционным «сухим» проявлением. Занимаемая площадь 6×1,5 м. Потребляемая мощность 23 кВ·А. Напряжение питания 380 В. Емкость бака для подогрева воды 50 л. Источник ультрафиолетового излучения ДРШ-250	Мелкие и средние детали (габаритные размеры не более 500×500×300 мм и масса не более 100 кг)
Люминесцентный дефектоскоп ЛД-4	Имеются стационарный и переносной источники ультрафиолетового излучения ДРШ-250, малогабаритные ванны для пропитки, обмывки, проявления, сушки деталей, а также насос и вентилятор для обработки крупных объектов	Мелкие и средние детали, а также отдельные крупные объекты, размещенные вблизи дефектоскопа
Установка ультрафиолетовая стационарная штативная КД-20Л	Конструкция штативного типа с девятью источниками в черной колбе типа ДРУФ 125 мощностью 125 Вт. Облучатель подвижен в трех направлениях, стол складной с переменной высотой. Имеется фиксированная настройка ультрафиолетового потока. Размеры контрольного поля: овал 500×300 мм, круг диаметром 300 мм. Облученность 100—300 относительных единиц по ГОСТ 18442—73	То же
Установка стационарная «дефектоскопическая» СЛДУ-М	Источник ультрафиолетового излучения ДРШ-1000 неподвижен. Поток излучения управляет подвижное плоско-вогнутое двустороннее зеркало. Охлаждение фильтра воздушное. Размеры контрольного поля меняются в широких пределах. Для фокусировки дополнительно используется линза Френеля	То же
Облучатель ультрафиолетовый переносной низковольтный КД-32Л	Семь люминесцентных источников ультрафиолетового излучения в черной колбе типа ЛУФ4-1 мощностью 4 Вт. Питание от сети переменного тока напряжением 36 В. Ультрафиолетовая облученность в зоне контроля до 5 относительных единиц по ГОСТ 18442—73. Масса до 5 кг	Крупные объекты при сложных условиях работы, после обработки дефектоскопическими материалами
Комплект аэрозольный многократного использования с зарядным стендом КД-40ЛЦ	Имеются три набора разборных баллонов трех типоразмеров, зарядный стенд и упаковочный контейнер. Температурный диапазон от —40 до +40° С	Детали машин в условиях эксплуатации и ремонта

Таблица II.23

Техническая характеристика универсальных магнитопорошковых дефектоскопов

Тип дефектоскопа	Род тока	Максимальная сила тока, А	Напряженность поля при полюсном намагничивании, А/см	Максимальная длина детали, мм	Габаритные размеры, мм	Примечание
УМДЭ-10000	Переменный однополупериодный выпрямленный	12 000	240	1600	2500×800×800	Стационарный
УМДЭ-2500	Переменный (постоянный для полюсного намагничивания)	≤5000	150—200	90	1800×800×800	То же
МД-10П	Переменный импульсный	20 000	350—400	2000	—	»
МД-30П	Переменный импульсный	1 500	200	250	—	»
У-604-68	Однополупериодный выпрямленный	10 000	480	1725	2800×950×1775	»
МДС-1,5	То же	2 500	80	200	—	»
МДС-5	Переменный (постоянный для полюсного намагничивания)	7 500	≥80	900	—	»
ПМД-70	Импульсный, переменный	1 200	≤80	—	620×500×260	Переносной
МД-50П	То же	5 000	≤100	—	1000×780×620	Передвижной

ных линий выходит из детали. Там, где они выходят из детали и входят в нее обратно, возникают местные магнитные полюсы и магнитное поле над дефектом. После снятия намагничивающего поля магнитное поле над дефектом и местные полюсы остаются из-за наличия остаточной индукции. При магнитопорошковой дефектоскопии необходимо, чтобы детали намагничивались полем, направленным поперек или хотя бы под углом к направлению дефекта. Кроме того, важно, чтобы напряженность намагничивающего поля была близка к насыщению. На характер и величину поля рассеяния над дефектом влияют переменные факторы: напряженность намагничивающего поля; магнитные свойства материала; размер и форма контролируемого изделия; размер, форма, место расположения и направление дефекта на изделии.

Для магнитопорошкового контроля деталей применяют три вида дефектоскопов: стационарные универсальные; передвижные и переносные; специализированные (стационарные, передвижные и переносные). Основными узлами дефектоскопов являются: источники тока, устройства для подвода тока

к детали, устройства для полюсного намагничивания (соленоиды, электромагниты), устройства для нанесения суспензии на контролируемую деталь, осветительные устройства, измерители тока (или напряженности поля). Техническая характеристика некоторых магнитопорошковых дефектоскопов, выпускаемых в СССР, представлена в табл. II.23.

#### Акустические методы

Из акустических методов неразрушающего контроля изделий наибольшее распространение получил эхо-импульсный метод. При этом методе упругие (акустические) колебания вводят в изделие с одной стороны совмещенной искательной головкой. Излучаемые импульсы упругих волн (зондирующие импульсы) посылают в контролируемое изделие один за другим через определенные промежутки времени. Зондирующий импульс, пройдя сквозь толщу материала, отражается от противоположной поверхности изделия и, возвращаясь, частично попадает на пьезоэлемент искательной головки. На экране электроннолучевой трубки возникает донный импульс. При наличии

Т а б л и ц а П.24

Техническая характеристика универсальных ультразвуковых дефектоскопов

Тип прибора	Частота, МГц	Максимальная глубина прозвучивания, мм	Питание	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
УДМ-1М	0,8÷1,8—2,5÷5,0	2500	220 В, 50 Гц	13	350×200×310
ДУК-6В	0,7÷1,5—2,5÷4,0	5000	220 В, 50 Гц	33*	555×465×305
ДУК-66	0,62÷1,25—2,5÷5,0	2500	110, 127 и 220 В, 50 Гц	21,5**	605×395×265
ДУК-66П	1,25÷2,5—5,0÷10	1200—2400	24, 36, 127, 220 В, 50 Гц; от батареи 6,6—9 В	9,5***	260×160×425
УДМ-3	0,6÷1,8—2,5÷5,0	2500	36, 220 В, 50 Гц	19	220×335×423
ДСК-1	0,65÷1,25—2,5÷5,0	—	110, 127, 220 В, 50 Гц	24	540×360×245

Пр и м е ч а н и е. Режим работы дефектоскопов — импульсный.

- \* Без тележки и принадлежностей.
- \*\* Без принадлежностей.
- \*\*\* С аккумулятором.

