

367540

И.А. СДИНГ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

МЕТАЛЛУРГИЗДАТ
1944



Проф.-докт. И. А. ОДИНГ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

ИЗДАНИЕ 4

*Утверждено ГУУЗ НКЧМ СССР
в качестве учебного пособия для вузов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Москва 1944

ВВЕДЕНИЕ

Металловедение как наука, а вместе с ней и техника металловедческого эксперимента — методы испытания металлов, — за последние три-четыре десятилетия получили чрезвычайно большое развитие. В прошлом столетии вопросами качества металлов занимались главным образом металлургические заводы, поставлявшие металл для машиностроительных заводов. В настоящее время качество металла интересует машиностроительные заводы даже в большей мере, чем металлургические. Поэтому наряду с металлургическими в настоящее время трудно найти машиностроительные заводы, не имеющие лабораторий, предназначенных для производства всесторонних испытаний металлов.

Чем же обусловлено столь сильное развитие металловедения, а вместе с ним и методов испытания металлов?

Ответить на такой вопрос не трудно. Количество типов сплавов, применяемых в настоящее время в промышленности, неизмеримо больше, чем в начале текущего столетия. Составы сплавов, а также способы их приготовления усложнились. Если в начале текущего столетия применялись главным образом простые углеродистые сорта стали, обыкновенные сорта чугуна и цветных металлов и т. п., то теперь применяются сложные, специальные сорта стали, высокопрочные сорта чугуна и цветных сплавов, требующие, как правило, сложных и подчас очень точных технологических процессов.

Усложнение процессов производства современных сложных сплавов заставило изготовителей металлов — металлургов усилить контроль качества продукции и этим обусловило развитие техники исследования металлов.

Это же обстоятельство заставило заводы-потребители металлов усилить контроль их качества, ибо в конечном итоге машиностроительные заводы отвечают за аварию изготовляемых ими машин даже тогда, когда авария произошла вследствие недоброкачественности материала. Применение современных сплавов заставило коренным образом изменить характер технологического процесса изготовления машин. На машиностроительных заводах получили право гражданства такие технологические процессы, которые обеспечивают резкое изменение свойств сплавов. Наиболее характерные из них — термическая обработка, которая часто переплетается с операциями холодной обработки, горячая штамповка и т. д., не говоря о таких операциях, как обычное литье, литье под давлением и т. п.

Наличие в числе технологических процессов машиностроительных заводов операций, определяющих свойства материала, естественно, заставило включить в технологический процесс кроме проверки качества материалов также и исследование и изучение явлений, совершающихся в металлах при осуществлении указанных операций.

Прогресс машиностроения (включая также и приборостроение) явился решающим импульсом в развитии металловедения и основы этой науки — техники эксперимента. Металловедение и методы испытания металлов играют решающую роль как в деятельности метал-

лурга, производящего современные сорта стали, чугуна, цветных сплавов, так и в деятельности механика, потребляющего эти металлы для изготовления турбин, электрических машин, всевозможных станков, самолетов, автомобилей, приборов, кораблей, мостов и т. п.

Все свойства сплавов определяются их составом и внутренним строением. Химический состав и структура сплавов являются первичной и основной характеристикой. И если бы методы определения химического состава и структуры сплавов были соответствующим образом разработаны, то они, собственно, позволили бы устанавливать и все свойства сплавов, как-то: их механическую прочность, термические, магнитные, электрические, коррозионные, технологические и т. п. свойства. К сожалению, техника химического и структурного анализа далеко не развита в указанной выше мере. Современные методы химического анализа не позволяют еще с достаточной быстротой и достоверностью определять все те элементы, которые входят в состав современных черных и цветных сплавов. Современные методы изучения структуры сплавов не дают еще полного ответа на вопросы, связанные с превращениями, совершающимися в кристаллической структуре металлов и обуславливающими изменения свойств сплавов.

Поэтому, несмотря на большое развитие техники химического и структурного анализов, мы принуждены сейчас еще параллельно с этими методами испытания пользоваться большим числом других методов испытаний, которые позволяют количественно оценивать физические, физико-химические и технологические свойства металлов.

В то же время часто эти методы испытания используют для установления изменений химического состава или структуры металла, полученных в результате той или иной технологической операции.

Для проведения химического или структурного анализа, а также для установления физических, технологических и т. п. свойств, от изделия или полуфабриката обычно вырезаются пробы. Однако свойства, полученные при испытании пробы, не всегда характеризуют свойства изделия в целом. Часто приходится прибегать еще к одной группе методов испытания — дефектоскопии, устанавливающей однородность и непрерывность самого металлического вещества в металлических изделиях.

Дефектоскопия имеет существеннейшее значение, так как при современных методах производства металлов и способах их обработки существует возможность получения неоднородной структуры и неоднородного химического состава (ликвация), а также и наличия в изделии пустот (усадочные раковины или газовые включения) или трещин, остаточных напряжений или посторонних включений.

Все, перечисленное выше, и составляет основу методов испытания металлов.

ГЛАВА I

МАКРОАНАЛИЗ

1. Изготовление макрошлифов и их травление

Структура металла, видимая невооруженным глазом или при не-
больших увеличениях при помощи лупы, называется *макроструктурой*.

Макроскопически могут быть изучены величина, форма и располо-
жение отдельных кристаллов, если они при благоприятных условиях
достигнут большой величины¹.

Кроме того, этим приемом можно изучить целый ряд пороков
сплавов, как-то: неоднородность состава в силу так называемой сег-
регации (неоднородности) отдельных составляющих сплава или же,
например, неоднородность, полученную цементацией или обезуглеро-
живанием поверхности стального изделия, а также такие пороки, как
пузыри, усадочные раковины, различные дефекты сварки и т. п.

Макроскопические исследования можно производить или над
изломами сплавов или над специально приготовленными (шлифова-
нием) поверхностями их, так называемыми *макрошлифами*, протрав-
ленными соответствующими реактивами.

В некоторых случаях травление поверхностей излома также при-
носит пользу, уточняя все исследование. Например, при поверхно-
стной цементации железа весьма большую роль играет толщина на-
углероженного слоя. Чаще всего о глубине цементации судят по из-
лому цементованного и затем закаленного пробного бруска. Этот спо-
соб неточный, и поэтому для уточнения его такой излом нужно по-
грузить на 1—2 мин. в спиртовой раствор двуххлористой меди сле-
дующего состава: 100 см³ денатурированного спирта, 1 см³ соляной
кислоты, 2 г $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Под воздействием этого раствора мягкая
не науглероженная середина покроется медной пленкой, науглерожен-
ный же наружный слой останется незатронутым.

О точности этого метода можно судить по данным табл. 1, в ко-
торой приведены для сопоставления глубины цементации, определен-
ные: 1) по излому, 2) по излому, покрытому медью, и 3) при помощи
микроанализа. Из табл. 1 легко видеть, что результаты, полученные
с образцами, покрытыми медью, почти совпадают с результатами,
полученными помощью микроанализа.

Более точные результаты дает макроскопическое исследование
шлифов. Для этого предварительно готовится шлиф следую-
щим способом. Исследуемая поверхность обстругивается на станке
или же опиливается напильником. Если материал слишком твердый,
то приходится прибегать к помощи карборундового или наждачного
камня и шлифовкой получить ровную плоскость. После этого плос-
кость обрабатывают последовательно целым рядом номеров шлифо-
вальной бумаги, переходя постепенно на более мелкие номера. Сле-

¹ Примером такого хорошо развитого кристалла может служить стальной
кристалл Д. К. Чернова, полученный в усадочной раковине 100 г болванки. Его
длина — 39 см, вес — 3,49 кг.

дует отметить, что для быстроты изготовления макрошлифа и для того, чтобы иметь возможность судить, достаточно ли шлифовать, например, бумагой № 0 и можно ли переходить на следующую более мелкую шлифовальную бумагу № 00, необходимо каждым последующим номером бумаги шлифовать только в одном направлении, перпендикулярном направлению предыдущей обработки. При этом шлифовать на одном каком-либо номере нужно до тех пор, пока не исчезнут последние следы предыдущей обработки. После этого шлиф тщательно обмывается и высушивается, после чего можно шлифовать на следующей более мелкой бумаге. Обмывка шлифа нужна для того, чтобы не перенести крупный наждак на бумагу с более мелким наждаком. Шлифовка кончается на наждачной бумаге от № 00 до № 0000, после чего шлиф травится.

Таблица 1

Диаметр пробных брусков мм	Глубина цементации в мм, определенная:		
	по излому	по излому, покрытому медью	при помощи микро- анализа
10	0,8	0,6—0,7	0,65
10	0,6—0,7	0,5—0,6	0,35
16	0,7—0,9	0,7	0,7
10	0,7—0,8	0,3—0,4	0,3
10	0,7—0,8	0,5—0,6	0,89—0,62
16	1,3—1,7	1,1—1,2	1,1—1,2
10	1,5	1,0—1,1	1,2—1,3
12	1,6	1,2	1,2—1,3

Для успешного травления необходимо, чтобы поверхность шлифа была безукоризненно чиста. Мельчайшие частицы пыли, грязи, жира (пота рук) должны быть тщательно удалены, ибо в противном случае травление протекает неравномерно, а это может привести к получению ложной картины макроструктуры. Лучше всего перед травлением основательно протереть шлиф чистой ватой, пропитанной спиртом; просушив затем шлиф, приступают к травлению.

Из реактивов, применяемых для травления макрошлифов углеродистой стали, в первую очередь назовем группу реактивов, содержащих ионы меди. При действии этих реактивов на железный сплав вследствие обменной реакции железо переходит в раствор, а медь из раствора осаждается на поверхности шлифа. Образующиеся осадки в зависимости от состава реактива могут быть крупнокристаллическими, губчатыми, легко смываемыми или, наоборот, мелкокристаллическими, плотными и несмываемыми. К реактивам, дающим первого рода осадок, относится в первую очередь реактив Гейна, представляющий собой 10—12% водный раствор двойной соли хлористой меди и аммония. Этот реактив относится к числу быстро действующих реактивов. Шлиф погружается в реактив и травится в течение $\frac{1}{2}$ —1 мин., затем быстро переносится под сильную струю воды, а осевшая медь счищается ваткой.

Реактив Гейна особенно пригоден для выявления зональной ликвации в малоуглеродистой (до 0,6% С) стали. В этом случае образующийся осадок легко смывается водой. Ликвационные места, богатые углеродом и фосфором, окрашиваются в темный цвет. При травлении высокоуглеродистых или цементованных сталей осадок плотно пристает и не смывается. Иногда помогает повторное травление. Кроме того, осадок можно смыть аммиаком с небольшой добавкой к нему перекиси водорода или насыщенным раствором цианистого калия. Для травления реактивом Гейна поверхность шлифа может быть обработана не особенно мелкими номерами бумаги (достаточно № 0).

При отсутствии двойной соли хлористой меди и аммония реактив может быть приготовлен по следующему рецепту:

Хлористый аммоний (NH_4Cl)	53 г
Хлористая медь (CuCl_2)	85 "
Вода (H_2O)	1000 см ³

Видоизменением реактива Гейна является реактив Гумфри, дающий глубоко протравленный рисунок. Шлиф сначала погружают на 1—2 мин. в реактив Гейна, а затем, не смывая осадок, переносят шлиф в реактив Гумфри состава:

Хлористый аммоний (NH_4Cl)	53 г
Хлористая медь (CuCl_2)	85 "
Соляная кислота (HCl) концентрированная	66 см ³
Вода (H_2O)	1000 "

Продолжительность травления в этом реактиве — от $\frac{1}{2}$ часа до 2—3 час. Толстый слой осадка меди легко смывается водой. Места, богатые углеродом и фосфором, оказываются менее глубоко протравленными и кажутся, в противоположность реактиву Гейна, более светлыми. Реактив Гумфри пригоден для травления сравнительно высокоуглеродистых сталей и легированных (никелевых и хромоникелевых). Этот реактив лучше выявляет дендритную ликвацию, чем зональную.

При большой величине макрошлифа боковые стенки его обклеиваются полосками бумаги, пропитанными массой следующего состава:

Канифоль	50%
Сало	25%
Парафин	25%

При обклейке шлифа по бумаге проводят каким-либо горячим предметом. Края бумаги должны выступать над поверхностью шлифа и образовывать стенки ванны, дном которой является поверхность шлифа. Реактив наливается непосредственно на шлиф.

Глубоко протравленный макрошлиф может быть или сфотографирован обычным методом или же картина макрошлифа может быть воспроизведена на бумаге типографским способом. Для этого шлиф покрывается тонким слоем типографской краски при помощи резиновой пробки и протирается сухой тряпочкой для удаления краски с выпуклых мест. Влажный лист белой бумаги кладут на кусок резины, на бумагу кладут шлиф, сверху прикрывают еще листом резины и все вместе зажимают в конторском прессе.

На рис. 1 изображен полученный таким способом отпечаток турбинного диска. Четкость картины говорит о достоинстве этого способа печатания.

Для выявления тонких структур как реактив Гейна, так и реактив Гумфри слишком грубы.

В этом случае применяют вторую группу реактивов.

1. Реактив Обергоффера, так называемый «первичный травитель», имеет состав:

Хлористое железо (Fe_2Cl_6)	30 г
Соляная кислота концентрированная	50 см ³
Хлористая медь (CuCl_2)	1 г
Хлористое олово (SnCl_2)	0,5 г
Этиловый спирт	500 см ³
Вода	500 г

2. Реактив Стеда-Лешателье:

Этиловый спирт 95°	100 см ³
Вода	10 г
Соляная кислота концентрированная	2 г
Хлористая медь (CuCl_2)	1 г
Пикриновая кислота	0,5 г

Поверхность шлифа должна быть хорошо подготовлена (бумага № 000 или даже полировка). При непродолжительном ($1/2$ —1 мин.) травлении поверхность шлифа покрывается очень тонким слоем меди, который при рассматривании в косом освещении обнаруживает весьма тонкий рисунок. Места, обогащенные примесями, кажутся светлыми.

Полированные шлифы, протравленные реактивами этой группы, можно рассматривать также под микроскопом (см. главу II).

Кроме травления перечисленными реактивами, применяют также глубокое травление в горячем 50 % растворе соляной кислоты, а также в смеси соляной и серной кислот (3 части воды, 2 части серной кислоты, 1 часть соляной кислоты — реактив Совера).

Макроскопические трещины и флокены хорошо выявляются при помощи 10 % водного раствора азотной кислоты.

Медные сплавы травятся обыкновенно 10—20 % раствором персульфата аммония или 8 % раствором хлористой меди в аммиаке.

Для макроскопического обнаружения серы большим распространением пользуются способы, предложенные Гейном и Бауманом.

Способ Гейна состоит в следующем: на отшлифованную поверхность накладывается белая шелковая тряпочка, которая с помощью кисточки смачивается раствором сулемы и, кроме того, слабой соляной кислотой; в тех местах, где находится сернистое железо или сернистый марганец, тряпочка почернеет вследствие образования сульфида ртути; в местах же, богатых фосфором, образуются фосфиды ртути, которые окрашивают тряпочку в бледножелтый цвет.

Способ Баумана — более удобный и состоит в том, что поверхность шлифа покрывается фотографической бромосеребряной бумагой, предварительно смоченной 5 % водным раствором серной кислоты. Необходимо следить, чтобы бумага плотно прилегала к шлифу, а для того чтобы не образовались пузырьки, бумагу следует поглаживать кисточкой. Через 3—5 мин. бумага осторожно снимается и фиксируется. Вся операция производится при дневном свете. Бумага в местах, соприкасавшихся с сернистыми включениями, расположен-

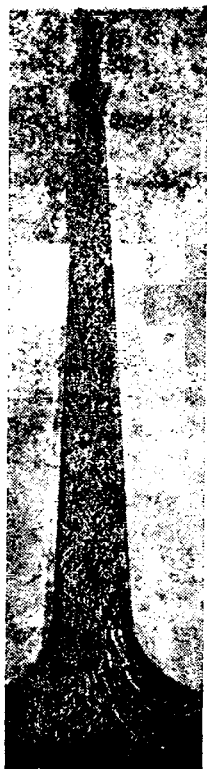


Рис. 1. Макрошлиф турбинного диска, протравленный реактивом Гумфри

ными по поверхности шлифа, будет окрашена в темный коричневый цвет. Причина окрашивания состоит в том, что серная кислота, которой пропитывается бромосеребряная бумага, воздействует с сульфидами железа и марганца, разлагая их, а получающийся при этом сероводород образует на бромосеребряной бумаге сернистое серебро темного цвета.

Дюран¹ предложил вместо бромосеребряной бумаги пользоваться пленкой или пластиной, так как это позволяет размножать полученные отпечатки.

Способ Нисснера² позволяет обнаруживать на отпечатке места, соответствующие окислам железа. Для этого фиксированную хлоробромосеребряную фотографическую бумагу в течение 3 мин. при дневном свете смачивают в растворе разбавленной соляной кислоты (1:20) и поваренной соли (15 ч. поваренной соли на 100 см³ разбавленной кислоты) и затем слегка просушивают между листами фильтровальной бумаги. После этого фотографическую бумагу прижимают к поверхности шлифа исследуемой стали в течение 1—2 мин. В отличие от способа Баумана, который выполняется на шлифованной поверхности стали, способ Нисснера требует тщательной подготовки поверхности стали путем полировки, при полном отсутствии даже мелких рисок или царапин. Перед наложением бумаги полированная поверхность макрошлифа должна быть тщательно очищена от следов абразивов, полировального материала и пыли.

По истечении 1—2 мин. бумага снимается и проявляется в течение 5—10 мин. в растворе железистосинеродистого калия (20 г на 1 л воды). Места, соприкасавшиеся со включениями, содержащими окислы железа, приобретают синюю окраску.

Для предварительного фиксирования хлоробромосеребряной фото-

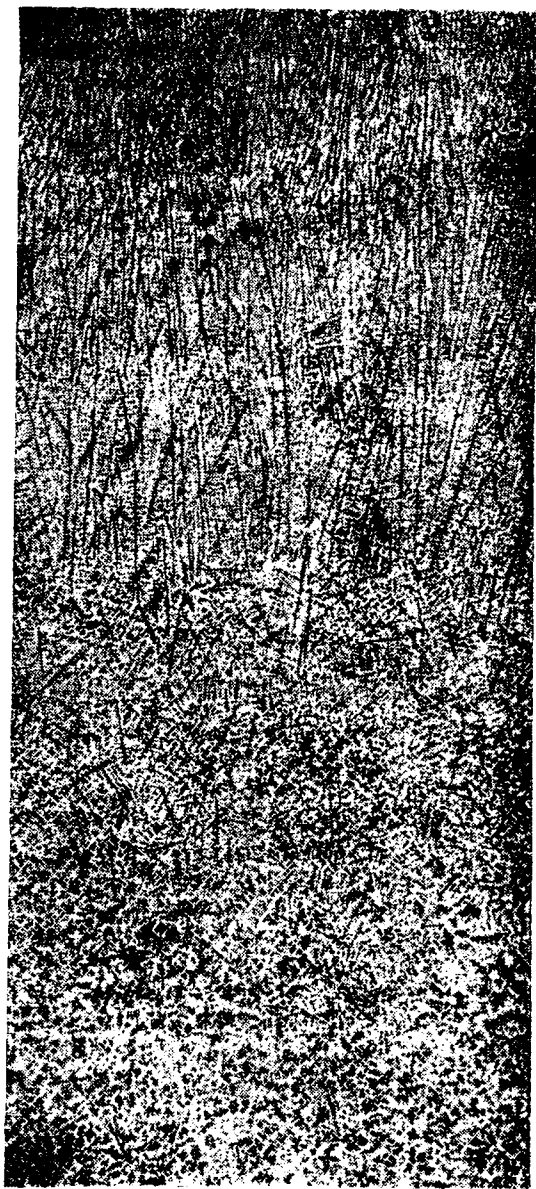


Рис. 2. Дендриты стали. Лин. увел. 6

¹ 1. Genie civil, 85, стр. 131/3, 1924.

² 2. Stahl u. Eisen, 1925, 36, стр. 153.

² M. Niessner, Mikrochem, 10, 1931—32, стр. 275—276; 12, 1932, стр. 1—22.

графической бумаги Нейвирт, Митче и Динбауер¹ рекомендуют следующий раствор:

Тиосульфат натрия	150 г
Метабисульфат калия	20 "
Вода	1000 см ³

Эти же авторы указывают следующие возможные неудачи при выполнении проб как по способу Баумана, так и Ниснера.

1. При недостаточно тщательном наложении бумаги образуются воздушные прослойки между бумагой и поверхностью макрошлифа, вследствие чего на отпечатке получаются белые пятна.

2. При недостаточном смачивании бумаги, чрезмерной просушке или, наконец, плохом качестве бумаги, последняя приклеивается к поверхности шлифа, вследствие чего при снятии отпечатка бумага надрывается.



Рис. 3. Макрошлиф неправильно изготовленного крюка

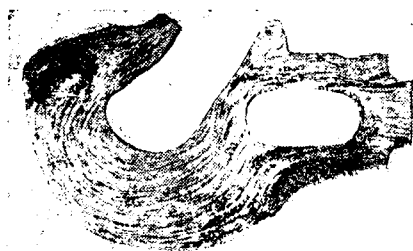


Рис. 4. Макрошлиф правильно изготовленного крюка

3. Вследствие применения чрезмерно сырой бумаги наблюдается размытие деталей отпечатка.

При снятии отпечатка по способу Ниснера возможны еще следующие специфические для этого способа неудачи.

1. Если полированная поверхность плохо очищена от абразива, то загрязненные места вызовут на отпечатке такие же синие пятна, как и места, соответствующие включениям, содержащим окислы железа. В особенности нужно остерегаться таких ложных показаний по краям пустот, ибо здесь легче всего задерживаются остатки абразивов, а с другой стороны, в этих же местах часто скопляются включения, содержащие окислы железа. По краям шлифа также с одной стороны могут скопляться остатки абразивов, а с другой — могут быть и окислы железа, например, в виде окалина.

2. Тонкие трещины и царапины на шлифе вызывают значительное посинение на отпечатке, вследствие чего они могут быть неправильно приняты за включения, содержащие окислы железа.

3. При проведении этой пробы в пыльном помещении на отпечатке появляются синие точки, которые вызваны в этом случае пылинками, осевшими на шлифе или фотографической бумаге.

4. Оксидные включения, содержащие небольшое количество железа или вообще его не содержащие, на отпечатке не проявляются. Следовательно, остается неустановленным то минимальное количество железа, которое должно содержаться в оксидных включениях, для того чтобы быть обнаруженным пробой Ниснера.

¹ F. Neuwirth, R. Mitsche u. H. Dienbauer, Arch. Eisenhüttenw. 13. 1939—1940, стр. 335—58.

На рис. 2—5 приведены макрошлифы.

На рис. 2, который представляет собой протравленный шлиф литой стали, отчетливо видны дендриты.

На рис. 3 изображен шлиф тягового крюка, сломавшегося в работе. Крюк вырезан из листа, о чем свидетельствует рисунок волокон материала.

На рис. 4 представлен макрошлиф такого же крюка, но откованного из полосы; на рис. 5 — сегрегация серы в круглом стержне, выявленная отпечатком на бромосеребряной бумаге.

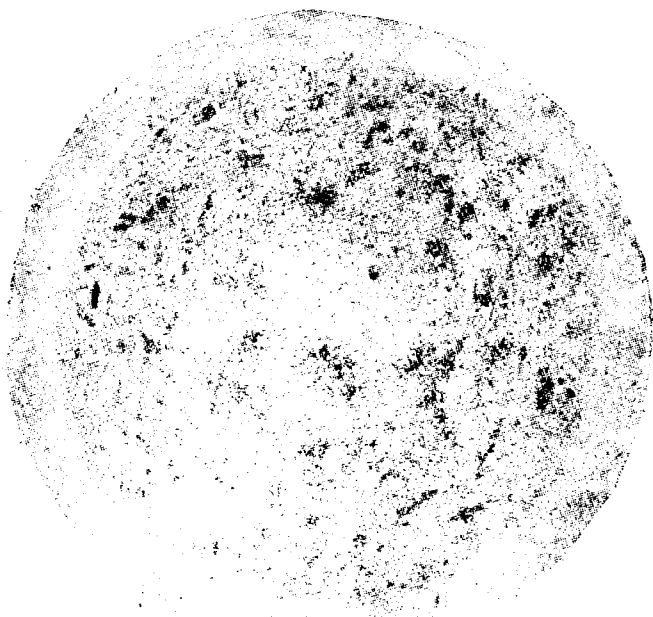


Рис. 5. Сернистые включения (темные)

Из этих примеров видно, какое значение имеет макроанализ при суждении об однородности сплава и характере физического строения металлов. На основании этих же примеров можно прийти к заключению, как ошибочны могут быть суждения о химическом составе сплава по одному лишь химическому анализу без применения макроанализа. Проба, взятая для химического анализа вне ликвационного участка, может указать на вполне здоровый металл. Даже проба, взятая по всему сечению, например строганием, укажет средний состав различных примесей, но по этим данным все же нельзя судить о действительном составе изделия в разных его местах. Химический же анализ в совокупности с макроанализом дает чрезвычайно четкую картину распределения различных составляющих в изделии.

2. Проявление линий сдвигов в наклепанном железе

Микроскопические и макроскопические методы чрезвычайно расширили область исследования металлов. Данные этих методов в связи с химическим анализом позволяют предугадывать ряд свойств металлических сплавов. Но все же, иногда, результаты этих испытаний не совпадали с результатами испытаний физических свойств сплавов. Следовательно, эти методы недостаточно подробно характеризуют

материал, а потому вполне понятны стремления различных исследователей расширить возможности макро- и микроскопических исследований.

К числу таких неразрешенных вопросов следует отнести появление линий сдвигов в наклепанном материале. Этот вопрос имеет чрезвычайно большое значение в технике, так как возможность выявления линий сдвигов позволила бы проверить правильность расчета целых конструкций и определять распределение напряжений в отдельных деталях.

Над разрешением этой задачи работали уже давно. Среди пионеров следует упомянуть Гартмана¹, который впервые указал на проявление линий сдвигов в железе при растягивании его за



Рис. 6. Линии скольжения на зернах феррита. Реактив Фри.
Лин. увел. 20

пределом упругости (линии Гартмана), затем Польмейера и Раушингера². Впервые весьма подробно освещен был этот вопрос Мартенсом³. Эти исследователи работали над полированными образцами, вызывая на поверхности их линии сдвигов. Однако результаты всех этих работ носили случайный характер: не всегда удавалось получить достаточно яркую картину деформации в металлах. Благодаря малой контрастности получающейся картины, результаты этих опытов большей частью нельзя было зафиксировать на фотографической пластинке.

Большим успехом в разрешении этой задачи следует считать достижения Фри⁴, Обергоффера и Миа Туссена⁵, предложивших выработанные ими методы травления наклепанного железа.

Реактив Фри представляет собой раствор хлористой меди в соляной кислоте; количество соляной кислоты при этом берется из тако-

¹ Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts, 1896, Paris

² Mitt. aus dem Mech. Techn. Laborat. d. Tech. Hochschule, München. H. 3. 1874.

³ Martens, Materialkunde für Maschinenbau. Bd. 1, S. 69.

⁴ St. u. Eisen, № 32, 1921.

⁵ St. u. Eisen, № 43, 1924.

го расчета, чтобы из раствора медь не могла осаждаться на железо. Процесс изготовления шлифа протекает в следующем порядке: наклепанный образец выдерживается в течение получаса при 200° , после чего распиловкой, шлифовкой и полировкой изготавливается шлиф. Для макроанализа можно ограничиться шлифовкой на мелком номере бумаги без полировки.

Шлиф травится непродолжительное время; если нужно, после травления образец вновь полируют и т. д.

Для макроскопического анализа наклепанного железа применяется следующий реактив:

Соляная кислота концентрированная	120 см ³
Вода	100 "
Хлористая медь (кристалл.)	90 г

В этом растворе шлиф травится в течение 1—3 мин. После этого шлиф вынимается из реактива, и травление продолжается путем протирания шлифа пропитанной реактивом тряпочкой, посыпанной порошком хлористой меди. Все травление занимает от 2 до 20 мин., после чего шлиф промывается спиртом и высушивается. Промывать шлиф водой не рекомендуется во избежание загрязнения осаждающейся меди.

На рис. 6 представлена микрофотография шлифа железа, протравленного реактивом Фри. Легко видеть зерна феррита и линии скольжения на них.

На рис. 7 изображен макрошлиф железа, деформированного легким изгибом и протравленного по методу Фри.

На рис. 8 изображен макрошлиф железа, деформированного вдавливанием пуансона (травление реактивом Фри). Ясно видны три зоны: верхняя — темная, наиболее деформированная; затем светлая, где видны следы рекристаллизации при нагреве (образец нагревался перед травлением до 600°), и наконец, третья, опять темная, — кривые, направленные в глубь образца.

Появление этих темных линий Фри объясняет следующим образом.

Известно, что при сжатии аморфных или кристаллических тел разрушение происходит по так называемым плоскостям скольжения, образующим некоторый угол α с направлением действия сил. Величина этого угла зависит от значения сил внутреннего трения мате-



Рис. 7. Котельное железо. Травление реактивом Фри. Натуральная величина



Рис. 8. Деформация вдавливанием. Реактив Фри. Натуральная величина

риала. Поэтому можно предположить, что напряжения, возникающие вдоль этих плоскостей скольжения, значительно больше напряжений в других участках образца. Следовательно, эти места больше подвержены действию реактива, в результате чего они и обнаруживаются травлением.

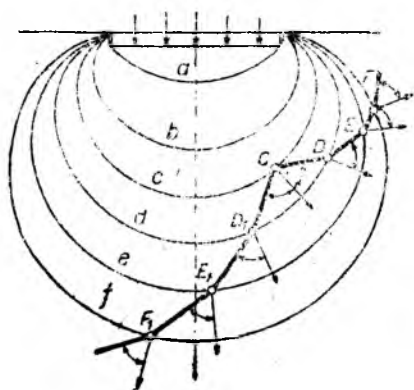


Рис. 9. Схема возникновения темных линий при травлении реактивом Фри

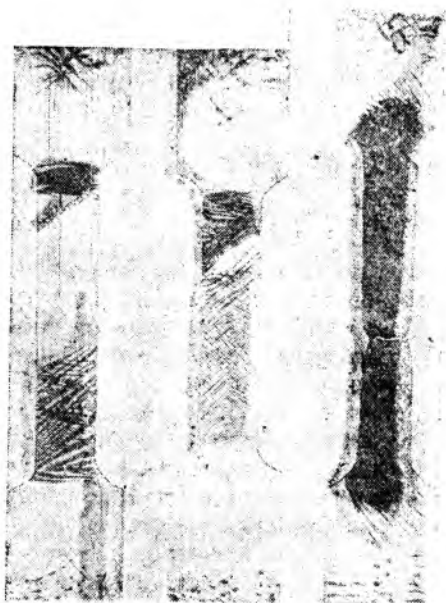


Рис. 10. Железо, растянутое на 1%. Реактив Фри

Рис. 11. Железо, растянутое на 2%. Реактив Фри

Рис. 12. Железо, растянутое на 29%. Реактив Фри

На рис. 9 схематически изображено направление этих линий. Здесь $a, b \dots f$ — зоны равномерного распределения нагрузки. Построив по углу α плоскости скольжения, мы получим для данного разреза кривую $FEDCD, E, F$, весьма схожую с теми кривыми, которые изображены на рис. 8.

Как показали опыты Дадл и Джеворса¹, наиболее отчетливая картина получается при небольших деформациях. В сильно деформированных образцах эти линии сливаются, и картина получается менее четкая (рис. 10—12).

Обергоффер и Миа Туссен воспользовались известным явлением, что железо сильнее ржавеет вдоль линии Гартмана, и, рассматривая процесс ржавления как явление электрохимическое, предложили выявлять эти линии, пользуясь электролизом.

В результате этих опытов был выработан следующий метод травления: испытуемое железо здесь так же, как и по методу Фри, выдерживается в течение получаса при 200° , затем полируется и служит анодом в электролитной ванне. Вторым электродом (катодом) лучше всего применять также железо, медь или никель.

¹ J. Iron a. Steel Inst., № 1, стр. 191—204, 1925.

Из растворов лучшим считается следующий:

Вода	3000 см ³
Соляная кислота	10 "
FeCl ₃	300 г

Наилучшая температура ванны 15—20°. Замыкая анод и катод, можно получить требуемый ток, под влиянием которого, однако, травление идет медленно. Поэтому лучше пользоваться аккумулятором, регулируя плотность тока 0,002—0,003 А на 1 см² шлифа. Продолжительность травления — 1/2—2 часа.

После травления шлиф обмывается и для получения более контрастной картины немного шлифуется на мелком номере наждачной бумаги.

Количество электролита влияет на скорость травления: чем меньше раствора, тем дольше травление. В среднем нужно считать на 1 см² шлифа от 100 до 200 см³ раствора.

ГЛАВА II

МИКРОАНАЛИЗ

1. Микроскоп

а. Оптика микроскопов. Наиболее существенной частью микроскопа является его оптика. Вопросы общей конструкции микроскопов, играющих также немаловажную роль при исследовании металлов, должны предусматривать удобство и простоту использования этого прибора. От качества же оптики зависят четкость и правильность изображения структуры металлов, что является наиболее важным в микроанализе.