Т а б л и ц а П.25

Техническая характеристика рентгеновских аппаратов

Тип аппарата	Тип рентгеновской трубки	Диапазон напряжения на трубке, кВ	Номинальная сила тока на трубке, мА	Электрическая схема высокого напряжения
РУТ-60-20-1М (передвижной кабельный)	1БПВ1-60	10—60	20	Однополупериодная одновентильная с заземленным анодом
7Л2 (переносной моноблочный)	1БДМ6-75	70—75	10	Однополупериодная безвентильная
РУП-120-5-1 (переносной моноблочный)	0,4БМП2-120	50—120	5	То же
РУП-150-10-1 (передвижной кабельный)	1,5БПВ7-150	35—150	10	Удвоения со сглаженным напряжением
РУП-160-6П (переносной моноблочный)	0,7БПК2-160П	80—160	6	Однополупериодная безвентильная
РУП-160-10Н (переносной моноблочный)	1БП14-160	80—160	10	То же
РУП-200-5-2 (передвижной моноблочный)	07БПМ3-200	70—200	5	»
РУП-200-20-5 (передвижной кабельный)	1,5БПМ1-200, 3БПМ1-200	70—200	20	Однополупериодная двухвентильная
РУП-400-5-1 (передвижной моноблочный)	1,5БПВ2-400	250—400	5	Однополупериодная безвентильная каскадная
ИРА-1Д (переносной)	Двухэлектродная с холодным катодом ИАЗ-250	220—280	—	Импульсная, длительность вспышки излучения 1 мкс
ИРА-2Д (переносной)	Двухэлектродная с холодным катодом ИАЧ-350	300—350	—	Импульсная, частота импульсов 1—2 Гц
РИНА-1Д (переносной)	То же	200—220	—	Импульсная, частота импульсов 15 Гц

дефекта в металле импульс ультразвуковых колебаний отразится от него раньше, чем от противоположной поверхности детали. Между начальным и донным импульсом возникнет промежуточный. Если дефект полностью перекрывает путь ультразвуковому пучку, на экране электроннолучевой трубки будут наблюдаться только начальный импульс и импульс от дефекта. По расстоянию между импульсами на экране можно судить о глубине залегания дефекта.

Техническая характеристика универсальных ультразвуковых дефектоскопов, применяющихся на отечественных предприятиях, представлена в табл. II.24.

#### Методы просвечивающего контроля

Методы просвечивания оптически непрозрачных объектов основаны на законе ослабления интенсивности излучения, проходящего через контролируемый объект. Интенсивность излучения меняется в зависимости от плотности и толщины материала. По результатам измерения интенсивности излучения за объектом определяют наличие в нем дефектов (раковин, включений и т. д.).

Наиболее распространенными методами

просвечивающего контроля являются рентгенография, рентгеноскопия и  $\gamma$ -контроль, используемые для проверки сварных и паяных швов, литья, а также качества сборочных работ, состояния закрытых полостей деталей и агрегатов после длительной наработки и т. д. Техническая характеристика применяемых для этой цели рентгеновских аппаратов представлена в табл. II.25. Эти аппараты выпускают в соответствии с требованиями ГОСТ 7248—75.

Гамма-дефектоскопы изготавливают переносными, передвижными и стационарными в соответствии с ГОСТ 23764—79. Согласно ГОСТ 16759—71, они подразделяются: по используемым методам контроля — на дефектоскопы радиографического, радиометрического и визуального контроля, а по виду поля излучения — на фронтальные (просвечивание направленным пучком излучения), панорамные (панорамное просвечивание) и универсальные (фронтальное и панорамное просвечивание). Основные технические данные отечественных гамма-дефектоскопов приведены в табл. II.26.

Переносные дефектоскопы используют в основном для просвечивания деталей в полевых условиях и непосредственно в маши-

Напряжени е питающей сети, В	Мощность, кВ·А	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	
			рентгеновского аппарата	защитного кожуха с трубкой
127, 220, 380	2,5	280	1040×440×2030 (610×580×1010—пульт)	97×135×250
127, 220	2,0	29	—	330×250×200
220, 380	2,0	30 (пульт), 45 (блок-транс- форматор)	1400×700×1300	300×250×540
220, 380	2,5	670	1750×1390×2200 (600×460×310—пульт)	270×880
220	2,5	45 (моноблок), 30 (пульт), 32 (тележка), 50 (барабан)	475×320×400 (пульт), 1420×1140 (тележка), 120×760 (барабан)	300×850
220	3	20 (пульт), 46 (моноблок), 22 (тележка)	—	—
220, 380	2,5	35 (пульт), 88 (блок-транс- форматор)	1520×880×1300	270×450×750
220, 380	7,0	750	2100×850×2500 (600×450×830—пульт)	300×865
220, 380	4,0	600	1570×900×2000 (610×500×715—пульт)	550×980 (длина вынесенного анода 590)
220	0,04	30	310×770×130 (пульт)	180×520
220	0,15	30	382×310×164 (пульт)	570×305×260
220	—	5	350×250×150 (пульт)	500×300×250

Т а б л и ц а П.26

## Основные технические данные гамма-дефектоскопов

Тип дефектоскопа	Источник излучения		Управление выпуском и перекрытием пучка электронов	Максимальное выдвижные источника из головки, м	Максимальное расстояние между пультым и головкой, м
	изотоп	мощность экспозиционной дозы, Р/с			
					<i>Пере</i>
Гаммарид-21	Иридий-192	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Ручное	5	5
Гаммарид-23	Цезий-137; иридий-192; тулий-170	$4,66 \cdot 10^{-4}$ ; $1,16 \cdot 10^{-3}$ ; $2,33 \cdot 10^{-5}$	То же	8	8
Гаммарид-22	Цезий-137; иридий-192	$1,2 \cdot 10^{-4}$ ; $1,5 \cdot 10^{-3}$	Электромеханическое	5	25
Гаммарид-26	Иридий-192	$1,5 \cdot 10^{-2}$	То же	12	33
Стапель-5М	Иридий-192	$1,16 \cdot 10^{-3}$	Ручное и электро-механическое	—	3,5
ГУП-цезий-2-1	Цезий-137; иридий-192	$5 \cdot 10^{-4}$ ; $1,2 \cdot 10^{-3}$	То же	—	5
					<i>Перед</i>
РИД-32	Кобальт-60	$3,5 \cdot 10^{-2}$	Электромеханическое	—	30
Магистраль «Нева»	Цезий-137 Цезий-137	$4,66 \cdot 10^{-4}$ $2,33 \cdot 10^{-2}$	» Электро- и пневмомеханическое	— —	22 50
					<i>Стацио</i>
ГУП-Со-5-3	Кобальт-60	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Ручное и электро-механическое	0,035	30
ГУП-Со-50-3	Кобальт-60	$1,2 \cdot 10^{-3}$	То же	—	30
РИД-41	Кобальт-60	$1,2 \cdot 10^{-1}$	» »	12	50

нах при ограниченных подходах к объекту контроля, при отсутствии на месте работ электроэнергии, когда невозможно использовать рентгеновские аппараты, для работы вблизи взрыво- и пожароопасных объектов и др.

Для выявления дефектов просвечиванием применяют фотографический, визуальный и ионизационный методы. Наиболее распространен фотографический метод, при котором «скрытое» изображение просвечиваемого объекта образуется на рентгеновской пленке, заключенной в светонепроницаемую оболочку. После проявления на пленке появляются темные пятна в участках, на которые проектировались впадины, полости или участки пониженной плотности.

## 12. Приборы теплового контроля

### Классификация

Существует много способов измерения температуры в деталях машин и агрегатов. Эти способы можно классифицировать в соответствии со схемой, представленной на рис. П.26.

Класс неэлектрических измерений состоит из следующих способов: теплового контакта

с объектами через промежуточную теплопроводную среду; контроля за общим тепловым состоянием деталей путем измерения температуры охлаждающей среды; металлографических исследований, включая измерения микротвердости деталей машин; использования для измерения максимальных температур различных плавких вставок и термопарок и измерения посредством фотометрических приемов. Иногда применяют жидкостные и манометрические термометры (для измерения температуры масла, солей и др.).

Класс измерений с применением косвенных приемов включает способы физического и математического моделирования, позволяющие устанавливать максимальные температуры, отмечавшиеся на поверхности испытываемых деталей; наблюдения за окисдными пленками; способы, использующие принципы электротепловой аналогии, а также методы математического моделирования с использованием сеточных моделей и вычислительных машин.