Совершенство изображения, наблюдаемого микроскопом, зависит от целого ряда факторов, учтенных в той или иной степени при кон-

струирования его оптики. Для того чтобы овладеть техникой обращения с микроскопом, необходимо усвоить его особенности, ибо только в этом случае можно на микроскопе получить фотографию

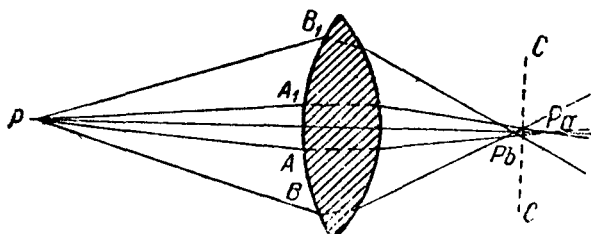


Рис. 13

максимально высокого качества.

Обратимся в первую очередь к объективам. При конструкции объективов учитываются неизбежные явления, называемые сферической и хроматической аберрациями и астигматизмом.

Сферической аберрацией называется несовпадение в одном фокусе центральных и краевых лучей (рис. 13). Лучи PA и PA_1 , расположенные близко к оптической оси, дают изображение в точке Pa . Другие лучи, располагающиеся дальше от оси линзы, дадут изображения не в Pa , а ближе к линзе. Например лучи PB и PB_1 дадут изображение в точке Pb .

При наличии такого явления, очевидно, получить сколько-нибудь точное изображение предмета совершенно невозможно: вместо точки получаются кружки светорассеяния. При этом чем короче фокус и чем большее увеличение дает линза, тем резче выражено явление сферической аберрации.

Хроматическая аберрация, которая так же как и сферическая приводит к размытию изображения, является следствием того, что лучи различного цвета имеют неодинаковые показатели преломления. Напомним, что пучок белого света, обычно применяемый для освещения объекта, изучаемого под микроскопом, состоит из лучей с различной длиной волны. Эти лучи могут быть разложены в спектр, и наименьшая длина волны, которую может воспринимать человеческий

глаз, соответствует темнофиолетовому цвету (длина волны $3900 \cdot 10^{-8}$ см). В порядке возрастания длины волны, цвета спектра располагаются в следующей последовательности: фиолетовый — индиго — голубой — зеленый — желтый — оранжевый — красный. Длина волны последнего равна $7700 \cdot 10^{-8}$ см, которая и является верхним пределом, воспринимаемым человеческим глазом. Вследствие хроматической аберрации детали изображения оказываются окаймленными радужными каемками.

Астигматизм заключается в том, что изображение получается правильным не на плоскости, а на криволинейной поверхности. Так как микрофотографирование производится обычно на плоской пленке или пластинке, то из-за явления астигматизма изображение получается несколько искаженным.

Устранение указанных трех основных недостатков достигается особой конструкцией объективов с применением нескольких линз, изготовленных из разных сортов стекла, обладающих различными показателями преломления и специальными окулярами, компенсирующими неправильности изображения объективов. Рассмотрим некоторые типы объективов.

Апохроматы. У этих объективов, при помощи особых сортов стекла и плавикового шпата, коррекция сферической и хроматической аберрации для видимой части спектра настолько совершенна, что ошибки изображения устраняются для всех цветов спектра, за исключением совершенно незначительных остатков, которые компенсируются соответствующими окулярами.

Ахроматы. Эти объективы коррегированы сферически, а также и хроматически для средних цветов спектра (желтый, зеленый).

Окуляры Гюйгенса не меняют заметным образом состояния коррекции изображения, данного объективом. Они применяются для работы в сочетании с ахроматами.

Компенсационные окуляры компенсируют остаточную неточность изображения апохроматов. Поэтому они применяются в сочетании с апохроматами, но могут также применяться для работы с сильными ахроматами.

Хомали (Homale). Астигматизм не исправляется ни апохроматами, ни ахроматами. Следовательно, наблюдаемые изображения лежат не в плоскости, а на криволинейной поверхности. Окуляры Гюйгенса и компенсационные окуляры могут поэтому на плоскости отчетливо изобразить только кольцообразные зоны этого искаженного промежуточного изображения, оставляя расплывчатыми края и середину поля зрения. Такое неравномерное распределение резкости изображения особенно неблагоприятно выявляется на фотографической пластинке. Поэтому для получения четкого изображения по всему полю зрения применяют специальные проекционные окуляры, часто называемые **хомалими** (Цейсс). Нужно помнить, что кривизна поля изображения, даваемая отдельными объективами, — различна. Поэтому для каждого объектива изготавливается свой проекционный окуляр, коррегирующий кривизну поля изображения в требуемой степени. Для визуального изучения структуры проекционными окулярами, конечно, пользоваться не следует.

б. Разрешающая способность объективов. Задача микроанализа заключается в возможно более подробной расшифровке структуры, т. е. в том, чтобы различить, а точнее — вскрыть под микроскопом возможно более мелкие частицы строения изучаемого металла. Величина d самой мелкой частицы, различаемой данным объективом, за-

висит, во-первых, от длины волны света λ , освещающего изучаемый объект, и от так называемой апертуры объектива A :

$$d = \frac{\lambda}{2 A}.$$

Следовательно, если для освещения объекта в первом случае будет применен белый свет с $\lambda = 0,55 \mu$, а во втором случае ультрафиолетовый с $\lambda = 0,2-0,3 \mu$, то в последнем можно будет различать частицы в два раза меньших размеров, чем в первом случае.

Апертура объектива является одной из важнейших характеристик объектива. Если S (рис. 14) — светящаяся точка, а a — отверстие объектива, то выражением апертуры будет служить

$$A = n \sin u,$$

где n — показатель преломления среды между рассматриваемым предметом и объективом, а u — половина угла отверстия объектива.

Чем больше апертура объектива, тем больше разрешающая способность последнего, т. е. тем меньше размер самой мелкой частицы, различаемой данным объективом.

Практически угол зрения $2u$ (рис. 14) не может быть больше 144° , следовательно, $\sin u$ ограничивается предельным значением

$$\sin 72^\circ = 0,95.$$

Показатель преломления среды между рассматриваемым предметом и объективом для воздуха равен

$$n = 1.$$

Следовательно, для так называемых сухих объективов (между предметом и объективом — воздух) максимальное значение апертуры равно:

$$A = n \sin u = 0,95.$$

При этом максимальная разрешающая способность равна при освещении белым светом:

$$d = \frac{0,55}{2 \cdot 0,95} = 0,29 \mu \cong 0,0003 \text{ мм}.$$

Если же пространство между объективом и объектом заполнено веществом, показатель преломления которого больше, чем показатель преломления воздуха, то апертура может быть увеличена. Для этого, как правило, применяют кедровое масло с показателем преломления $n = 1,51$, что позволяет увеличить разрешающую способность объектива на 50%.

Объективы, применяемые с маслом, называются иммерсионными (*immerge* — погружать), в отличие от сухих. После употребления масло должно быть тщательно удалено обтиркой чистыми стираемыми полотняными тряпками, пропитанными бензолом (но не спиртом).

в. Увеличение микроскопа. Увеличение микроскопа определяется произведением из увеличений объектива и окуляра. Получаемое изображение (промежуточное) от объектива, представляющее собой в зависимости от апертуры объектива более или менее совершенную расшифровку подробностей структуры, увеличивается еще окуляром.

Однако при этом не безразлично, во сколько раз окуляр должен увеличить промежуточное изображение. Очевидно, что окуляр может показать в увеличенном виде только такие подробности, которые действительно существуют на промежуточном изображении, данном объективом. Следовательно, попытка сделать плохо расшифрованную структуру более ясной путем чрезмерно сильного окуляра будет совершенно бесполезна. Мало того, такие «холостые» увеличения, в особенности в местах, не поддающихся полной расшифровке объективом, могут дать совершенно неправильное представление о действительной структуре.

Данное объективом промежуточное изображение должно быть увеличено настолько, чтобы подробности структуры не ускользали от внимания наблюдающего. В противном случае разрешающая способность объектива не была бы полностью использована. Аббэ установил следующее правило: общее увеличение должно лежать в пределах 500—1000-кратной апертуры применяемого объектива.

На объективах и окулярах обычно указаны их увеличения, и простым перемножением этих значений определяется общее увеличение. Однако эти данные установлены для расстояния ясного зрения, равного 250 мм. Если же это расстояние иное, например при микрофотографировании, когда фотопластинка может отстоять от окуляра на расстоянии $l = 250$ мм, тогда увеличение определится равным:

$$\alpha_l = \alpha_{250} \cdot \frac{l}{250},$$

где α_{250} — увеличение, указанное на окулярах и объективах при $l = 250$ мм.

При применении хомалей и других проекционных окуляров приходится определять общее увеличение микроскопа при помощи объектного микрометра.

Последний представляет собой полированную металлическую пластинку, на которой нанесен штрих длиной в 1 мм. При помощи специальной делительной машины этот миллиметр разделен на 100 частей. Установив такой объектный микрометр на микроскоп и фокусируя его на матовое стекло фотографического аппарата, определяют (рис. 15) количество делений полученного изображения (каждое деление равно 0,01 мм), которое совпадает с целым числом миллиметров по масштабной линейке. Допустим, что отсчет по изображению дал $m = 0,10$ мм, а отсчет по масштабной линейке $A = 15$ мм. Тогда увеличение

$$\alpha = \frac{A}{m} = \frac{15}{0,10} = 150.$$

Для того чтобы иметь возможность при субъективном наблюдении измерять величину структурных составляющих, некоторые окуляры снабжаются окулярным микрометром. Так как абсолютное значение деления окулярного микрометра различно в зависимости от увеличения применяемого объектива, то оно должно быть определено отдельно для каждого объектива. Это осуществляется таким образом, что вместо объекта на микроскоп устанавливается объектный микрометр и затем определяется то количество делений окулярного микрометра, которое совпадает с определенным участком объектного микрометра. Если, например, 4 деления окулярного микрометра совпадают по объектному микрометру с длиной, равной 0,1 мм, то одно деление окулярного микрометра соответствует величине $0,1 : 4 = 0,025$ мм на поверхности объекта.

г. Световые фильтры. Человеческий глаз, а также и фотопластинки воспринимают с различной интенсивностью различные цвета спектра. Эта чувствительность схематически изображена на рис. 16. Для выравнивания ее прибегают к помощи световых фильтров, которые большей частью представляют собой окрашенные стекла или кюветту с красочным раствором. Чем плотнее фильтр, тем сильнее задерживаются все другие цвета, тем монохроматичнее пропускаемые лучи, идущие на освещение объекта. Плотность может лучше всего регулироваться стеклянными фильтрами путем последовательного включения нескольких стеклянных пластин. В зависимости от поставленной цели применяются фильтры различных цветов.

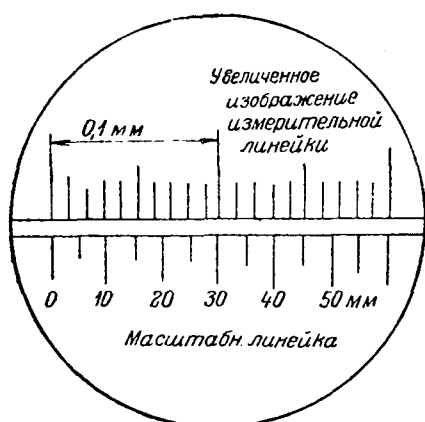


Рис. 15

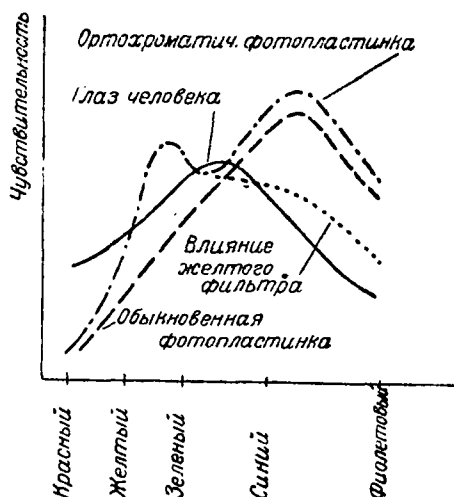


Рис. 16

Для получения более или менее правильного изображения оттенков цветов изучаемого объекта при микрофотографировании большей частью применяются ортохроматические пластинки, чувствительные для желтого цвета (рис. 16). Если применить при этом желтый или желто-зеленый фильтр для ослабления синих лучей, то кривая чувствительности ортохроматических пластинок в этих условиях приблизится к кривой чувствительности человеческого глаза. На фотографии проявятся оттенки тех цветов, которые были отмечены при субъективном наблюдении в микроскоп.

В некоторых случаях, наоборот, нежелательна правильная передача оттенков цветов, а требуется возможно контрастнее выделить одну какую-нибудь составляющую структуры. В этом случае нужно применить фильтр, цвет которого является дополнительным к цвету структурной составляющей. Два цвета, при смешении которых получается белый цвет, называются дополнительными. Такими дополнительными цветами являются: красный (6562) и зеленовато-голубой (4921), оранжевый (6077) и голубой (4897), желтый (5853) и голубой (4854), желтый (5671) и синий (4645), зеленовато-желтый (5736) и фиолетовый (4330). (По Гельмгольцу. В скобках показаны длины волн в 10^{-8} см.)

Если, например, нужно получить возможно больший контраст между желтой структурной составляющей, расположенной на белом основном фоне, то можно избрать синий фильтр, который ослабит

интенсивность желтых лучей. Белый фон в синих лучах дает контрастное изображение, если будет применен апохроматический объектив, так как для ахроматов резкость изображения для синего цвета часто бывает недостаточной. Однако подобные контрастные фильтры могут столь сильно ослабить структурную составляющую с дополнительным цветом, что особенности этой структуры очень слабо изобразятся на пластине. Поэтому для контрастного выделения одной какой-либо структурной составляющей рекомендуется в этом случае пользоваться не «контрастными» фильтрами, а фильтром того же цвета, как и цвет выявляемой структурной составляющей.

Для улучшения резкости изображения при работе с ахроматами, которые, как указывалось выше, корректированы только для средних цветов видимого спектра (желтый, зеленый), необходимо применять желто-зеленые фильтры и пользоваться ортохроматическими фотопластинками, чувствительными к желто-зеленому цвету.

При работе с апохроматами, полностью корректированными для всех цветов видимого спектра, желто-зеленые фильтры применяются только для возможно более правильной передачи цветовых оттенков изучаемого объекта.

Хорошая коррекция апохроматов выгодно используется для повышения разрешающей способности путем применения синего фильтра. При помощи синего света ($\lambda = 0,44 \mu$) можно получить повышение разрешающей способности на 25% по сравнению с желто-зеленым светом ($\lambda = 0,55 \mu$).

Так как цветная коррекция апохроматов не распространяется до ультрафиолетовых лучей, синие же фильтры еще пропускают их, то для поглощения ультрафиолетовых лучей (в соединении с синим фильтром, наибольшая проницаемость которого находится в области фиолетовых лучей) рекомендуется еще дополнительный фильтр из раствора: 100 см³ дистиллированной воды, 1 см³ серной кислоты, 3 г хинного сульфата (сернокислого хинина).

Для поглощения ультрафиолетовых и фиолетовых лучей в соединении с синим фильтром и наибольшей проницаемости в области синих лучей, рекомендуется дополнительный фильтр, представляющий собой раствор из: 100 см³ дистиллированной воды, 5 см³ серной кислоты, 20 г сернокислого хинина.

Фильтр после длительного употребления становится желтым и поглощает также видимые синие и фиолетовые лучи. Поэтому необходимо периодически заменять раствор свежим.

д. Осветительные аппараты, стативы. Освещение изучаемого микроскопом шлифа можно произвести тремя способами, как это указано на рис. 17 А, В, С. Изучаемая поверхность обозначена буквой *S*, *oo* — оптическая ось, *ок* — окуляр и *f* — объектив микроскопа.

При освещении по способу А поверхность шлифа наклонена в отношении оптической оси. Луч света *e*, отразившись от поверхности шлифа в направлении *a*, попадает в объектив и окуляр микроскопа. Этот способ применяется лишь при очень небольшом увеличении.

В случае В поверхность шлифа перпендикулярна оптической оси, а между изучаемой поверхностью и объективом установлена под углом 45° к оптической оси плоскопараллельная стеклянная пластинка *pl*. Луч света частью проходит в направлении *e*, частью же, отразившись от пластинки *pl*, падает на шлиф по направлению 1. Отраженный от поверхности шлифа луч в направлении 2 падает на пластинку *pl*, от которой он частично отражается в направлении 4, частично же проходит в направлении 3, попадая в объектив, и т. д.

При таком способе освещения, который дает обычно весьма равномерную картину, используется лишь $\frac{1}{4}$ освещающих шлиф лучей, что отражается на интенсивности освещения. Стекла́нная пласти́нка pl очень часто устанавливается между окуляром и объективом.

Такой способ освещения не дает теней, и при этом изображение даже рельефных поверхностей получается плоским, с очень узкими и резкими контурами.

В случае С поверхность шлифа также перпендикулярна к оптической оси. Между объективом и окуляром устанавливается призма полного внутреннего отражения pr , которая покрывает половину объектива. Лучи света, отразившись от призмы, собираются объективом f и, отразившись от шлифа, идут в направлении a . Этот способ дает большую интенсивность освещения, но, как видно из схемы, для построения изображения используется лишь половина отверстия объектива, другая половина служит лишь в качестве осветителя.