Класс, объединяющий электрические способы измерений, включает следующие группы: 1) способы, не требующие непосредственного теплового контакта между исследуемыми деталями машин и индикаторами, включенными в измерительную схему (бесконтактные способы измерения); 2) из-

Габаритные размеры, мм (масса, кг)			Толщина материала, мм	
головки	пульта	перезарядного контейнера	сталь	алюминий
<b>носные</b>				
220×170×110 (6) 220×170×110 (6)	140×140×25 (2) 140×140×25 (2)	600×570×600 (220) 600×570×600 (220)	1—40 1—60	1—120 1,5—120
220×170×110 (6)	500×250×250 (22)	600×570×600 (220)	1—43	1—120
220×170×110 (6) 156×118×108 (7)	500×250×250 (22) 380×26×45 (2)	600×570×600 (220) 840×280×200 (55)	1—80 12—50	1,5—250 10—150
255×190×240 (20)	1350×400×600 (штатива)	—	10—60	—
<b>вишневые</b>				
685×623×640 (350)	550×345×420 (35)	440×305×295 (350)	5—200	150—600
320×160×260 (21) 250×700 (130)	300×300×160 (10) 400×660×1100 (80)	240×210×280 (40) 310×430×430 (250)	≤40 ≤80	— —
<b>нарные</b>				
—	1500×1500×2200 (штатива) (90)	—	≤150	—
—	То же	—	60—200	—
1600×900×780 (1500)	490×210×400 (20)	1300×650×600 (1500)	60—250	200—70

мерения термопарами и термометрами сопротивления, позволяющие избежать непосредственной контактной электрической связи между измерительной аппаратурой и температурными датчиками (безэлектроконтактные способы измерения); 3) измерения термопарами и термосопротивлениями, соединенными с измерительной аппаратурой специальными токосъемными устройствами (электроконтактные способы измерения).

Каждый из способов измерений в свою очередь имеет ряд разновидностей в зависимости от применяемых приемов, аппаратуры, электрических схем и др.

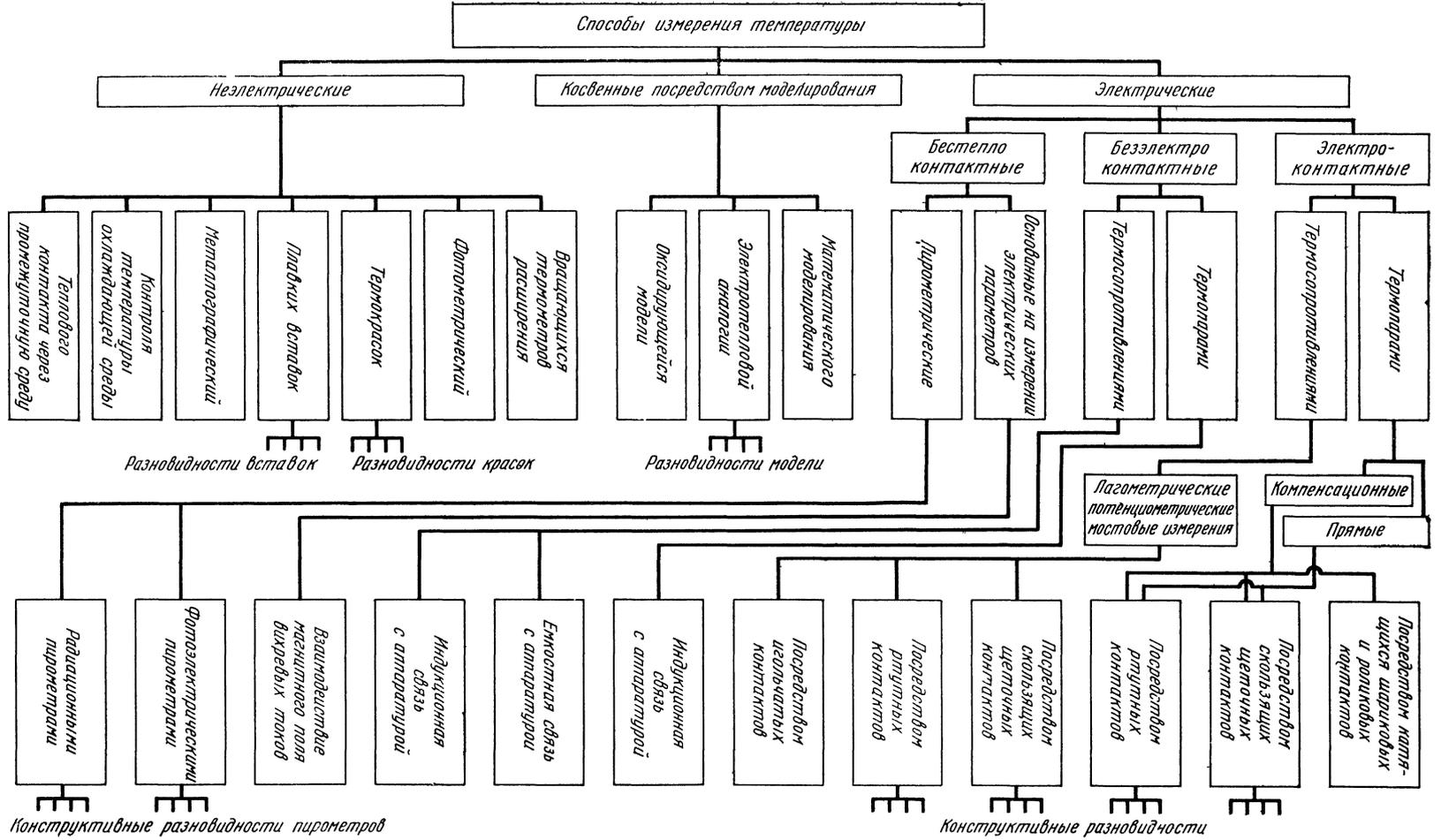
### Жидкостные и манометрические термометры

Действие жидкостных термометров основано на термическом расширении жидкости, заключенной в капилляре термометра. Основные параметры и конструкции этих термометров определены ГОСТ 2045—71 и ГОСТ 9177—74 («Термометры стеклянные ртутные» и «Термометры стеклянные жидкостные нертутные»). Наиболее точными являются лабораторные ртутные термометры (табл. II 27).

Т а б л и ц а II.27

Основные параметры ртутных термометров

Вариант	Температурная область применения, °С	Число термометров в комплекте	Температурный интервал шкалы, °С	Цена деления шкалы, °С	Допустимая погрешность показаний, °С
I	0—60	15	4	0,01	±0,05
II	55—155	10	10	0,02	±0,1
III	140—300	8	20	0,05	±0,3
IV	300—500	4	50	0,1	±1,2



Т а б л и ц а П.28

Основные параметры манометрических термометров

Вид термометра	Температурная область применения, °С	Температурный интервал шкалы, °С	Тип		
			показывающий	самопишущий	комбинированный
Газовый . . . . .	-160 ÷ +600	100—600	ТПГ	ТСГ	ТКГ
Конденсационный . . . . .	-60 ÷ +320	25—50	ТПП	ТСП	ТКП
Жидкостной . . . . .	-100 ÷ +320	25—250	ТПЖ	ТСЖ	ТКЖ
Ртутный . . . . .	-25 ÷ +600	25—600	ТПР	ТСР	ТКР
Со специальным заполнителем . . . . .	100 ÷ 1000	400—500	ТПС	ТСС	ТКС

Требования к техническим термометрам общего применения определены ГОСТ 2823—73 и ГОСТ 9871—75. Эти термометры наиболее распространены в промышленности. Их выпускают в 11 модификациях для температурного диапазона 0—500°С. Изготавливают также термометры специального назначения, например электроконтактные, используемые для регулирования технологических процессов, и максимальные (минимальные), предназначенные для регистрации максимальной (минимальной) температуры в данный период.

Действие манометрических термометров основано на зависимости между температурой и давлением рабочего вещества, заключенного в замкнутом объеме (табл. П.28). При погружении датчика термометра (термобаллона) в измерительную среду его рабочее вещество изменяет объем и с помощью чувствительной манометрической пружины перемещает стрелку индикатора. Термобаллон соединен с прибором капилляром.

Рабочим веществом в газовых термометрах обычно является азот, в конденсационных (парожидкостных) — металлхлорид, спирт, этиловый эфир, в жидкостных — ртуть, метасилол, силиконовые жидкости, металлы с низкой температурой плавления. Основные параметры манометрических термометров регламентированы ГОСТ 8624—71.

### Термометры сопротивления

Действие термометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления вещества (металлов и их оксидов, солей и т. д.) в зависимости от температуры. Чувствительный элемент термометра сопротивления (обычно металлическая проволока) закрепляют на каркасе из слюды или кварца и помещают в баллон для защиты датчика от окружающей среды. В зависимости от условий применения термометра баллон изготавливают из кварца, стекла, фарфора или металла.

Термометры сопротивления выпускают серийно и изготавливают из платины (ТСП), меди (ТСМ) или полупроводников. Их свойства регламентируются ГОСТ 6651—78 и различными техническими условиями. Рабочий интервал температур термометров типа ТСП от -200 до +650°С, ТСМ — от -50 до +180°С. Инерционность термометров со-

Т а б л и ц а П.29

Основные параметры полупроводниковых термометров сопротивления

Тип	Диапазон номинальных сопротивлений при +20°С, кОм	Максимальная рабочая температура, °С
ММТ-1	1—200	120
ММТ-4	1—200	120
КМТ-1	22—1000	180
КМТ-4	22—1000	120
ММТ-13	0,01—2,2	125
МКМТ-16	510—2700	120
МТ-54	1—150	150
МТ-В	1—1000	150

противления колеблется от 1 мин до 9 с. Погрешность эталонных платиновых термометров сопротивления равна  $\pm 0,0001^\circ\text{C}$  при  $0^\circ\text{C}$  и  $\pm 0,001^\circ\text{C}$  при  $100^\circ\text{C}$ .

Наиболее чувствительны полупроводниковые термометры сопротивления (табл. П.29). Их изготавливают в форме пластинок и сфер малого диаметра. Как правило, чувствительный элемент остеклован для защиты от влияния среды. По сравнению с ТСП и ТСМ их габариты значительно меньше ( $D = 1 \div 7$  мм,  $l = 7 \div 13$  мм). Для полупроводниковых термометров сопротивления (термисторов) обычно применяют следующие материалы: оксид меди  $\text{CuO}$ , бурый железняк  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ , оксид урана  $\text{U}_3\text{O}_8$ , сульфид серебра  $\text{Ag}_2\text{S}$  и др.

Для точного измерения сопротивлений используют стандартный компенсационный метод (мостовые схемы и логометры). Для компенсационных измерений применяют потенциометры типа Р330 (класс 0,01) и Р308 (класс 0,002), а в мостовых схемах — одинарные и одинарно-двойные равновесные мосты Р39, Р316, Р329, Р333, МО61, МОД61. Наиболее часто термометры сопротивления используют в комплекте с логометрами — измерительными приборами магнитоэлектрической системы (ГОСТ 9736—68). Наиболее распространены логометры типа ЛПр-53, ЛПБ-46, ЛСЩПр-00-18. Логометры бывают показывающие и самопишущие. Их точность в среднем составляет 1,5%.

## Термопары

Термопара (термоэлемент) состоит из двух разнородных электрических проводников (термоэлектродов), сваренных или спаянных между собой на одном конце (рабочем спае). Свободные концы проводников подсоединяют к измерительному прибору. При помещении рабочего спае в среду с температурой, отличающейся от температуры свободных концов, возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.), величина которой зависит от рода контактирующих пар металлов и от разности температур рабочего спае и свободных концов термопары, но не зависит от диаметра и длины проводников и распределения температуры по их длине. Если температура одного из концов термопары постоянная (например, он погружен в воду с тающим льдом), то термо-э. д. с. зависит только от температуры ее рабочего конца. Измеряя термо-э. д. с., можно определять разность температур и находить температуру рабочего спае (а значит, и изучаемого объекта).

Наиболее широко применяются для изготовления термоэлектродов такие материалы, как платина, железо, молибден, вольфрам, медь, манганин, платинородий, хромель, копель, алломель, константан. Конструктивное оформление термопар разнообразное и должно соответствовать условиям их эксплуатации. Часто рабочие концы помещают в защитные оболочки из фарфора или другого материала.

Основные требования к термопарам определены ГОСТ 6616—74 и ГОСТ 13417—76. Различают термопары со стандартными и нестандартными градуировками. Техническая характеристика основных термопар представлена в табл. П.30.

К термопарам с нестандартными градуировками относятся медь-константановые, вольфрам-ренийевые, вольфрам-молибденовые и др. В основном их используют для специальных измерений, например в диапазоне высоких температур (2500°С для карбид титано-графитовых термопар).

При необходимости термопару можно на-

рашивать термоэлектродными (компенсационными) проводами. Компенсационные провода подбирают по возможности близкие по термоэлектрическим свойствам к термоэлектродам термопары, но более дешевые. Спае термопары с термоэлектродными (компенсационными) проводами не термостатируются. Однако спае компенсационных проводов с медными проводами следует термостатировать или вводить соответствующую поправку.

Преимущества термопар — линейность в широком диапазоне температур, чувствительность и стабильность показаний. Недостаток — сравнительно большая постоянная времени (1—10 с).

Для регистрации термо-э. д. с. применяют показывающие или самопишущие стандартные пирометрические вольтметры (ГОСТ 9736—68) класса точности 0,2—1,0. В основном применяют приборы типа РК-15, РС-20, РС-25, ПП-1, ПР-30/6, МПШПр54М и т. д. В системах дистанционного измерения температур находят широкое применение электронные автоматические потенциометры и мосты с классом точности 0,5—1,0: ЭПП и ЭМП (ГОСТ 7164—78).

## Термоиндикаторы

Действие термоиндикаторов основано на изменении состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. Они позволяют быстро и экономично получить информацию о тепловом режиме объекта.

Достоинствами термоиндикаторов являются запоминание распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность; недостатками — инерционность, сравнительно невысокая точность, необходимость нанесения на изделие специальных покрытий или установки плавких вставок, сложность изучения динамических температурных режимов. Включение их в системы терморегулирования затруднено.