Следовательно, апертура объектива может оказывать полное действие только в отношении тех

размеров частиц, которые расположены параллельно ребру призмы. В отношении же размеров частиц, расположенных перпендикулярно ребру призмы, апертура, а следовательно, и разрешающая способность снижаются на половину. Предположим, что объект имеет пластинчатое строение (например перлит), причем часть пластин (зерен) располагается перпендикулярно, а другая часть — параллельно ребру призмы. Если толщина пластин предельно соответствует апертуре объектива, то на изображении будут расшифровываться только те пластины, которые располагаются перпендикулярно ребру призмы (размер, определяющий их толщину, направлен параллельно ребру призмы). Пластины, проходящие параллельно ребру, не расшифровываются, так как для них апертура мала.

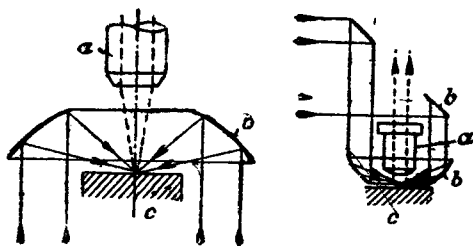


Рис. 18. Освещение в темном поле. a — объектив; b — зеркало; c — шлиф

Следовательно, для получения тонкого, изобилующего мелкими деталями изображения необходимо пользоваться стеклян­ной пласти­ной. Максимальная же яркость и контрастность достигаются употреб­лением призмы.

На рис. 18 представлена еще одна схема освещения так называемого темного поля, характеризующаяся тем, что объект освещается косыми лучами в условиях, приближающихся к освещению в рассеянном дневном свете. Вследствие этого цветные объекты отражаются в характерных для дневного освещения красках, а шероховатости поверхности кажутся более контрастными.

Между источником света и объективом ставятся обыкновенно две диафрагмы. Первая из них, расположенная ближе к источнику света, служит для регулировки интенсивности освещения. Вторая диафрагма расположена на таком расстоянии от объектива, что изображение ее совпадает с изображением рассматриваемого шлифа. Уменьшая отверстие этой диафрагмы, можно по желанию ограничить размеры освещенного поля изображения. Роль этой диафрагмы чрезвычайно важна для получения хорошего изображения. Дело в том, что поле изображения, даваемого объективом, обыкновенно значительно больше диаметра тубуса микроскопа. Крайние лучи, попадая на стенки трубки, многократно от них отражаются и в конце концов попадают в глаз наблюдателя в качестве лишних лучей, вредящих контрастности картины. Ограничивая помощью диафрагмы освещенное поле, мы тем самым задерживаем эти лишние лучи. Поэтому при перемене объектива или окуляра необходимо каждый раз устанавливать диафрагму таким образом, чтобы освещенное поле было меньше или равнялось видимому в окуляр полю изображения. Дальнейшее увеличение отверстия диафрагмы немедленно ведет к ухудшению картины.

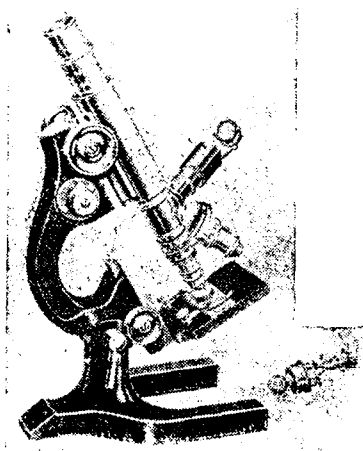


Рис. 19. Вертикальный микроскоп Рейхерта

В последнее время начали применяться диафрагмы, устраняющие центральные лучи источника света. Помещая добавочную диафрагму сбоку от оптической оси или изготовляя отверстие ее в виде кольца, возможно получить соответственное боковое или коническое освещение. Такого рода диафрагмы позволяют, варьируя направление света, подбирать в каждом отдельном случае освещение, наиболее выгодно оттеняющее характерные особенности структуры.

Употребление светофильтров, как выше было указано, необходимо при фотографировании в случае применения ахроматов. При употреблении апохроматов в комбинации с проекционными окулярами вполне возможно получение доброкачественного снимка без светофильтра.

е. Типы микроскопов. В зависимости от положения трубки микроскопы разделяются на вертикальные и горизонтальные (тип Ле Шателье).

Вертикальный микроскоп фирмы Рейхерта. Этот микроскоп, снабженный револьверной головкой на три объектива, изображен на рис. 19. Вращением этой головки один объектив заменяется другим, позволяя без особого труда в короткий промежуток времени проследить строение изучаемого шлифа при различных увеличениях. Вся осветительная аппаратура, включая лампу накаливания, весьма компактно пристроена к трубке микроскопа; это весьма существенное обстоятельство позволяет с удобством пользоваться таким микроскопом в производственной обстановке.

Большой горизонтальный микроскоп фирмы Рейхерта. Этот микроскоп является одним из наиболее совершенных типов, применяемых в металлографии. Общий вид прибора представлен на рис. 20. На металлической станине устанавливаются: фото-

графический аппарат, микроскоп и осветительная лампа. Микроскоп снабжен столиком Ле Шателье (рис. 21). Образец 1 устанавливается шлифом книзу над отверстием горизонтального столика 2. Опускани-

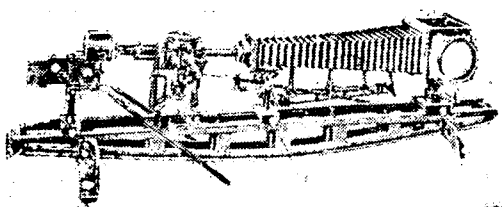


Рис. 20. Горизонтальный микроскоп Рейхерта

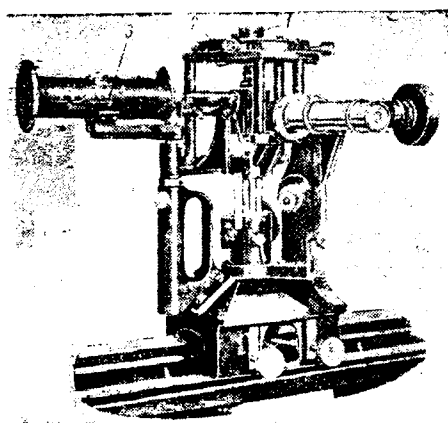


Рис. 21. Столик Ле Шателье

ем и подыманием столика шлиф приближается или удаляется от объектива и устанавливается этим на фокус.

Учитывая достоинства и недостатки освещения при помощи призмы и стеклянной пластинки, этот микроскоп снабжают двумя осветительными трубками. В одной из трубок помещается пластинка *G*, в другой — призма *P* (рис. 22—24).

Лучи света, собранные системой линз, помещенных в трубке 3 (рис. 21), направляются далее в одну из этих осветительных трубок. Поворотом рукоятки *H* (рис. 23) можно включить любую осветительную трубку и этим быстро установить желаемый способ освещения (рис. 22—24). Отраженный от шлифа луч света попадает на призму *P* или пластинку *G* и направляется в окуляр.

К основной станине 1 (рис. 20) прикрепляется вспомогательная станина 2 со столиком 3 (рис. 25), позволяющая производить на этом

же аппарате и макросъемку. Для этого статив микроскопа отодвигается в сторону, а фотографическая камера снабжается специальными объективами, позволяющими производить съемки при различных увеличениях (от 1,5 до 16 линейных увеличений).

Такая универсальность всего прибора делает его незаменимым для небольших и средних лабораторий. Для крупных же лабораторий, оборудованных обычно несколькими микроскопами, эта универсальность становится уже излишней, так как крупные лаборатории обычно имеют специальные постоянные установки для макросъемок.

Последняя модель большого горизонтального микроскопа Рейхерта снабжена оптикой, дающей при непосредственном наблюдении линейное увеличение от 30 до 2250 раз и при фотографировании до 5000 раз.

Горизонтальный микроскоп фирмы Цейсса. Главное достоинство микроскопа этой фирмы — его отличная оптика. Микроскоп Цейсса позволяет вести рассмотрение структур при больших увеличениях (до 4000), сохраняя при этом достаточную четкость и яркость изображения. На рис. 26 представлена модель этого микроскопа. Весь аппарат покоится на доске, подвешенной пружинами к металлическим стойкам, которые в свою очередь опираются на стол или постамент микроскопа. Такая упругая опора во время работы на приборе и в особенности при фотографировании микроизображе-

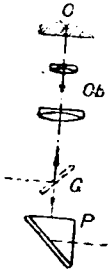


Рис. 22

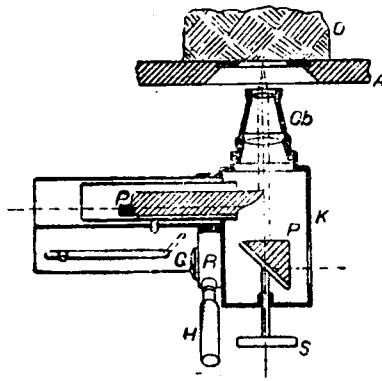


Рис. 23

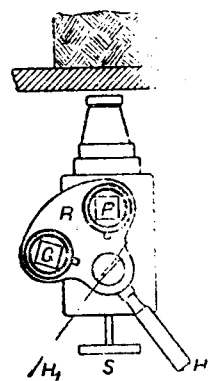


Рис. 24

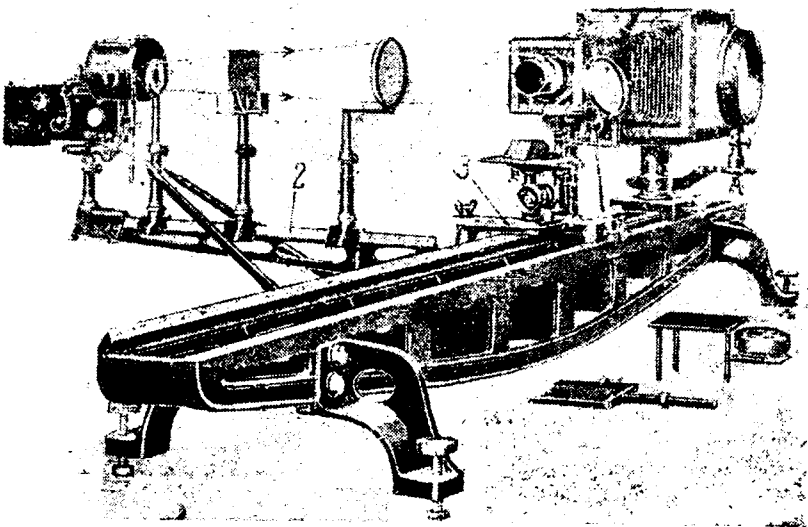


Рис. 25. Устройство для макросъемки

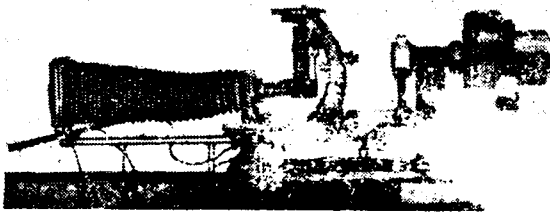


Рис. 26

ния погашает все возникающие толчки и сотрясения, сохраняя тем самым острую настройку микроскопа. Все устройство микроскопа можно разделить на три части: 1) осветитель, 2) собственно микроскоп, 3) фотографический аппарат.

Осветитель состоит из источника света, лучи которого собираются и направляются системой линз. В качестве такого источника света может служить вольтова дуга, лампа Нернста или обыкновенная автомобильная лампочка. Вольтова дуга обладает большой силой света и употребляется главным образом для целей фотографирования, в то время как другие источники (электрические лампочки) служат для обыкновенного рассматривания изображения в окуляр. На рис. 27, изображена схема прохождения луча через оптику микроскопа.

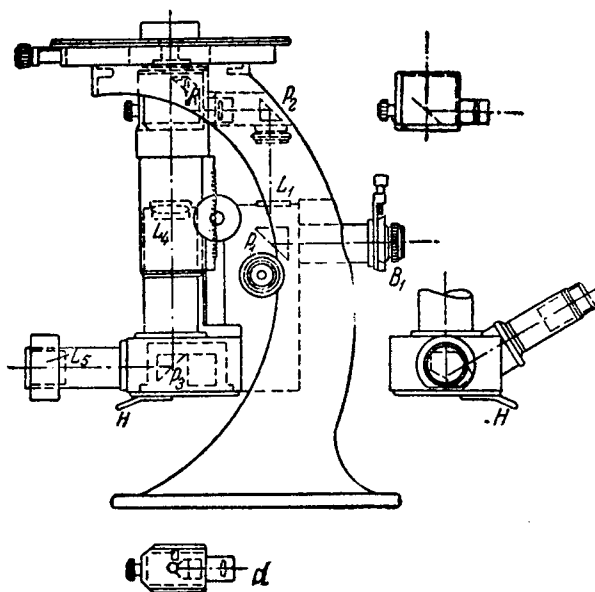


Рис. 27

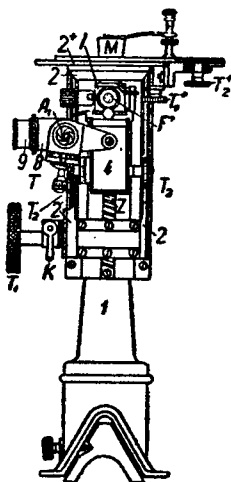


Рис. 28

Луч света, попадая сначала на ирисовую диафрагму B_1 , которая служит для задерживания лишних лучей, мешающих получению наиболее рельефного изображения на матовом стекле, встречается на своем пути ряд призм и двояковыпуклых чечевиц (P_1, L_1, P_2, R), после чего поступает через объектив на рассматриваемый объект. Отраженный от поверхности шлифа луч улавливается линзой L_4 и направляется ею на призму P_2 , которая в зависимости от поворота рычага H может направить его или в глаз наблюдателя через окуляр L_5 или на матовое стекло фотоаппарата.

На том же рис. 27 отдельно изображены наиболее существенные детали осветительной оптики: снизу призматический осветитель d , употребляемый при рассмотрении структур в косом освещении, и наверху обыкновенный осветитель с наклонно поставленным стеклом, предназначенный для прямого, вертикально падающего света.

Микроскоп. Столик микроскопа укреплен неподвижно в отношении вертикального перемещения, так что во время настройки изображения на фокус рассматриваемый предмет находится в полном покое. Это обстоятельство позволяет подвергать исследованию довольно тяжелые объекты, не опасаясь порчи подъемного механизма тубуса. Для исследования всей площади шлифа столик в горизонтальной плоскости имеет два взаимно перпендикулярных перемещения, что с достаточной полнотой обеспечивает возможность изучения поверхности шлифа.

Микроскоп Лейца. Большой металлографический микроскоп фирмы Лейца, изображенный на рис. 28—30, подобно ранее разобраным микроскопам (Цейсс и Рейхерт), также состоит из трех основных частей: осветителя, микроскопа и фотографического аппарата.

Устройство микроскопа следующее: столик 2 укреплен на прочной стойке 1 и может совершать движение вверх и вниз в своих направляющих. Для систематического рассматривания предметов столик может передвигаться винтами T_1 и T_2 в двух взаимно перпендикулярных

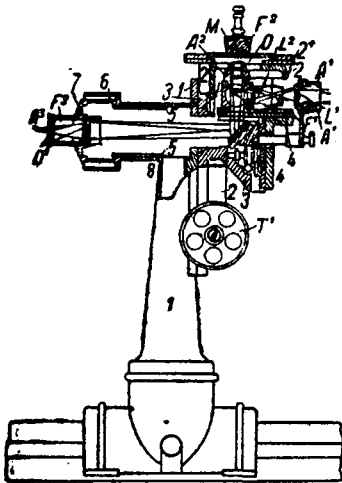


Рис. 29

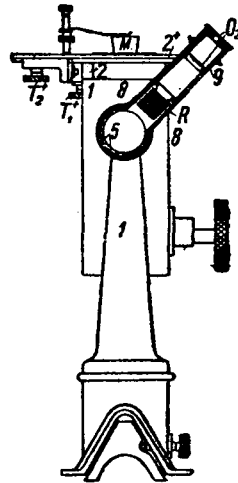


Рис. 30

направлениях. Самая установка столика производится при помощи зубчатки, перемещаемой в зубчатой рейке Z головкой T , причем закрепление его производится помощью рычага K . Более точная установка производится головкой T_2 , для чего устроено приспособление 3, наглухо связанное со стойкой 1, в котором салазки 4, поддерживающие объектив, могут двигаться микрометрически в узких границах. Со стойкой же 1 связан и тубус 5, заканчивающийся расширением 6, которое прикрыто крышкой 7 с трубкой для проекционного окуляра O .