На практике применяют термоиндикаторы трех типов: 1) меняющие цвет при определенной температуре, называемой критической,

Т а б л и ц а П.30

Техническая характеристика термопар

Тип	Градуировка (ГОСТ 6616—74)	Верхний температурный предел измерения		Чувствительность, мВ/°С	Термо-э. д. с., мВ
		длительного	кратковременного		
Платинородий-платиновая ТПП	ПП-1	1300	1600	0,01	16,72
Платинородий-платинородиевая ТПР	ПР-30/6	1600	1800	0,01	13,927
Хромель-алюмелевая ТХА	ХА	1000	1300	0,04	52,41
Хромель-копелевая ТХК	ХК	600	800	0,08	66,40
Медь-константановая	—	400	—	0,015—0,04	20
Вольфрам-ренийевая ТВР	ВР-5/20	2200	2500	0,01—0,015	31,45
Вольфрам-молибденовая ТВМ	—	1800	—	0,015—0,04	20

Т а б л и ц а П.31

Цвета некоторых термокрасок

Номер набора	Критическая температура, °С	Переходные цвета
1	45	Светло-розовый — голубой
	300	Голубой — коричневый
	600	Коричневый — черный
2	60	Светло-зеленый — синий
	80	Синий — зеленый
	110	Желтый — фиолетовый
3	140	Пурпурный — синий
	175	Белый — зеленовато-коричневый
	220	Зеленый — темно-коричневый
4	120	Светло-зеленый — фиолетовый
	260	Фиолетовый — коричневый
	610	Коричневый — грязно-белый
20	65	Светло-розовый — светло-голубой
	145	Светло-голубой — светло-коричневый
30	65	Светло-зеленый — светло-голубой
	145	Светло-голубой — темно-зеленый
	220	Темно-зеленый — серо-бурый
31	155	Коричневый — серо-коричневый
	230	Серо-коричневый — зеленовато-коричневый
	275	Зеленовато-коричневый — красновато-коричневый

или температурой перехода; 2) плавящиеся при определенной температуре; 3) меняющие яркость или цвет при нагреве — люминофоры.

Некоторые красители, например комплексные иодортутные соли меди или серебра ( $Cu_2HgI_4$  или  $Ag_2HgI_4$ ), при достижении определенных критических температур многократно и обратимо меняют свой цвет. Другие, например метиллоранж, фенолфталеин, флуоресцин, дифениламин, молибденовокислый аммоний при реакции с нафталином, щавелевой кислотой, гашеной известью, глюкозой и некоторыми другими веществами при достижении критических температур, определенных для данного химического состава, меняют свой цвет однократно или многократно, но необратимо. Такие красители сохраняют измененный цвет и после снижения температуры до исходной. Вещества, необратимо изменяющие свой цвет под воздействием температуры, используют в качестве термоминдикаторов максимальных температур; называют их термокрасками.

Химические заводы поставляют промышленности целые наборы термокрасок. Из них составляют температурную шкалу с интервалами в 10—40°С в пределах от 45 до

780°С. Сведения о некоторых наборах, выпускаемых химическими заводами, представлены в табл. П.31.

Перед испытанием поверхность детали тщательно очищают от различных отложений, нагара, смолы, окисных пленок, а затем обезжиривают бензином или ацетоном. Затем на поверхность детали наносят термокраски с критическими температурами, близкими к ожидаемым значениям рабочих температур детали. После определенного периода эксплуатации деталей по измененным цветам термоминдикаторов (термокрасок) определяют максимальные температуры, наблюдавшиеся при эксплуатации деталей. Точность определения температуры методом термокрасок оценивается в  $\pm 5^\circ\text{C}$  на низких пределах температур и  $\pm 40^\circ\text{C}$  на высоких пределах.

Термоминдикаторы плавления могут быть двух типов: плавящиеся покрытия и термосвидетели (плавкие вставки).

Покрyтия выпускают в виде термокарандашей (мелков), термолаков, термотаблеток (термопорошков). Их изготавливают на основе воска, стеарина, парафина или соединений серы, цинка, свинца (для высоких температур). На поверхности изделия термокарандашом наносят риску, которая плавится при достижении заданной температуры. Действие термолаков аналогично.

Термосвидетели (плавкие вставки) представляют собой напизанные на тугоплавкую проволоку пластинки из металлов, плавящихся при различных температурах. Иногда вместо металлов используют кусочки пластмасс, чернеющих при 100—500°С. Точность измерения этими термоминдикаторами может достигать 1%. В деталях высверливают ряд отверстий и вставляют капсулы с плавкими веществами, точки плавления которых составляют определенный температурный ряд. После работы в заданном режиме машину вскрывают, испытываемую деталь демонтируют и осматривают капсулы или отверстий устанавливают максимальную температуру разогрева данного участка детали.

При измерении температур в участках деталей, разогревающихся в пределах 100—900°С, в качестве плавких вставок применяют чистые металлы и эвтектические сплавы. Наиболее распространенные композиции представлены в табл. П.32.

Реже других применяют люминофорные термоминдикаторы. Принцип их работы основан на температурной зависимости цвета или интенсивности люминесценции некоторых веществ, например сульфидов цинка и кадмия. Недостатком люминофорных термоминдикаторов является необходимость точной стабилизации возбуждающего люминесценцию излучения (обычно ультрафиолетового).

## Пирометры

Действие приборов для бесконтактного измерения температуры основано на регистрации теплового излучения объектов. По характеру получаемой информации различают пирометры для локального измерения температуры в данной точке объекта и пирометры для анализа температурных полей. По прин-

Т а б л и ц а П.32

Металлы и эвтектические сплавы, применяемые в качестве плавких вставок

Чистые металлы и эвтектические сплавы	Химический состав, %	Точка плавления, °С	Чистые металлы и эвтектические сплавы	Химический состав, %	Точка плавления, °С
K—Hg	83—17	47	La—Cu	86—14	468
Bi—In	34—66	72	Pr—Cu	82—18	472
Bi—Sn—Cd	54—24—22	98	Mg—Cu	69,3—30,7	485
In—Cd	75—25	123	Ca—Mg	16,2—84,8	517
Bi—Pb	56,5—43,5	125	Sb—Cu	76,5—23,5	526
Sn—Bi	42—58	134	Al—Ba	6,9—93,1	531
Bi—Cd	60—40	144	Al—Ca	66,2—33,8	539
Sn—Cd—Zn	Тройная эвтектика	160	Al—Ca	27—73	545
Cd—Sn	70—30	175	Mg—Cu	34,6—65,4	552
Pb—Sn	38,1—61,9	183	Ag—Al	72—28	558
Bi—Ti	76,5—23,5	198	Al—Au	40,5—59,5	569
Bi—Ti	47,5—56,3	188	Ca—Pr	11—89	576
Sn—Zn	96—4	202	Pb—Ba	77,5—22,5	583
Ti—Li	99,4—0,6	211	Pb—Ba	25—75	595
Sn—Au	90—10	217	Pr—Au	78—22	600
Sn—Mg	97,5—2,5	221	Be—Cu	6—94	605
Cu—Sn	1—99	227	Sb	100	610
Pb—Li	99—1	235	Al—Ca	92,4—7,6	616
Sn	100	238	Zn—Fe	27,5—72,5	623
Pb—Bi	87—13	245	Pb—Ca	90—10	630
Zn—Cd	17—83	260	Ce—Ni	68—32	635
Zn—Cd	17,4—82,6	266	Al—Ni	94,3—5,7	640
Fe—Bi	1,5—98,5	271	Ag—Sr	50—50	645
Pb—K	98,1—1,9	277	Ag—Ge	81—19	651
As—Pb	3—97	288	Al	100	660
Pb—Ba	95,5—4,5	293	In—Ce	5—95	670
Ag—Cu—Pb	2,0—0,5—97,5	303	Ag—Ba	72—28	679
Au—Cd	13—87	309	As—Cu	21—69	689
Pb	100	324	Ag—Sr	25—75	693
Bi—K	84—16	340	Pb—Cu	9,5—90,5	707
Mg—Zn—Al	2—94—4	350	La—Mn	92,4—7,8	715
Au—Ge	88—12	356	Mn—Cu	9,7—90,3	722
Sb—Au	25—75	360	As—In	82—18	731
Mg—Zn	3,4—96,5	364	Ag—Sr	10—90	750
Si—Au	6—94	370	Ce—Cu	44—56	755
Zn—Al	95—5	380	Cu—Ag	28—72	761
Zn—Ca	32—68	385	Ag—Pr	87,5—12,5	774
Соль K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	100	398	N—Ca	0,7—99,3	780
Sb—K	87—13	400	Bi—Ca	41,5—58,5	786
Fe—Pa	2,5—97,5	410	Pr—Ca	45—55	792
Ce—Cu	34—66	415	Si—Cu	16—84	800
Zn	100	419	Th—Au	11—89	810
Ti—In	91—9	427	C—Mn	1,3—98,7	820
Al—Mg	67,7—33,3	437	Ag—Si	95,5—4,5	830
Ti—Au	42—58	447	La—Cu	18—82	840
Ag—Pb	55—45	451	Th—Cu	24,2—75,8	846

ципу действия различают яркостные, цветовые и радиационные пирометры.

Яркостные визуальные пирометры применяются для измерения температур выше 600° С. Принцип их действия основан на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры, описываемой законами Планка и Вина.

Схема яркостного пирометра показана на рис. П.27. Объект 1 с помощью объектива 2 через диафрагму 3 и нейтральный фильтр 4 проектируется на плоскость 5. В этой плоскости находится нить специальной пиромет-

рической лампы, которая рассматривается с помощью окуляра 6 через красный фильтр 7. Наблюдатель видит одновременно изображение лампы и объекта. Потенциометром изменяют яркость лампы до исчезновения ее изображения на фоне объекта, затем определяют соответствующую этому моменту силу тока лампы и по градуировочной шкале прибора температуру объекта. Применяя красный фильтр 7, можно вести измерения в узком спектральном интервале. При высоких яркостях объекта вводят фильтр 4.

Недостатком метода является субъектив-

Таблица П.33

Техническая характеристика яркостных пирометров

Тип	Диапазон измеряемых температур, °С	Погрешность, % от верхнего предела	Показатель видения	Время установления, с (недоход, %)	Оптика	Страна, фирма
ФЭП-4	500—2000	1	1/22—1/50	1	Линза	СССР
ФЭП-8	100—600	1	1/22—1/70	1	»	СССР
«Инфапир»	0—100	3	1/7	4(2)	»	ГДР
ТОП-01	20—170	5	1/4	3(2)	Зеркало	Болгария, «Зита»
«Ардонокс»	40—300	1,5—2	1/7	3(2)	»	ФРГ, «Сименс»
«Радиаматик»	50—370	—	1/4	4—6(2)	Линза	США
ИТ-7	30—3000	1	1/60—1/200	0,05—10	»	США, «Барнес»
ИР-ПХ100	120—3500	0,5	1/100	1,5—5	»	Япония

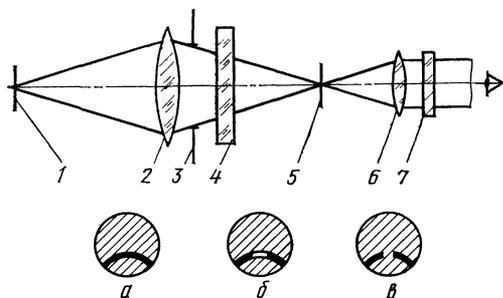


Рис. П.27. Схема яркостного пирометра:

а, б, в — поле зрения прибора для различных режимов накала нити лампы

ность измерения, достоинством — простота и удобство в работе.

Серийно выпускают следующие яркостные визуальные пирометры:

1. ОППИр-09 и ОППИр-017 со встроенными показывающими приборами — портативные технические пирометры с автономным питанием от аккумулятора НКМ-10. Фокусировка от 0,7 до ∞, пределы измерения 800—6000°С, точность ±20°С.

2. ОПК-57 — пирометр повышенной точности. Пределы измерения 700—6000°С, погрешность не более ±10°С.

3. МОП-48 и ОМП-43 — микропирометры для измерения температуры малых объектов. Расстояние до объекта 125—1000 мм. Размеры объекта 0,2—0,5 мм (0,01 мм для ОМП-43). Диапазон температур 800—2900°С (4000°С для ОМП-43).

4. ОП-48 и ЭОП-51М — образцовые пирометры. Фокусировка от 0,7 м. Размеры объекта от 0,5 мм (при  $l=0,7$  м). Диапазон температур 900—6000°С. Погрешность измерения ±1,6°С при  $t=900$ °С.

Яркостные пирометры с электронно-оптическими преобразователями (ЭОП) и передающими телевизионными трубками (видиконами) чувствительны в инфракрасной области спектра и позволяют измерять более низкие температуры (200—600°С). Принцип

действия яркостного пирометра с электронно-оптическим преобразователем основан на преобразовании испускаемых объектом и эталонной лампой инфракрасных лучей в видимое излучение с помощью электронно-оптического преобразователя или видикона. Яркости изображений объекта и спирали пирометрической лампы уравниваются обычным способом.

Принцип действия фотоэлектрических яркостных пирометров основан на применении фотопреобразователей для измерения монохроматической яркости объекта или сравнения ее с яркостью эталона (табл. П.33). Эти приборы позволяют ускорить процесс измерения и исключить субъективные ошибки. Нижний температурный предел пирометров определяется спектральной чувствительностью применяемых фотоприемников. Для наиболее распространенных пирометров он равен 100—200°С.

Одним из лучших приборов этого типа является пирометр ФЭП-4. Пределы измерения температур составляют 500—2000°С. При наименьшем расстоянии до объекта (1000 мм) минимальный размер объекта равен 20 мм. Погрешность измерения ±1%. Приемником служит фотоэлемент ЦВ-3. Пирометр используют в комплекте с быстродействующим потенциометром БП-516 со временем установления 1 с.

Пирометр ФЭП-60 позволяет измерять температуру от 200°С. Приемником служит сернисто-свинцовое сопротивление. Отличительной особенностью прибора является отсутствие объектива. Излучение от объекта передается на приемник с помощью кварцевого световода, входная поверхность которого находится на расстоянии 5—10 мм от контролируемой поверхности.

Своеобразной модификацией яркостных пирометров являются фотографические пирометры, фиксирующие изображение объекта и эталона яркости на фотопленке и осуществляющие фотометрическое сравнение визуальным методом или с помощью денситометров типа ДСЭ-10. Достоинство этих приборов — возможность регистрации темпера-

Т а б л и ц а И.34

Техническая характеристика радиационных пирометров

Тип	Диапазон измеряемых температур, °С	Чувствительность, °С	Погрешность измерения, % (абсолютная погрешность)	Постоянная времени, с
PRT-S	(-50)—(+150)	±0,1	(±0,5 °С)	0,005
IT-7*	30—3000	±0,1	1	0,05
PRT-10	(-10)—(+60)	±0,2	—	2
DHS-14*	40—540	±0,1	1	1
IR-LH	(-50)—(+600)	—	1	0,5
ПИРС-040	20—300	—	1,5	—
РАПИР с телескопом				
ТЕРА-201	40—300	—	1	5

\* Пределы регулирования коэффициента излучения 0,2—1.