Источник света с соответствующей осветительной оптикой посылает лучи, встречающие диафрагму A , которая служит для регулирования силы света. Затем лучи проходят через линзу L' , собираются в диафрагме F , предназначенной для регулирования величины поля изображения, проходят через линзу L^2 и через объектив O и концентрируются на полированной поверхности рассматриваемого шлифа M . Отразившись от последнего, лучи попадают на металлическое зеркало, которое направляет лучи или в глаз наблюдателя или в лежащую слева фотокамеру.

На оси тубуса наклонно расположена трубка 8 с вытягивающейся трубкой 9, которая имеет на нижнем конце отражательную призму R , а на верхнем окуляр O_2 . В случае фотографирования трубка 9 выдвигается до конца и оставляет свободным путь для лучей к окуляру O . Для рассматривания — трубка 9 до конца задвигается, и лучи, отразившись от R , попадают в O_2 .

Новая модель горизонтального микроскопа фирмы Цейсса «Неофот». На рис. 31 представлена новейшая модель

горизонтального микроскопа Цейсса, которая является наиболее совершенной моделью.

Микроскоп «Rational» Рейхерта. В самое последнее время фирмой Рейхерта выпущена новая модель микроскопа, соединяющая в себе все преимущества горизонтального микроскопа с ком-

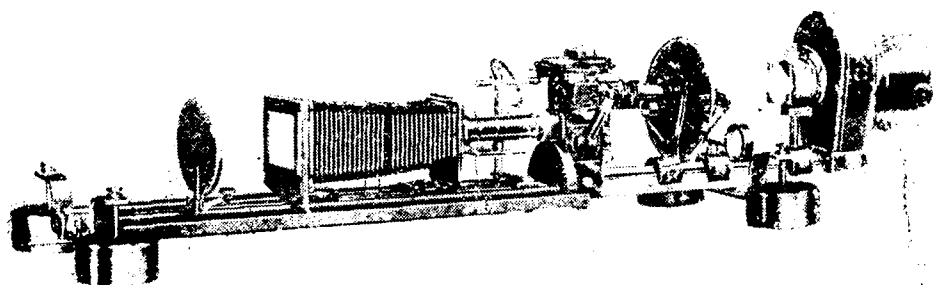


Рис. 31

пактностью и портативностью вертикального (рис. 32). Как показала практика, размеры микрофотографий редко превышают 9×12 см, поэтому, отказавшись от получения снимков 13×18 см, оказалось

возможным поместить фотоаппарат в самой тумбе микроскопа, сохранив в остальном общие принципы конструкции, применяющиеся в микроскопах горизонтального типа. Чрезвычайная компактность и удобство обращения с микроскопом этого типа, повидимому, обещают ему большое распространение.

Цеховые микроскопы, изготавливаемые разными фирмами, представляют собой вертикальные микроскопы, укрепленные на особом рода стативах, позволяющих устанавливать микроскоп непосредственно на самом изделеи, пользуясь при этом сравнительно небольшими увеличениями.

Бинокулярный микроскоп. Бинокулярный микроскоп незаменим при

изучении изломов. Он состоит из двух отдельных микроскопов, скрепленных между собой таким образом, что каждый из них образует с вертикалью угол около $7\frac{1}{2}^\circ$. В таком сдвоенном ми-

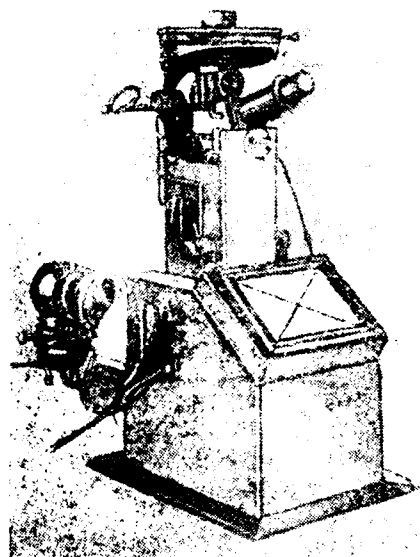


Рис. 32. Микроскоп «Rational» Рейхерта

микроскопе грубая установка на фокус производится от руки и закрепляется помощью винта (рис. 33), а более тонкая — кремальерой.

Каждая трубка вращается вокруг оси, при этом, изменяя расстояние между окулярами, можно установить прибор по глазам наблюдателя. Слияние обоих изображений дает стереоскопический эффект и при рассматривании обоими глазами предмет приобретает полный рельеф. Микроскоп имеет сменные объективы и окуляры, которыми пользуются при изменении увеличения от $\times 8$ до $\times 336$. Для рассматривания как мелких, так и довольно крупных предметов применяют различные стативы. Окуляры могут заменяться фотографической камерой, позволяющей получать два стереоскопических снимка, которые при рассматривании в стереоскоп дают рельефные изображения.

Макроустановка Лейца. Макроустановка Лейца служит для рассматривания шлифов и изучения их макроструктуры. Устройство ее чрезвычайно просто. По штативу С (рис. 34) движется верти-

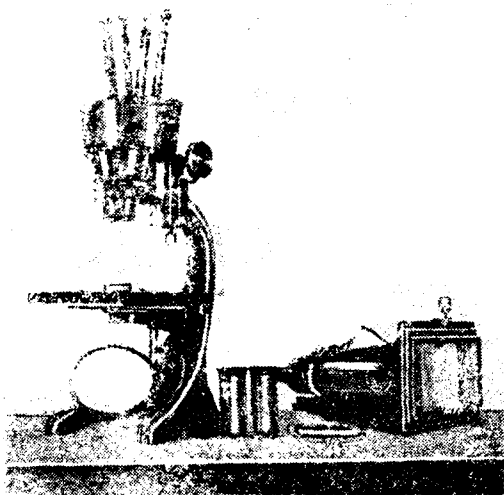


Рис. 33

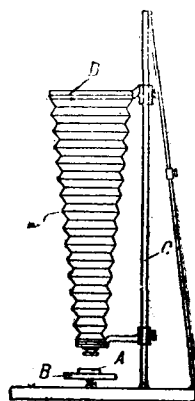


Рис. 34

кально фотокамера, которая книзу суживается и заканчивается металлической оправкой со сменными ввинчивающимися объективами. Верхняя часть камеры оправлена деревянной рамкой *D*, в которую вставляется матовое стекло. Рассматриваемый шлиф *A* устанавливается на столике *B*.

Для фотографирования матовое стекло снимается и вместо него вставляется кассета. Съемки происходят при дневном свете, который в случае необходимости может быть заменен освещением вольтовой дугой.

2. Микроанализ

Микроанализ ставит своей целью изучение *микроструктуры* сплава, т. е. структуры, наблюдаемой при больших увеличениях под микроскопом. Микроанализ дает нам возможность изучить:

- 1) фазовый, структурный, а в отдельных случаях и химический состав сплава;
- 2) величину, форму и ориентацию составляющих сплав кристаллитов (зерен);

3) однородность или, наоборот, неоднородность сплава в разных точках;

4) наличие или отсутствие в сплаве посторонних включений, их характер и количество и, наконец,

5) по совокупности этих моментов решить вопрос о механической и термической обработках, которым подвергался сплав, о пригодности сплава для того или иного назначения, о причинах плохого качества сплава, и т. д.

Микроанализ складывается из последовательного выполнения следующих операций:

а) выбора места взятия пробы для микроанализа (так называемого микрошлифа); б) приготовления шлифа; в) травления шлифа; г) изучения микроструктуры шлифа под микроскопом. Следует отметить, что во многих случаях изучение шлифа под микроскопом производится дважды: до травления и после травления. Ниже приводится объяснение, почему именно так следует поступать.

а. Выбор места взятия пробы для шлифа. Выбор места взятия пробы для шлифа является одной из ответственнойших задач всего исследования, так как до известной степени предопределяет те выводы, которые можно будет сделать при последующем изучении микроструктуры. При изучении, например, структуры стального слитка является далеко не безразличным, откуда вырезан шлиф: из центральной части слитка или из его поверхностных слоев, потому что микроструктура в этих двух случаях будет далеко не одинаковой. Точно так же зависимость микроструктуры чугуна от скорости охлаждения резко выявляется при изучении микроструктуры толстых и тонких стенок чугунных отливок. Микроструктура прокатанного материала будет различной в зависимости от того, на каком шлифе — продольном (т. е. плоскость которого параллельна направлению прокатки) или поперечном (плоскость которого перпендикулярна направлению прокатки) — производится изучение. Так как каждое изделие в различных своих частях может иметь различную микроструктуру, то при выборе места в изделии, из которого будет вырезана проба для шлифа, необходимо учитывать, что в данном случае будет изучена микроструктура не всего изделия, а только некоторой, определенной его части. Поэтому, намечая место взятия пробы для шлифа, нужно остановить свой выбор на таком месте, которое является либо наиболее характерным для данного изделия или же по каким-либо иным соображениям может представить в данном случае особый интерес. Дать какие-либо более конкретные указания относительно выбора места взятия пробы для шлифа крайне затруднительно. Правильный выбор места взятия пробы для шлифа — это дело в одинаковой степени и опыта и здравого смысла. Знание технологии изготовления изделия и условий его работы должно являться решающим при выборе места изделия, изучение структуры которого представляет для нас особый интерес. Так, например, если желают изучить структуру резца и по ней сделать заключение о качестве термической обработки, необходимо, разумеется, так отрезать от резца кусок для изготовления шлифа, чтобы в плоскость последнего попала режущая кромка резца, так как с интересующей нас точки зрения это будет наиболее важное место.

Часто, однако, невозможно ограничиться изготовлением одного шлифа; в таких случаях их делают несколько, причем между собою шлифы различаются либо местом их расположения в изделии, либо направлением (продольные и поперечные шлифы).

6. Изготовление шлифа. После выбора места взятия пробы для изготовления шлифа необходимо произвести отделение ее от изделия. Если материал достаточно мягкий, то кусок, предназначенный для изготовления шлифа, можно отрезать обыкновенной ножовкой или вырезать на станке (фрезерном, строгальном и т. д.). Если материал твердый и хрупкий (обычно эти свойства сопутствуют друг другу), как, например, белый чугун или закаленная сталь, то нужный кусок металла можно отбить ударом молотка. Пробу для шлифа от вязкого металла не рекомендуется отбивать молотком, так как в силу происходящей при этом большой пластической деформации получается значительное искажение структуры.

Размеры проб должны быть небольшие. Наиболее удобны для приготовления шлифов квадратные пробы размерами от 10×10 мм до 20×20 мм или круглые соответствующего сечения. Шлифы больших размеров трудно и долго изготовлять. О приготовлении шлифов меньших размеров будет сказано ниже. Высота пробы (размер, перпендикулярный плоскости будущего шлифа) должен быть такой, чтобы шлиф можно было удобно держать в руках при его изготовлении (высотой 10—20 мм).

Кратко опишем способ приготовления малых микрошлифов, например тонких листов, проволоки и т. п. Изготовить такие шлифы без специальной их монтировки невозможно, так как слишком мала их поверхность. Специальной монтировкой таких шлифов добиваются искусственного увеличения поверхности шлифа. Из наиболее распространенных способов монтировки малых микрошлифов следует отметить следующие.

1. Монтировка с помощью металлических держателей (струбцинок), представляющих собою две пластинки, между которыми располагается проба из листового материала и которыми она зажимается при помощи винтов.

2. Заливка пробы легкоплавким сплавом, бакелитом, сургучом или серой; для этого на гладкую поверхность ставится металлическое кольцо (например отрезок латунной трубы) высотой 15—20 мм, а внутрь кольца помещается образец вниз поверхностью, на которой должен быть сделан шлиф. Пространство между кольцом и образцом заливается одним из указанных выше веществ. В качестве легкоплавкого сплава обычно применяется сплав Вуда, состоящий из 50 весовых частей висмута, 12,5 частей кадмия, 12,5 частей олова и 25 частей свинца. Применяются также следующие сплавы: 1) 50 весовых частей висмута, 30 частей свинца, 25 частей олова и 3 части цинка, или 2) 52,5 весовых частей висмута, 32 частей свинца и 15,5 частей олова (последние два сплава рекомендованы проектом стандарта на металлографическое исследование стали при контрольных испытаниях).

3. Нарращивание электролитическим путем слоя меди (или другого металла) на боковую поверхность образца.

Все эти способы, к сожалению, имеют ряд известных недостатков. Зажим в металлические держатели неудобен тем, что в небольшую щель между пластинкой держателя и образцом (совершенно плотного контакта между ними достигнуть обычно невозможно) попадают при шлифовке частицы абразива, которые могут там застрять, а затем при дальнейших операциях шлифовки или при полировке испортить шлиф, образуя царапины. Кроме того, в эту щель затекает при травлении реактив, который затем выступает и производит дополнительное травление структуры у краев шлифа, что приводит к их перетравливанию. Эти застрявшие капли реактива могут затем попасть на объектив микроскопа и вызвать порчу его оптики.

Наконец, если пластинки держателя электроотрицательны по отношению к материалу шлифа, то они совсем нестати предохраняют шлиф от травления около его краев, в результате чего шлиф оказывается протравленным крайне неравномерно. Те же недостатки свойственны и монтажке шлифа заливкой. К тому же в этом случае отрицательно сказывается обычно большая разница в твердости шлифа и заливаемого вещества. Так как последнее истирается при шлифовке значительно интенсивнее, шлиф оказывается несколько выступающим над плоскостью залитого вещества, что может привести к «завалу» краев шлифа. Кроме того, легкоплавкие сплавы указанного выше состава в настоящее время почти не могут применяться в силу огромной дефицитности висмута и олова. Электролитическое наращивание слоя меди, помимо того, что оно достаточно длительно, сравнительно мало эффективно, так как не может, естественно, сколько-нибудь значительно увеличить площадь шлифа.

С целью устранения этих недостатков предлагаются следующие способы. Для улучшения контакта между шлифом и легкоплавким сплавом рекомендуется погружать образец до заливки в раствор хлористого цинка, который, действуя как флюс, протравит поверхность образца и тем обеспечит более тесный контакт между ними и легкоплавким сплавом. Во избежание образования щели между образцом и пластинками металлического держателя рекомендуется между ними прокладывать листы пропускной бумаги или — еще лучше — тонкие прокладки из мягкой меди. Можно также образец до зажатия в струбцинке опустить в расплавленный парафин.

Вилелла¹ рекомендует следующий способ монтажа малых микрошлифов: латунное кольцо (лучше овальной формы) ставится на стальную или стеклянную пластинку, а внутрь его помещается образец. В пространство между кольцом и образцом наливается ртуть на высоту 3—5 мм. Затем на ртуть доверху наливается расплавленная сера. После затвердевания серы ртуть осторожно выливается.

Этот способ имеет преимущество перед остальными в том отношении, что он обеспечивает плотный контакт между серой и образцом и при этом отсутствует гальваническое действие латунного кольца при травлении; наконец, в этом случае используется дешевая сера вместо дорогого и дефицитного легкоплавкого сплава.

После отделения куска металла необходимо произвести опиловку плоскости будущего шлифа. Это можно сделать обыкновенным слесарным напильником, зажав кусок металла в тиски. Еще лучше поступить наоборот: водить не напильником по шлифу, а шлифом по напильнику, положенному на верстак. В этом случае значительно меньше опасность «завалить» края шлифа. Если материал тверд и не поддается опиловке напильником, то плоскость можно получить на наждачном круге. При этом следует лишь избегать разогревания образца, в особенности, если есть основания полагать, что металл прошел термическую обработку, так как в этом случае нагрев образца может вызвать в нем структурные изменения, например отпуск. Поэтому при получении плоскости на наждачном камне необходимо обязательно интенсивно охлаждать образец, например обильной струей воды или очень частым опусканием шлифа в воду.

Предназначенная для исследования поверхность шлифа должна представлять собою плоскость. Необходимость изготовления шлифа именно по плоскости становится понятной из условий изучения микроструктуры шлифа под микроскопом. Одним из условий получения

¹ J. R. Vilella, Metallographie Technique for Steel, 1938.

под микроскопом вполне отчетливой картины является требование, чтобы все точки рассматриваемого места шлифа были на одинаковом расстоянии от объектива (т. е. были бы в его фокусе). Если это условие не будет выполнено, то в поле зрения микроскопа, соответствующем лишь весьма малой части шлифа, увидим с достаточной четкостью только небольшой участок структуры, тогда как все остальные участки, попадающие в поле зрения микроскопа, не смогут быть рассмотрены вследствие того, что их изображение будет «размыто». Таким образом, применением шлифа с недостаточно плоской поверхностью искусственно уменьшается и без того ограниченное поле зрения микроскопа. Исходя из этого, необходимо, чтобы изучаемая поверхность шлифа представляла собою правильную плоскость.

При недостаточно аккуратном приготовлении шлифа (в особенности при опиловке плоскости) его края бывают «завалены», т. е. лежат ниже плоскости остальной части шлифа. Во многих случаях это обстоятельство не имеет существенного значения. Наоборот, в ряде случаев (поверхностная цементация, поверхностное обезуглероживание, отбеливание чугунов и т. п.) структура краев шлифа может представлять особое и даже исключительное значение. В таких случаях наличие «завалов» совершенно недопустимо.

После того как плоскость на шлифе опилена, приступают к шлифовке. Эта операция производится следующим образом: на стекло или другую хорошую гладкую плоскость кладут лист грубой наждачной бумаги (№ 1 или № 0) наждачной стороной вверх. На бумагу кладут шлиф опиленной стороной вниз и с некоторым нажимом водят шлифом по бумаге до тех пор, пока все царапины, оставленные напильником, не исчезнут. Затем следует тщательно сдуть со шлифа наждачную пыль и протереть его мягкой тряпочкой или ваткой, а еще лучше обмыть шлиф, взять следующий по зернистости номер бумаги (№ 0 или 2/0) и производить на ней ту же операцию шлифовки, причем рекомендуется при переходе с одной бумаги на другую менять направление шлифовки на перпендикулярное. Изменять направление шлифовки следует потому, что в этом случае будет существовать критерий для суждения о том, когда следует кончать шлифовку на одном номере бумаги и переходить к шлифовке на следующем: именно, это следует делать тогда, когда все царапины (риски), оставшиеся на шлифе от предыдущего номера бумаги, исчезнут и заменятся идущими в перпендикулярном направлении царапинами (рисками) от нового номера бумаги. Так следует продолжать шлифовку до наждачной бумаги с наиболее мелким зерном.

Наждачная бумага выпускается следующих номеров: 1, 0, 2/0, 3/0 и 4/0, причем с увеличением номера зернистость ее уменьшается. В известных случаях при шлифовке можно переходить с одного номера бумаги на другой через номер (например после бумаги № 1 перейти на бумагу № 2/0, затем на бумагу № 4/0). После шлифовки на наждачной бумаге переходят к шлифовке на крокусной бумаге, которая имеет номера: 0, 00, 000 и 0000¹. Шлифовкой на крокусной бумаге № 000 или № 0000 заканчивается операция шлифовки. Обмыв шлиф от крокусной пыли и мельчайших стружек металла, приступают к следующей операции — полировке.

Операцию шлифовки можно значительно ускорить, если наклеить бумагу на диск 1 шлифовального станка, общий вид которого изображен на рис. 35.

¹ В настоящее время завод им. Ильича выпускает бархатную шкурку (корундовая и карборундовая) № 5-м, 10-м, 15-м, 30-м, 60-м и 120-м.

Полировка шлифов производится обычно на полировальных станках, которые отличаются от шлифовальных только тем, что вместо наждачной бумаги на деревянный или металлический диск станка натянута плотная материя (сукно, фланель, бархат). При полировке на

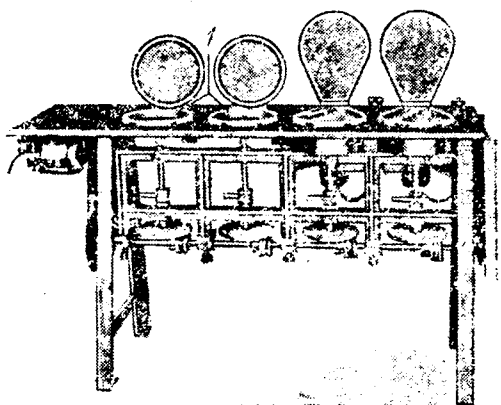


Рис. 35. Общий вид шлифовального и полировального станка

шлифовке на станках, рекомендуется ставить мотор на малую скорость и держать шлиф ближе к центру диска. Кроме того, настоятельно рекомендуется держать шлиф в нижней части диска у вертикальных шлифовальных или полировальных станков или в стороне от работающего у горизонтальных станков, иначе шлиф, случайно вырвавшись из рук может сильно ударить.

Для предотвращения нагрева шлифа при шлифовке окружная скорость вращающегося диска не должна превышать 5—6 м в секунду. Поверхностный нагрев шлифа незаметно для шлифовальщика может достигнуть 200—300° (цвета побежалости), а это обстоятельство изменит структуру (например закаленной стали). При полировании, ввиду того что диск смачивается водой со взболтанным абразивом, нагрева опасаться не приходится; поэтому скорость по окружности диска доводят до 15 м в секунду и даже больше.

При полировке необходимо следить за тем, чтобы диск был все время влажным. Следует также избегать сильного нажатия шлифа на диск, так как это не только не ускоряет процесса полировки, но может даже привести к ухудшению качества шлифа, вследствие возможного выкрашивания хрупких элементов структуры (шлаки, графит и т. д.). На рис. 36 представлено одно и то же место шлифа стали, содержащей шлаковые включения. Верхний рисунок соответствует хорошему качеству шлифовки, а именно — шлаковые включения не выкрошились, тогда как нижний рисунок соответствует небрежному изготовлению шлифа: шлаки выкрошились и на шлифе имеются лишь полосы, в которых были расположены включения. Следует обратить особое внимание на то, что при выкрашивании шлаков произошло выкрашивание также окружающих участков основного металла, что может создать преувеличенное представление о толщине шлаковых включений.

Нужно особо подчеркнуть, что основное условие получения высокого качества шлифа — педантичная чистота и аккуратность в работе. Не следует допускать переноса грубых зерен наждака с одной бумаги на другую, а также попадания наждака и пыли на поли-

сукно наносят взмученный в воде полировальный порошок (абразив). В качестве последнего обычно применяют окись алюминия, окись железа (крокус), окись магния (магнезию) и др.

Увлажнив диск полировальной жидкостью, приводят его во вращение и, легко прижимая к нему шлиф отшлифованной стороной, производят полировку.

Лицам, мало опытным в полировке или

ровальное сукно (для этого необходимо шлиф тщательно вытирать или — лучше — промывать между отдельными операциями шлифовки и перед началом полировки), избегать при полировке сильных нажатий, плотно закрывать полировальные диски крышками во избежание попадания пыли, производить шлифовку и особенно полировку в чистых, не пыльных помещениях, промывать время от времени полировальное сукно и т. д.

Полировка считается законченной тогда, когда на шлифе не остается никаких царапин и рисок от шлифовки и шлиф имеет зеркальный блеск.

Операции шлифовки и полировки могут быть механизированы. Схема станка, на котором операции шлифовки и полировки механизированы, показана на рис. 37. На вертикальном валу *a* насажен медный диск *d* диаметром около 250 мм и толщиной 3—5 мм. Под диском укрепляются две электромагнитные катушки *e—e*, питаемые переменным током от осветительной сети. Создаваемый ими магнитный поток способен удерживать на поверхности медного диска шлифы из магнитного ма-

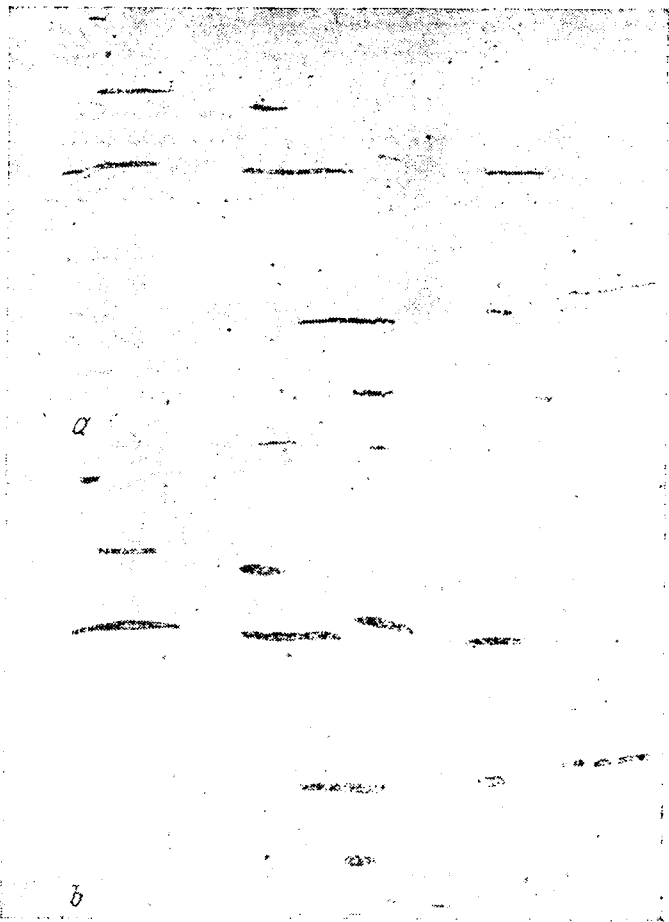


Рис. 36. Влияние качества изготовления шлифа на выкрашивание шлаков (Вилелла)

териала. Шлифы из немагнитного материала (цветные сплавы, немагнитные сорта стали и чугуна) зажимаются в специальные железные (магнитные) зажимы. Для того чтобы шлифы не увлекались вращением диска, они поддерживаются специально изогнутой пластинкой, укрепленной над вращающимся диском.

Эта пластинка в свою очередь совершает легкое колебательное движение вокруг точки *f*. Указанное движение необходимо для того, чтобы плоскость шлифа могла приходить в соприкосновение с разными местами круга. Это движение осуществляется помощью продольной рейки *b*, которая получает возвратно-поступательное движение от кривошипа *c*.

Вместо шлифовки на наждачных и крокусных бумагах различной зернистости в последнее время стала широко применяться шли-

фовка на поверхностноактивных пастах ГОИ (разработанных в Государственном оптическом институте). Эти пасты, изобретенные акад. И. В. Гребенщиковым, производят одновременно абразивное и химическое действие. При шлифовке пастами ГОИ, в результате их химического действия, на поверхности шлифа образуется тончайшая пленка сернистых и окисных соединений металла, которая немедленно разрушается в результате абразивного действия паст. Эти пасты состоят из окиси хрома, силикагеля, стеарина, керосина, а в тонких пастах, предназначенных для последних операций шлифовки, и стеаринового масла¹.

Для получения вполне удовлетворительного качества шлифа при шлифовке его пастами ГОИ достаточно иметь три сорта паст: грубую пасту с зернистостью 30—40 μ , среднюю пасту с зернистостью 10—20 μ и тонкую пасту с зернистостью 1—5 μ .

Шлифовка пастами ГОИ производится следующим образом. Плоскую хорошо отполированную стеклянную плиту увлажняют небольшим количеством керосина, протирают сухой тряпкой, чтобы стекло было лишь слегка влажным, и равномерно наносят небольшой слой пасты. После этого производят шлифовку так же, как и на обычной наждачной бумаге.

При переходе на шлифовку на средней пасте шлиф необходимо промыть в керосине и тщательно обтереть чистой тряпочкой. После окончания шлифовки на тонкой пасте производится обычным порядком полировка. Как и при шлифовке на бумаге, залог успеха в получении шлифа высокого качества состоит в соблюдении педантичной чистоты и аккуратности. В частности, для каждой из трех паст рекомендуется иметь специальную стеклянную плиту.

Способ приготовления трех стеклянных плит по методу трех поверхностей описан в статье В. Я. Кизельштейна² и в статье И. А. Лапушкина³. Вместо шлифовки на стеклянных плитах можно поступить так, как это описано в статье В. П. Шелемина⁴, а именно: натянуть или наклеить на диск шлифовального станка ватманскую бумагу, слегка смоченную керосином. Бумагу нужно легко натереть пастой и производить шлифовку обычным способом. При шлифовке на тонкой пасте вместо бумаги рекомендуется применять сукно, слегка увлажненное керосином и натертое пастой.

Шлифовка при помощи паст ГОИ имеет ряд преимуществ перед шлифовкой на бумаге: во-первых, отпадает надобность в получении тонких сортов крокусной бумаги, являющейся до настоящего времени импортной, а во-вторых, значительно ускоряется процесс шлифовки.

¹ Способ приготовления паст ГОИ описан в книге С. В. Несмелова, Т. Н. Крыловой и В. П. Лаврова, Руководство рабочим к пользованию пастами ГОИ для полировки закаленной стали, Л., 1934, под ред. акад. И. В. Гребенщикова.

² Заводская лаборатория, 1936, 3.

³ Авиапромышленность, 1938, 12.

⁴ Заводская лаборатория, 1938, 8—9.

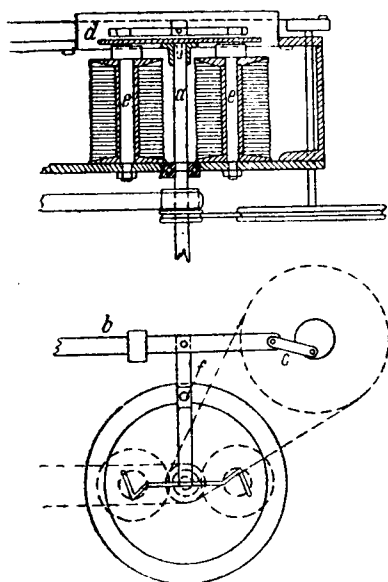


Рис. 37. Схема механизированного шлифовального или полировального станка

Из новейших способов полировки обращает на себя внимание электролитическая полировка, не нашедшая, правда, еще распространения в советских лабораториях¹, но заслуживающая всемерного развития, так как позволяет механизировать утомительную и трудоемкую операцию полировки. Способ этот, изобретенный Жаке и описанный в целом ряде статей в зарубежных журналах², состоит в том, что шлиф, прошедший операцию шлифовки и полностью подготовленный к полировке, делают анодом электролитической ванны, катодом в которой служит пластинка из железа или алюминия (рис. 38). Через электролит пропускается ток различной анодной плотности (для железа и стали, например, 0,6—0,9 А/дм²), при питании от сети постоянного тока через реостат. Электролитом служат растворы, указанные в табл. 2, выбор которых определяется природой полируемого сплава. Расстояние между анодом и катодом обычно составляет около 20 мм. Время полировки — 5—10 мин.

Сущность электролитической полировки состоит в том, что так как шлифованная поверхность представляет некоторый шероховатый рельеф с выступами и впадинами, то длина пути от катода до анода будет различной в различных точках шлифа, а следовательно, различным будет и сопротивление электролита. Поэтому ток пойдет вначале через выступающие участки поверхности микрошлифа, и они в первую очередь подвергнутся электролитическому растворению, что как раз и приводит к нивелированию микрорельефа шлифа, т. е. получению идеальной плоскости.

Хотя в настоящее время способ электролитической полировки имеет ограниченное применение (он не применим к серому чугуну и большинству многофазных сплавов), преимущества его перед обычной полировкой совершенно очевидны. Помимо уже указанной возможности механизировать утомительный и трудоемкий процесс полировки, электролитическая полировка позволяет сохранить в целостности (т. е. невыкрошившимися) все шлаковые и неметаллические включения, не вызывает пластической деформации поверхностных слоев шлифа, иногда искажающей структуру, гарантирует от случайных рисок и царапин, часто получающихся при недостаточно тщательной полировке вследствие попадания зерен наждака и пыли на полировальное сукно.

В результате описанных операций изготовления шлифа предназначенная для изучения микроструктуры плоскость оказывается совершенно зеркальной (кроме шлифов очень мягких металлов и сплавов, как свинец и его сплавы). Если рассматривать такую зеркальную поверхность под микроскопом, то, за небольшими исключениями, о которых будет сказано ниже, мы ничего на таком шлифе не увидим, кроме блестящей светлой поверхности. Никакой структуры металла или сплава на таком шлифе нам

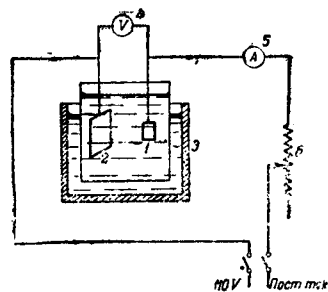


Рис. 38. Схема электролитической полировки: 1 — шлиф; 2 — катод; 3 — охлаждающая ванна; 4 — вольтметр; 5 — миллиамперметр; 6 — реостат на 600 ом

¹ Способ электролитической полировки в настоящее время разрабатывается в Центральном институте по обработке цветных металлов.

² См. например, P. A. Jacquet, *Revue de Métallurgie*, 1838, 35, № 2—4; P. A. Jacquet, *Technique Moderne*, 1939, 15 авг.; P. A. Jacquet, *Métaux et Corrosion*, 1939, 14, № 170; G. E. Pelissier, H. Markus u. R. F. Mehl, *Metal Progress*, 1940, 37, № 1 (указана и литература); анонимная статья в *Metal Treatment*, 1940, 6, № 21 и др.