турных полей объектов большого размера с высокой пространственной и временной разрешающей способностью.

Действие цветовых пирометров основано на сравнении интенсивности излучения объекта в двух спектральных диапазонах. Оптическая схема цветового пирометра обычно содержит два цветных фильтра, через которые с помощью модулятора поток излучения от объекта попеременно направляется на фотоприемник. Один из серийно выпускаемых цветовых пирометров ЦЭП-3 имеет следующую характеристику: диапазон измеряемых температур 1400—2800°С; показатель визирования 1/150; погрешность ±1%; приемник-фотоэлемент СЦВ-3. Метод цветовой пирометрии может быть распространен на инфракрасную область спектра при соответствующем подборе приемника излучения, материалов проекционной оптики и светофильтров. Нижний предел температурного диапазона может быть расширен до 20—50°С.

Действие радиационных пирометров (табл. И.34) основано на использовании закона Стефана—Больцмана, устанавливающего зависимость излучаемой телом энергии от его температуры. Приборы этого типа широко используют для измерения низких тем-

ператур (20—100°С). Приемниками излучения служат термопары или болометры. Часто применяют термобатареи (последовательно соединенные термопары). В последнее время находят применение пироэлектрические термодетекторы.

Для измерения температуры слабонагретых тел применяют объективы из материалов, прозрачных в соответствующей спектральной области. Стекло используют для измерения температур от 900°С. Кварц применяют для измерения температур более 400°С. Объективы из фтористого лития или фтористого бария позволяют фиксировать температуры в диапазоне 20—500°С. Часто используют также зеркальную оптику. Например, радиометр РАПИР имеет телескопы ТЕРА-50 со сменной оптикой из фтористого лития для измерения температуры в диапазоне 100—500°С, из кварца — 400—1500°С и из стекла — 900—2500°С. В радиометре использована термобатарея из 10 последовательно соединенных хромель-копелевых термопар, рабочие спаи которых расположены на оптической оси объектива. Основные параметры прибора РАПИР: температурный диапазон 100—2500°С (в зависимости от применяемой оптики), показатель визирования 1/16; инерционность не более

Т а б л и ц а И.35

Поправки к показаниям радиационных пирометров для определения действительной температуры по измеренной радиационной температуре  $t_p$

$t_p, ^\circ\text{C}$	Поправка (°С) при коэффициенте излучения									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
500	600	385	270	200	145	105	73	45	21	0
1000	990	630	440	325	240	175	120	74	35	0
1500	1380	680	620	560	330	240	170	95	48	0
2000	1780	1130	790	580	430	310	220	130	62	0

Детектор	Фокусировка, м	Страна	Примечание
Иммерсионный термисторный болометр	0,3	США	—
—	0,3	»	—
—	≤0,3	»	Прибор малогабаритный (пистолетного типа)
—	0,25	США	Индикатор цифровой и стрелочный
—	—	Япония	Существует пять модификаций прибора
Термобатарея	—	СССР	—
»	—	»	—

0,5 с; погрешность  $\pm 8^\circ\text{C}$ . Радиометр работает с пирометрическими вольтметрами РК-15, РК-20, МСЦР-53 и типовыми потенциометрами ЭМП-16АМЗ, ЭПР-16АРМЗ, ЭПД и др.

Серийный радиационный пирометр ПРК-кварц отличается от прибора РАПИР в основном улучшенной системой термостабилизации датчика, а также конструкцией телескопа. Его инерционность около 2 с, погрешность  $\pm 1\%$ .

Основные параметры радиационных пирометров регламентированы ГОСТ 6923—74 и ГОСТ 10627—71.

Существенное влияние на показания радиационного пирометра оказывает состояние поверхности контролируемого объекта, поскольку от него зависит излучательная способность. В табл. П.35 приведены поправки к показаниям радиационного пирометра в зависимости от коэффициента излучения.

Т а б л и ц а П.36

Техническая характеристика образцовых тепловых приборов

Тип	Наименование	Диапазон измеряемых температур, $^\circ\text{C}$
ТСП-10	Платиновый термометр сопротивления	(-183)—(+630)
ТСПН-1	Платиновый термометр сопротивления	(-263)—(+188)
ТР-1, ТР-2	Термометр стеклянный ртутный	0—60
ТЛ-4	То же	-30 — +600
—	Термопара медь — константан	(-200)—(0)
ППО	Термопара платинородий-платиновая	300—1083
РК-15	Телескоп радиационных пирометров ТЕРА-50	400—1500
РС-20	То же	900—2000
РС-25	» »	1200—2500
СИ-10—300 или ЛТПТ	Температурные лампы (ГОСТ 14008—68), градуированные на яркостные температуры при $\lambda=0,65$ мкм	900—2000
ЭОП-51М	Яркостный визуальный пирометр	900—6000
УПО-5	Установка для поверки оптических пирометров	600—1500
УСП-1	Спектропирометр	400—6000
УРПД-1	Установка для градуировки радиационных пирометров	600—2000

### Эталонные приборы

Для обеспечения единства измерений разработаны поверочные схемы, в которых указаны методы градуировки и поверки приборов, а также их предельные и допустимые погрешности. В качестве эталонных интерполяционных приборов используют платиновый термометр сопротивления (от  $-183$  до  $+630^\circ\text{C}$ ) и платинородий-платиновые термопары ( $630$ — $1063^\circ\text{C}$ ).

Эталонными приборами в области температур более  $1063^\circ\text{C}$  (точка кристаллизации золота) служат температурные лампы, градуированные по эталонному абсолютно черному телу ( $t=1063^\circ\text{C}$ ) на яркостные температуры с помощью спектро-пирометрических установок.

Датчики пирометрических приборов (стеклянные жидкостные термометры, термопары, яркостные, цветковые и радиационные пиро-

Т а б л и ц а П.37

Техническая характеристика образцовых электрических приборов

Наименование и тип прибора	Класс точности	Цена деления	Верхний предел измерения
<b>Потенциометры постоянного тока:</b>			
Р308	0,002	0,1 мкВ	211,1 мВ
Р330	0,015	0,1; 1 мкВ	21,1 и 211,1 мВ
УПЛ-60М2	0,02	1; 0,1 мкВ	2111,1; 211,1 мВ
ПП-63	0,05	50, 100 мкВ	50, 100 мВ
КП-59	0,05	50, 100 мкВ	50, 100 мВ
ПП	0,2	100 мкВ	71 мВ
<b>Мосты постоянного тока:</b>			
МО-61	0,05	10 <sup>-4</sup> Ом	10 <sup>8</sup> Ом
МОД-61	0,05	10 <sup>-5</sup> Ом	10 <sup>8</sup> Ом
<b>Образцовые меры:</b>			
<b>катушки сопротивления:</b>			
Р-310	0,02	0,001 Ом	0,01 Ом
Р-321	0,01	0,1; 1; 10 Ом	10 Ом
Р-331	0,01	100 Ом	10 Ом
<b>магазин сопротивлений</b>	0,02	0,01 Ом	11111 Ом

метры и др.) проверяют с помощью устройств воспроизведения температуры. При этом используют два метода проверки — по постоянным точкам плавления и кипения химических чистых веществ и по показаниям образцовых приборов.