Таблица 2

Состав электролитов и анодные плотности тока при электролитической полировке различных металлов и сплавов

(по данным Пелисье, Маркуса и Мела¹)

Металл или сплав	Электролит	Плотность тока А/дм ²	Внешнее напряжение В
Железо, углеродистые и низколегированные стали, белый чугун	185 см ³ хлорной кислоты (1,6) . .	—	—
	765 см ³ ледяной уксусной кислоты .	4—6	50
	50 см ³ воды	—	—
Аустенитные стали	335 см ³ хлорной кислоты (1,6) . . .	6—7	50
	665 см ³ ледяной уксусной кислоты .	—	—
Медь	Ортофосфорная кислота (1,3—1,4) .	0,65—0,75	2
	или пирогосфорная кислота (530 г/л)	1,6—2,0	1,6—2,0
α-латунь	Ортофосфорная кислота (430 г/л) .	13—15	1,9
α-β-латунь	Пирогосфорная кислота (530 г/л) .	9—11	1,9
Кобальт	Ортофосфорная кислота (1,35) . . .	9—11	1,2
Цинк	25% водный раствор едкого кали .	16	6
Алюминий и его сплавы	Хлорная кислота (1,48) + ледяная уксусная кислота (2:7)	3—5	50—100
Олово	194 см ³ хлорной кислоты (1,6) . . .	9—15	—
	806 см ³ ледяной уксусной кислоты .	—	—
Свинец и сплавы свинца с оловом	650—750 см ³ ледяной уксусной кислоты	1—2	—
	350—250 см ³ хлорной кислоты . .	—	—
Алюминиевая бронза	Ортофосфорная кислота (990 г/л) .	1—2	—
Оловянистая бронза, кремнистая бронза, монельметалл, никель	Метиловый спирт (абс.) + концентрированная азотная кислота (2:1) .	1—2	40—50

¹ Metal Progress, 1940, янв.

рассмотреть не удастся. Для того чтобы выявить структуру, необходимо произвести травление шлифа, о чем подробно речь будет идти в следующем параграфе. Заметим, однако, что иногда при известных условиях возможно выявить структуру сплава и при помощи полировки, а именно — при так называемой *полировке в рельеф и травящей полировке*.

Рельефная полировка производится не на обычном сукне или бархате, а на некоторой более или менее упругой среде: например толстом сукне, резиновой пластинке и т. п. Помощью рельефной полировки частицы более твердые споліровываются меньше соседних мяг-

ких частиц. В результате получается микроскопический рельеф, который и создает под микроскопом картину строения сплава.

Травящая полировка состоит в том, что в обычный взболтанный крокус прибавляется некоторое небольшое количество травящего реактива, в результате чего операция полировки сопровождается и травлением.

В качестве такого реактива Гейн рекомендует 10% настойку лакового корня в холодной воде. По прошествии 4 час. раствор отфильтровывается и оставляется для брожения на несколько дней.

Следует, впрочем, заметить, что полировка в рельеф и травящая полировка применяются очень редко и как метод контроля качества металлов и сплавов не имеют почти никакого применения.

в. Травление. Рассматривая под микроскопом хорошо изготовленный нетравленный шлиф, часто на нем можно ничего не увидеть кроме чистого белого поля. Но так бывает в сравнительно редких случаях. Обычно на таком нетравленном шлифе можно видеть черные и темные линии (некоторые из них совершенно черные), точки и пятна. Если черная полоса представляет собою совершенно правильную геометрическую линию (рис. 39), то это — царапина, оставшаяся от шлифовки или случайно получившаяся при полировке. Если количество таких царапин велико, то шлиф необходимо дополировать или даже перешлифовать; если же их немного (одна-две в поле зрения микроскопа), то они не мешают изучению структуры, и на них можно не обращать внимания. Если черная линия имеет вид извилистой кривой, то ее следует рассмотреть более внимательно, так как она может оказаться со шлаковым включением или трещиной.

Темные пятна часто оказываются шлаковыми включениями. Но при этом отождествлении темных пятен со шлаками следует соблюдать известную осторожность. Дело в том, что часто даже при осторожной полировке (а тем более при небрежной) происходит выкрашивание отдельных частиц металла (хрупких в особенности); на их месте на шлифе окажутся небольшие выбоинки (углубления). Правда, шлаки, как вещества хрупкие, также могут выкрашиваться, и тогда эти темные точки представляют собою не что иное, как участки, в которых ранее были заключены шлаки. Но это, как сказано, может быть далеко не всегда. Кроме того, как показано на рис. 36, истинные размеры шлаков бывают всегда значительно меньше размеров наблюдаемых под микроскопом углублений. Поэтому судить о величине шлаковых включений (а это в известных случаях может иметь значение) по величине получившихся после выкрашивания шлаков выбоин ни в коей мере не рекомендуется. Если, таким образом, вопрос о природе этих темных пятен на шлифе имеет почему-либо известное значение, следует заново отшлифовать шлиф на мелких номерах бумаги и произвести особо тщательную полировку. Уменьшение количества темных пятен на шлифе после такой его переделки с несомненностью укажет на то, что наличие наблюдавшихся пятен есть лишь результат недостаточно хорошо проведенной ранее подготовки шлифа.

Следует иметь в виду, что шлаки всегда имеют какой-либо цвет (серый, темножелтый, коричневый и т. д.) и в большинстве случаев — резкие очертания, а также часто обладают и внутренней структурой (рис. 39).

Помимо царапин и выбоин (являющихся дефектами подготовки шлифа) и шлаков, о которых уже шла речь, на нетравленном шлифе могут быть обнаружены включения графита. Присутствие графита свидетельствует о том, что изучаемый шлиф относится к чугунам. Графит может быть либо в виде продолговатых криволинейных

пластинок (в таком случае это серый чугун), либо в виде округлых скоплений (это будет ковкий чугун или — в очень редких случаях — сталь с так называемым черным изломом). Следует обратить внимание на то, что графит имеет серый цвет (рис. 40); в тех же местах, где при изготовлении шлифа графит выкрошился, наблюдаются черные полости. Поскольку при окрашивании графита может произойти и окрашивание соседних участков металлической массы, мы, так же как и в случае окрашивания шлаков, можем получить преувеличенное представление о толщине графитных пластинок. Поэтому шлифовку и полировку шлифов серого чугуна следует производить крайне осторожно, не допуская по возможности окрашивания.



Рис. 39. Шлаки и царапина от шлифовки на нетравленном шлифе.
× 250

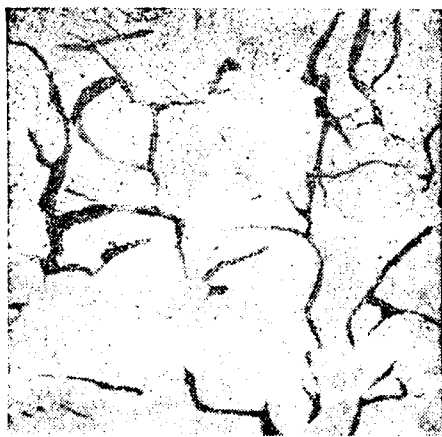


Рис. 40. Графит в сером чугуне.
× 250

Отличить на шлифе графит от шлаковых включений нетрудно. Не говоря уже о том, что присутствие в стали шлаковых включений в таком количестве, в каком обычно наблюдается графит в чугуне, является совершенно невероятным, следует обратить внимание на различную форму шлаковых и графитных выделений. Шлаки имеют либо округлую форму, либо же все они вытянуты в одном направлении, тогда как графит в сером чугуне имеет вид отдельных пластинок без какой-либо определенной ориентации, а скопления графита в ковком чугуне обычно бывают гораздо крупнее самых крупных шлаковых включений.

Таким образом, на нетравленном шлифе можно рассмотреть только, кроме некоторых дефектов самого шлифа, лишь неметаллические (шлаковые) включения и выделения графита. Структура же собственно металла, т. е. составляющих его кристаллов или зерен, на нетравленном шлифе не выявляется. Травление шлифа имеет своей целью проявить кристаллическую структуру металла, т. е. сделать ее отчетливой. Травление состоит в том, что поверхность шлифа подвергается воздействию различных химических реактивов. В результате воздействия реактива выявляются или границы между отдельными зернами (кристаллитами), или же отдельные кристаллиты окрашиваются в различные цвета, или же наконец на кристаллитах в зависимости от ориентации кристалла вытравляются так называемые фигуры травления.

На рис. 41 представлена микрофотография шлифа чистого железа. Отдельные зерна здесь отделены друг от друга тонкими темными

линиями, образующими сетку. Природа этих линий, причина их образования еще не выяснена; существует целый ряд теорий, пытающихся объяснить их сущность.

Некоторые считают, что поверхности отдельных кристаллитов отделены друг от друга тонким аморфным металлическим слоем, на который реактив действует более интенсивно, нежели на металлическую массу зерен. Тамманн¹ считает, что образование этих линий обязано присутствию на границе между отдельными зернами эвтектической смеси данного металла и прочих примесей, которые обычно сопровождают сплав. По его теории, эта эвтектическая смесь более чувствительна к реактивам, а потому и окрашивается сильнее. Кроме того, Тамманн считает, что при обычной температуре прочность этой эвтектической смеси больше, нежели самих зерен, что доказывалось тем, что излом происходит по зернам, а не по границе их. При высоких температурах эвтектическая смесь, как более легкоплавкая, становится менее прочной, и тогда материал разрушается по границам зерен.

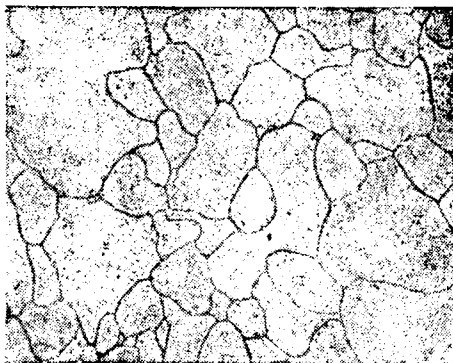


Рис. 41. Кристаллы железа

Существует также следующее весьма простое объяснение появления темной сетки — границы между отдельными кристаллитами. В зависимости от ориентации осей кристаллиты не в одинаковой степени растворяются реактивом, и тогда отраженный от выступов свет (рис. 42) отклоняется в сторону и не попадает в объектив. Естественно, что в этом случае соответствующие места (границы зерен) будут под микроскопом казаться черными.

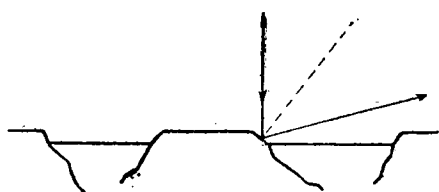


Рис. 42. Отражение света от стыков между кристаллитами на травленном шлифе

Весьма интересную физико-механическую теорию появления при травлении границ между полиэдрами дает И. Чохральский². Он считает, что поверхности соприкосновения кристаллов должны более интенсивно, нежели их основная масса, протравиться в тех металлах, которые в наклепанном состоянии более интенсивно реагируют на реактив. Зерна металлов,

которые в наклепанном состоянии менее реагируют, должны больше протравиться по своей основной массе, нежели по границам. Поверхности же кристаллитов являются наклепанными благодаря силам притяжения отдельных кристаллитов. Поэтому при травлении шлифов таких металлов, как например, железо, которое в наклепанном состоянии обладает большей растворимостью в кислоте, реактив окрашивает границы зерен в темные цвета; такие же металлы, как, например, медь и алюминий, которые в наклепанном состоянии обладают меньшей растворимостью, имеют границу между кристаллитами более светлого оттенка, нежели вся основная масса.

¹ Z. anorg. Chem., Bd. 121, стр. 275. 1922. Lehrbuch der Metallographie, стр. 1—2, 1923.

² Moderne Metallkunde, 1924.

Если ко всем этим объяснениям прибавить теорию аморфного слоя или же теорию капиллярных слоев между кристаллитами, вызывающих окрашивание границ между ними, то приходится прийти к заключению, что природа этого явления весьма сложна, еще далеко не выяснена, и весьма возможно, что такое окрашивание вызывается не одной причиной, а несколькими.

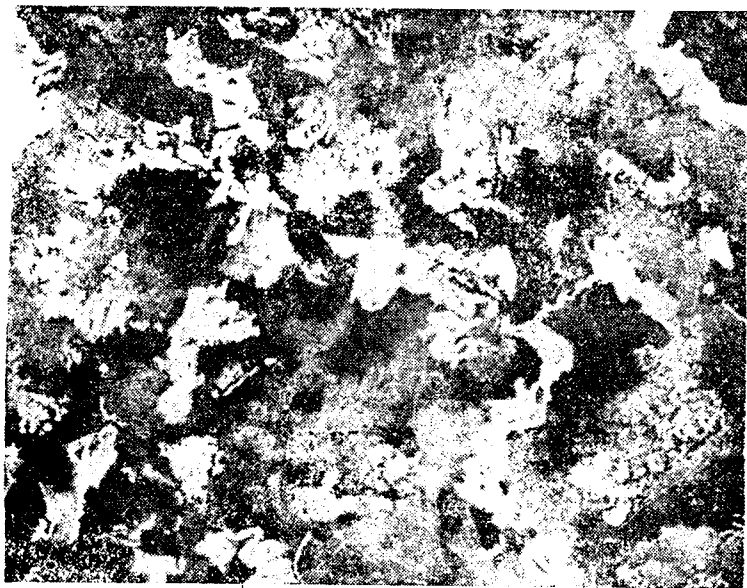


Рис. 43. Шлиф литого алюминия

На рис. 43 представлена микрофотография шлифа литого алюминия, протравленного плавиковой и соляной кислотами. Отдельные зерна здесь выявлены не окраской линий границ между ними, а различной степенью окраски самих зерен. В зависимости от угла, образованного направлением падающих лучей осветителя и осью кристаллита, поверхность последнего отражает различное число лучей

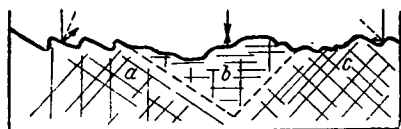


Рис. 44. Превращение плоской поверхности шлифа в микроскопически рельефную в результате травления

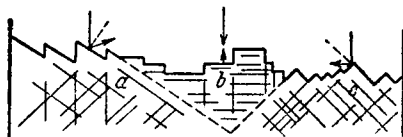


Рис. 45. Превращение плоской поверхности шлифа в микроскопически рельефную в результате травления

в направлении оптической оси. Это явление весьма просто объясняется следующим обстоятельством: при травлении ровная отполированная поверхность превращается в микроскопически рельефную поверхность. Схематично такой шлиф можно себе представить так, как это изображено на рис. 44.

В зависимости от расположения осей кристаллита реактив вызывает тот или иной характер рельефа. Несомненно, поверхность кристаллита *b* отразит больше лучей, нежели поверхность кристаллита *a*;

поэтому кристаллит *b* под микроскопом будет казаться светлее кристаллита *a*, который в свою очередь будет светлее кристаллита *c*. При передвижениях рассматриваемой рельефной поверхности меняется угол между падающими лучами и поверхностями отражения, а потому будет меняться и окраска зерен.

Целый ряд реактивов, действуя на шлиф, растворяет кристаллиты по направлению их плоскостей спайности. Такое действие реактивов отличается от предыдущего тем, что рельеф получает правильное очертание в зависимости от формы и расположения кристаллита. Разрез в перпендикулярном направлении к шлифу таким способом протравленной поверхности схематически изображен на рис. 45.

На рис. 46 изображен шлиф железа с богатым содержанием фосфора, протравленного 10% раствором персульфата аммония.

В случае, когда получаемый сплав состоит из двух или нескольких фаз, действие реактива сводится к более интенсивному растворению или окрашиванию одних фаз по сравнению с другими. Процесс травления можно рассматривать как электрохимическое взаимодействие гальванических пар, составленных из отдельных частичек присутствующих фаз, погруженных в реактив, который является в данном случае электролитом. Таким образом действие реактива на ту или иную структурную составляющую нельзя рассматривать изолированно, без учета электрохимической природы присутствующих одновременно других структурных составляющих сплава. Большую роль играет также и дисперсность фаз. Сильно дисперсные структуры (троостит) травятся чрезвычайно энергично. Теория реактивов в настоящее время очень мало разработана. Громадное большинство реактивов было найдено опытным путем различными экспериментаторами, и полученные ими результаты не всегда повторяются на практике вследствие мелких различий в условиях проведения опыта.

Поэтому общие указания, даваемые при описании того или иного реактива, нельзя ни в коем случае рассматривать как твердо установленные правила, и получение хороших результатов в сильной степени зависит от опытности и искусства экспериментатора; в особенности это следует иметь в виду в отношении продолжительности травления.

Травление обычными реактивами производится так: сначала шлиф тщательно промывают и обезжиривают спиртом или — лучше — бензином; затем наливают в ванночку реактив и, держа шлиф в руке или щипцами, погружают его в реактив полированной стороной книзу на некоторое время, различное в зависимости как от характера самого реактива, так и от природы сплава. Так, естественно, можно поступать с быстродействующими реактивами. Если же реактив действует медленно, то шлиф кладут в ванночку полированной стороной вверх и наливают в ванночку реактив так, чтобы он полностью покрыл поверхность шлифа.