Показывающие и самопишущие приборы, входящие в состав термометрической аппаратуры (логометры, электронные потенциометры), проверяют отдельно методом сравнения их показаний с показаниями электроизмерительных приборов. Преобразователи температуры проверяют методом сравнения их показаний с показаниями образцовых приборов с помощью специальных устройств для получения заданной температуры (термостатов, криостатов, электропечей, температурных ламп). В табл. П.36 и П.37 указаны некоторые образцовые приборы, используемые при градуировке термометрической аппаратуры.

#### Библиографический список

Акимов Л. М., Складов Н. М. Методы испытания жаропрочных сплавов на термостойкость — В сб.: «Термостойкость жаропрочных сплавов». М., Оборонгиз, 1962, с. 147—162 с ил.

Баландин Ю. Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении. М.—Л., «Судостроение», 1967. 280 с. с ил.

Быковский Р. В. Контактные датчики температуры. М., «Металлургия», 1978. 238 с. с ил.

Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М., «Металлургия», 1974. 240 с. с ил.

Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение. М., «Металлургия», 1975. 447 с. с ил.

Горбачев В. И. Ксерорадиографический метод дефектоскопии. М., Атомиздат, 1973. 128 с. с ил.

Гордов А. Н. Основы пирометрии. М., Metallurgizdat, 1961. 350 с. с ил.

Гудков С. И. Механические свойства стали при низких температурах. Справочник. М., «Металлургия», 1967. 210 с. с ил.

Гурвич А. К., Еромолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев, «Техніка», 1972. 457 с. с ил.

Денель А. К. Дефектоскопия металлов. М., «Металлургия», 1972. 304 с. с ил.

Дефектоскопия деталей локомотивов и вагонов. М., «Транспорт», 1974. 240 с. с ил. Авт.: Ф. В. Левыкин, И. М. Лысенко, А. Н. Матвеев, А. П. Штреммер.

Добромыслов В. А., Румянцев С. В. Радиационная интроскопия. М., Атомиздат, 1973. 360 с. с ил.

Еремич Н. И. Магнитная порошковая дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1972. 70 с. с ил.

Карякин А. В., Боровиков А. С. Люминесцентная и цветная дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1972. 240 с. с ил.

Клюев В. В. Методы, приборы и комплексные системы для неразрушающего контроля качества продукции заводов черной металлургии. М., «Машиностроение», 1974. 76 с. с ил.

Контроль качества сварных соединений. М., «Машиностроение», 1975. 328 с. с ил. Авт.: В. Н. Волченко, А. К. Гурвич, А. Н. Майоров и др.

Материалы в машиностроении. Т. 2. Справочник. Под ред. И. В. Кудрявцева. М., «Машиностроение», 1967. 496 с. с ил.

Машиностроительные материалы. Справочник. Под ред. В. М. Раскатова. М., «Машиностроение», 1969. 351 с. с ил.

Металловедение и термическая обработка. Справочник. Под ред. Н. Т. Гуднова. М., Metallurgizdat, 1962. 1625 с. с ил.

Методы неразрушающих испытаний. Под ред. Р. Шарна (пер. с англ. под ред. Л. Г. Дубоцкого). М., «Мир», 1972. 494 с. с ил.

Методы повышения долговечности деталей машин. М., «Машиностроение», 1971. 272 с. с ил. Авт.: В. Н. Ткачев, Б. М. Фиштейн, В. Д. Власенко, В. А. Уланов.

Неразрушающий контроль металлов и изделий. М., «Машиностроение», 1976. 456 с. с ил. Авт.: П. И. Беда, Б. И. Выборнов, Ю. А. Глазков и др.

Новгородский М. А. Испытание материалов, изделий и конструкций. М., «Высшая школа», 1971. 328 с. с ил.

Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Ч. I и II. М., «Машиностроение», 1976. 392 с. ч. I и 326 с. ч. II с ил. Авт.: А. С. Боровиков, В. И. Горбунов, А. К. Гурвич и др.

Радиоизотопная дефектоскопия. Методы и аппаратура. М., Атомиздат, 1976. 192 с. с ил. Авт.: А. Н. Майоров, С. В. Мамиконян, Л. И. Косарев, В. Г. Фирстов.

Румянцев С. В. Радиационная дефектоскопия. М., Атомиздат, 1974. 510 с. с ил.

Справочник машиностроителя. Т. 6. Под ред. Э. А. Сателя. М., Машгиз, 1964. 540 с. с ил.

Справочник металлиста. Т. 2. Под ред. А. Г. Рахшадта и В. А. Брострема. М., «Машиностроение», 1976. 718 с. с ил.

Справочник по производственному контролю в машиностроении. Под ред. А. К. Кутая. Л., «Машиностроение», 1974. 676 с. с ил.

Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. М., «Машиностроение», 1966. 331 с. с ил.

Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением. М., «Высшая школа», 1973. 631 с. с ил. Авт.: Н. И. Яловой, М. А. Тылкин, П. И. Полухин и др.

Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М., «Металлургия», 1971. 608 с. с ил.

Тылкин М. А., Яловой Н. И., Полухин П. И. Температуры и напряжения в деталях металлургического оборудования. М., «Высшая школа», 1970. 428 с. с ил.

Тюфяков Н. Д., Штань А. С. Основы нейтронной радиографии. М., Атомиздат, 1975. 255 с. с ил.

Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М., «Наука», 1970. 252 с. с ил.

Хусанов М. Х. Магнитографический контроль сварных швов. М., «Недра», 1973. 216 с. с ил.

Шебенко Л. П., Яковлев А. П. Контроль качества сварных соединений. М., Стройиздат, 1973. 120 с. с ил.

Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. М., «Металлургия», 1978. 320 с. с ил.

Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. М., «Машиностроение», 1974. 57 с. с ил.

Шмелев В. К. Рентгеновские аппараты. М., «Энергия», 1973. 472 с. с ил.

Шрайбер Д. С. Надежность неразрушающих методов контроля. М., «Машиностроение», 1970. 69 с. с ил.

Штампы для горячего деформирования металлов. М., «Высшая школа», 1977. 496 с. с ил. Авт.: М. А. Тылкин, Д. И. Васильев, А. М. Роголев и др.

## Глава III

### ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СТРУКТУРА СТАЛИ

#### 1. Примеси в стали

Сталь представляет собой сплав железа с углеродом, марганцем, кремнием, серой, фосфором и другими элементами. Стали, применяемые в машиностроении, содержат от 0,05 до 1,6% С.

Железо является основным элементом стали. В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях:  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железо.  $\alpha$ -железо, имеющее кубическую объемноцентрированную кристаллическую решетку, устойчиво в двух интервалах температур: ниже  $911^\circ\text{C}$  и от  $1392$  до  $1539^\circ\text{C}$ . Высокотемпературную модификацию  $\alpha$ -железа обычно обозначают  $\delta$ -железо. В температурном интервале  $911$ — $1392^\circ\text{C}$  устойчиво  $\gamma$ -железо, имеющее кубическую гранцентрированную кристаллическую решетку.

Углерод является вторым основным элементом, определяющим структуру и свойства стали, ее поведение при производстве и в эксплуатации.

В соответствии с классификацией, предложенной Н. Т. Гудцовым, все примеси (химические элементы), содержащиеся в стали, можно разделить на четыре группы:

1. Постоянные, или обыкновенные примеси. К этой группе относятся марганец и кремний, а также алюминий, который, как кремний и марганец, применяется в качестве раскислителя. Эти элементы присутствуют в любой хорошо раскисленной стали (в кипящей стали содержание кремния и алюминия невелико). К постоянным примесям следует отнести также серу и фосфор, потому что полностью освободиться от них при массовом производст-