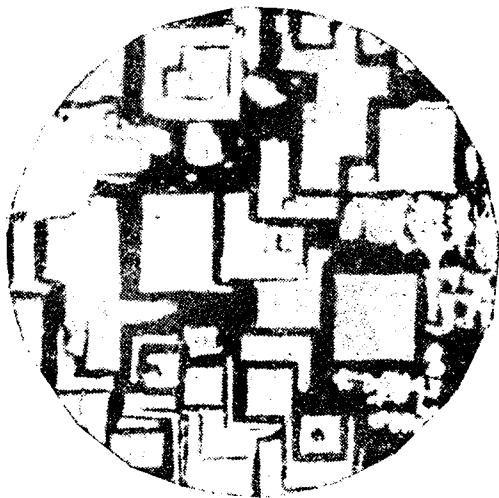


Рис. 46. Микроструктура железа с богатым содержанием фосфора

Вместо погружения шлифа в реактив (речь идет, разумеется, лишь о таких быстродействующих реактивах, которыми травление производится при комнатной температуре) можно поступать и таким образом: смочив кусок ваты реактивом, легко водить ею по полированной поверхности шлифа. Этот способ имеет преимущество перед первым в том отношении, что в этом случае легко можно наблюдать результаты травления, а следовательно, и регулировать длительность его. Для быстродействующих реактивов именно этот способ прежде всего и рекомендуется.

При травлении реактивами, разъедающими кожу (хлорное железо, раствор едкого натра) или пачкающими руки (пикриновая кислота), следует шлиф опускать в реактив при помощи щипцов, а при травлении смоченной в реактиве ватой надевать на руки резиновые перчатки или напальчники.

Окончив травление, следует быстро смыть реактив со шлифа струей воды, обтереть его ватой, смоченной спиртом, и просушить, часто и многократно прикладывая шлиф к фильтровальной бумаге, но отнюдь не передвигая по ней, чтобы случайно не поцарапать шлиф. Такой большой мастер микроанализа, как Вилелла, рекомендует еще гораздо более осторожное обращение со шлифом после травления, а именно: промыть шлиф в горячей воде, чтобы обеспечить быстрое высыхание спирта. Промывку спиртом он рекомендует производить не при помощи ватки, так как, по его утверждению, даже такое ничтожное трение, какое влажная вата производит о шлиф, может вызвать разрушение очень нежных продуктов травления (окисленных или окрашенных пленок на кристаллах некоторых фаз). Окончательную сушку шлифа он рекомендует производить горячим воздухом. Если для изучения особо тонких структур при больших увеличениях и следует воспользоваться рекомендациями Вилеллы, то для обычного микроисследования при малых и средних увеличениях эти меры могут казаться несколько преувеличенными.

Количество известных и применяемых для травления микрошлифов реактивов довольно велико. В табл. 3 приводится список реактивов по стандарту A.S.T.M. E3—36¹ с некоторым добавлением и изменениями.

Необходимые сведения о выборе реактивов для того или иного случая даны в табл. 3. Следует лишь указать относительно реактивов 1 и 2 для травления стали. Вилелла считает их далеко не равноценными, как принято думать. При изучении, например, структуры стали, состоящей из перлита с оторочкой из феррита, с точки зрения отчетливости получаемой структуры преимущества будут на стороне реактива 2 (пикрала), как это ясно следует из сопоставления верхней и нижней микрофотографий рис. 47. На этих микрофотографиях представлено одно и то же место шлифа, но на верхней микрофотографии шлиф протравлен ниталем, а на нижней — пикралем. В силу того что ниталь травит неравномерно, отдельные зерна топкослойного перлита (сорбита) почти не протравливаются, имеют белый цвет и потому их очень легко спутать с ферритом (рис. 47, а).

При изучении микроструктуры закаленной заэвтектоидной стали травление опять-таки лучше производить пикралем (реактив 2), потому что в этом случае нерастворившиеся карбиды будут видны гораздо отчетливее. В этом легко убедиться при сопоставлении верхней и нижней микрофотографий рис. 48, на которых представлено одно и то же место шлифа, но протравленного в одном случае (верхняя

¹ Американское общество по испытанию материалов. Указанный стандарт приведен в книге Book of A. S. T. M. Standards, Part. I, Metals, 1936.

Таблица 3

РЕАКТИВЫ ДЛЯ МИКРОТРАВЛЕНИЯ

А. Реактивы для травления железа, стали и чугуна

1. Реактивы для травления железа, углеродистых и низколегированных сталей и чугуна

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
1	20%-ный раствор азотной кислоты (ниталь или реактив Мартенса)	HNO_3 (конц) Этиловый или метиловый спирт 95%	2 мл 98 "	Употреблять только прозрачную светлую азотную кислоту (уд. вес 1,42); время травления: от нескольких секунд до 1 мин.	Для углеродистой и низколегированной стали, железа и чугуна. Хорошо выявляет границы зерен. Карбиды не травятся
2	50%-ный раствор пикриновой кислоты (пикраль или реактив Ижевского)	Пикриновая кислота. Этиловый или метиловый спирт (95%)	1 г 100 мл	Употреблять только чистую, сухую кристаллическую пикриновую кислоту; время травления: от нескольких секунд до 1 мин. и больше	Как реактив на закаленных сталях выявляются после продолжительного травления; этот реактив выявляет детали структуры лучше, чем реактив 1
3	Соляная и пикриновая кислоты	HCl Пикриновая кислота. Этиловый или метиловый спирт	5 мл 1 г 100 мл	Наилучшие результаты получаются, если мартенсит предварительно отпущен в течение 15 мин. при 200—250°	Для выявления аустенитного зерна в закаленных или отпущенных сталях
4	Электролитическое травление	Двойная хлористая соль меди и аммония. Вода	0,5 г 100 мл	Плотность тока 0,5 А/дм ² . Время травления 3 мин. Многократное травление и полировка	Для выявления фигур травления на зернах феррита

II. Реактивы для травления легированных сталей (аустенитных и быстрорежущих)

5	Хлорное железо	Хлорное железо. HCl (конц.) Вода	5 г 50 мл 100 "	Время травления: около 1 мин.	Для аустенитных никелевых сталей
6	Хромовая кислота	HCl (конц.) 10%, хромовая кислота	25 част. 5—50 "	Действие реактива зависит от количества хромовой кислоты	Для нержавеющей стали 18/8
7	Царская водка	HCl HNO_3	3 част. 1 "	Реактив должен быть выдержан 24 часа перед употреблением	Для нержавеющей сталей и других сплавов с высоким содержанием никеля или кобальта

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
8	Царская водка	HCl/3 час. HNO ₃ /1 "	3 част. 1 "	Реактив должен отстояться перед употреблением в течение 20-30 час.	Для нержавеющей сталей и других сплавов
9	Азотная и уксусная кислоты	Насытить хлорной медью HNO ₃	6 част.		
		Уксусная кислота	4 "		Как реактив 8
10	Смешанные кислоты в глицерине	Глицерин	3 част.	Применять последовательно травление и полировку. Время травления около 30 сек. и больше	Для нержавеющей стали типа 18/8, а также для сплавов железа с хромом, содержащих алюминий, вольфрам, ванадий, марганец, никель и молибден
		HNO ₃ (конц.)	1 "		
		HCl (конц.)	2 "		
		28% уксусная кислота	1 "		
11	Реактив Марбла	Сернокислая медь	4 г	Может быть применен в холодном или горячем состоянии. Время травления около 1 мин.	Для нержавеющей стали, в особенности для выявления карбидов в стали 18/8
		HCl (конц.)	20 мл		
		Вода	20 "		
12	Плавиковая кислота	HF	2 част.	Время травления около 1 мин.	Для железокремнистых сплавов с высоким содержанием кремния
		HNO ₃ Глицерин	1 " 2-4 "		
13	Щавелевая кислота	Щавелевая кислота Вода	10 г 100 мл	Электролитическое травление при напряжении 3-6 V. Шлиф является анодом; катодом служит платина или нержавеющая сталь. Время травления 15-45 сек.	Для выявления выпавших карбидов и границ зерна в нержавеющей сталях
14	Соляная и азотная кислоты	HCl	10 мл	Травить 2-10 мин.	Для выявления зерна в закаленных или закаленных и отпущенных быстрорежущих сталях
		HNO ₃ Метиловый спирт	3 " 100 "		

III. Реактивы для обнаружения ликвации (в частности фосфора) и линий напряжений

15	Реактив Стёда	Хлорная медь		Растворять соли в возможно меньшем количестве горячей воды. Время травления около 1 мин. Применять следует с осторожностью	Для установления ликвации фосфора; медь отлагается сначала на участках, бедных фосфором
		SuCl ₂	1 г		
		Хлористый магний	1 "		
		HCl (конц.)	1 мл		
		Вода	20 "		
		Этиловый спирт	100 "		

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
15	Реактив Фри	HCl (конц.) Вода Хлорная медь (CuCl ₂) Этиловый спирт	40 мл 30 „ 5 г 25 мл	Время травления около 10 сек.	Для установления линий деформации и результатов дисперсионного твердения. Требуется очень внимательного изучения шлифа
17	Нейтральный пикрат натрия	Пикрат натрия Вода	1 г 100 мл	Необходимо тщательно размешать пикрат натрия в спирте для удаления избытка кислоты или щелочи. Время травления в кипящем растворе 20 мин.	Окрашивает вольфрамид железа в быстрорежущих сталях, не травит сложные карбиды; окрашивает фосфид железа в чугунах и не окрашивает цементит
18	Хромовая кислота и травление нагреванием	80% хромовая кислота		Сначала травить пикриновой кислотой (реактив 2), затем настоящим реактивом в течение 1 мин.; наконец, произвести травление окрашиванием, нагревая микрошлиф на плитке, нагретой до 250°, в течение 1 мин.	Для установления разницы между фосфидом железа и цементитом в фосфидной эвтектике в чугунах; фосфид железа окрашивается в темный цвет
19	Иодный раствор	0,1 N иодный раствор Спирт	1 часть 10 „	Время травления 5—15 мин.	Для установления ликвации кремния; участки с высоким содержанием кремния травятся слабее

IV. Реактивы для определения структуры и глубины нитрированного слоя

20	Сернистая медь и хлорная медь	Вода CuSO ₄ CuCl ₂ MgCl HCl (конц.) 95% этиловый спирт	100 мл 1,25 г 2,5 „ 10 „ 2 мл До получения 1000 мл реактива	Следует очень точно взвесить указанные вещества. Растворить в воде и после добавления спирта. Время травления 30 сек. (или менее) до 1 мин. Травление погружением для лучшего травления краев шлифа	Для установления общей глубины, структуры и расположения зон в нитрированных сталях

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
I	Азотная кислота (ниталь)	См. реактив 1			Для установления структуры нитрированного слоя
II	Реактив Марбла	См. реактив 11			Для определения общей толщины нитрированного слоя
V. Реактивы для распознавания карбидов, нитридов и вольфрамовидов					
21	Пикрат натрия, щелочной	Пикриновая кислота Едкий натр Вода	2 г 25 „ 100 мл	Травить в кипящем реактиве в течение 5—10 мин. Еще лучшие результаты дает электролитическое травление при комнатной температуре в течение 40 сек.	Окрашивает цементит, за исключением карбидов, богатых хромом; в вольфрамовистых сталях окрашивает вольфрамовид железа (Fe_4W) и двойной карбид железа и вольфрама (Fe_4W_2); карбид вольфрама не травится; травит сульфиды
22	Реактив Мураками	Красная кровяная соль $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ Едкий кали. Вода	10 г 10 „ 100 мл	Может быть применен в холодном виде, но лучше применять в горячем состоянии. Применять только свежеприготовленный реактив. Время травления 5—10 мин.	Окрашивает карбиды, содержащие хром; карбиды и вольфрамовиды в вольфрамовистых и быстрорежущих сталях. В холодном состоянии окрашивает тройные карбиды ($\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ и $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$) в течение нескольких секунд, вольфрамовид железа Fe_3W_2 в течение нескольких минут; цементит окрашивает слабо
23	Перекись водорода и едкий натр	Перекись водорода 10% водный раствор едкого натрия	10 мл 20 „	Применять только свежеприготовленный реактив; время травления 10—12 мин	В безуглеродистых железобольфрамовистых сплавах окрашивает вольфрамовид железа. В вольфрамовистых сталях окрашивает сложное химическое соединение ($\text{FeW} + \text{W}_2\text{C}$) тем сильнее, чем больше содержание углерода; окрашивает карбиды вольфрама

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
24	Раствор красной кровяной соли	Красная кровяная соль $K_3Fe(CN)_6$ KOH Вода	1—4 г 10 мл	Применять только свежеприготовленный реактив. Время травления в кипящем реактиве 15 мин.	Устанавливает разницу между карбидами и нитридами: цементит чернеет, перлит окрашивается в коричневый цвет, а иглы нитридов не травятся
25	Азотная кислота в нитробензоле	HNO_3 (конц.) Метилловый спирт. 40 капель этого раствора добавить к 50 мл нитробензола	20 мл 80 »	Погрузить шлиф в реактив на 5—15 сек., промыть в спирте, протереть концентрированным NaOH для удаления пленки, промыть в спирте. Применять для реактива только безводные кислоты и спирт	Для выявления цементита, в особенности в кремнистых сталях. Применяется вместо реактива 21

Б. Реактивы для меди и медных сплавов

26	Аммиак—перекись водорода	NH_4OH (уд. вес 0,88) Вода $H_2O_2(3\%)$	5 част. 5 » 2—5 »	Содержание перекиси водорода тем больше, чем выше содержание меди в сплаве. Травление погружением или протиранием (медленно) в течение 1 мин. Желательно применять свежую перекись водорода. Тотчас после травления промыть в струе воды	Для меди и большинства ее сплавов. Пленка (налет) на шлифах алюминиевой бронзы снимается слабым раствором Грарда (реактив 34)
27	Аммиак	Слабые растворы		Погружение	Для латуни и бронзы
28	Аммиак—персульфат аммония	NH_4OH Вода 2,5% раствор $(NH_4)_2S_2O_8$	1 часть 1 » 2 »	Погружение	Для меди и некоторых из ее сплавов
29	Персульфат аммония	$(NH_4)_2S_2O_8$ Вода	10 г 90 мл	Применять в холодном или кипящем виде. Погружение. Время травления 1—2 мин.	Для меди, латуни, оловянистой бронзы, нейзильбера, алюминиевой бронзы
30	Хромовая кислота	Насыщенный водный раствор CrO_3		Погружение или протирание	Для меди, латуни, оловянистой бронзы, нейзильбера

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
31	Хромовая кислота — соляная кислота	10—15% CrO_3 HCl	50 мл 1—2 капли	HCl прибавляют непосредственно перед употреблением. Погружение	Как 30. Окрашивание производится электролитическим травлением или реактивом 34
32	Хромовая кислота — азотная кислота	HNO_3 (конц.) H_2CrO_4 Вода или HNO_3 (конц.) H_2CrO_4 Вода	50 мл 20 „ 30 „ 5 „ 20 „ 75 „	Погружение	Для алюминиевой бронзы. Пленка, получившаяся при полировке, удаляется 10% HF
33	Двойная хлористая соль меди и аммония — аммиак	10% водный раствор двойной хлористой соли меди и аммония и аммиак до получения нейтральной или щелочной реакции		Погружение. Следует тщательно промыть шлиф. Время травления 30—60 сек.	Для двухфазных латуней (окрашивает кристаллы бета в темный цвет), меди и нейзильбера
34	Хлорное железо (реактив Грарда)	1. FeCl_3 HCl Воды или 2. FeCl_3 HCl Вода	19 г 6 мл 100 „ 5 г 10 мл 100 „	Погружение или протирание. Травить легко или производить многократное слабое травление до получения нужных результатов	Для меди, латуни, оловянистой бронзы, алюминиевой бронзы. В латуни окрашивает кристаллы бета. Структура приобретает контрастность, если после травления бихроматом (реактив 36) или другими реактивами (26, 27 и т. д.) применить этот реактив
35	Азотная кислота	Различной концентрации		Погружение или протирание	Глубокое травление
36	Бихромат калия	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ H_2SO_4 (уд. вес 1,84) NaCl (насыщ. раств.) Вода	2 г 8 мл 4 „ 100 „	NaCl может быть заменен 1 каплей HCl на 25 мл реактива, добавленной непосредственно перед употреблением. Погружение	Для меди, сплавов меди с бериллием, марганцем, кремнием, нейзильбера и оловянистой бронзы. После травления этим реактивом следует для получения контрастности протравить хлорным железом (реактив 34)

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
37	Электролитическое травление	FeSO ₄ NaOH H ₂ SO ₄ Вода	30 г 4 „ 100 мл 1900 „	Травление производить при силе тока 0,1 А и напряжении 8—10 В. Продолжительность травления обычно не больше 15 сек. Не протирать поверхность шлифа после травления	или другим контрастным реактивом Для нейзильбера, оловянистой бронзы и других сплавов. В латунях окрашивает кристаллы бета, придает контрастность после травления реактивом 26

В. Реактивы для алюминия и его сплавов

38	Плавиковая кислота	HF (конц.) Вода	0,5 мл 99,5 „	Втирать мягкой материей в течение 15 сек.	Общее действие
39	Едкий натр	NaOH Вода	1 г 99 мл	Втирать в течение 10 сек.; промывать холодной водой	Общее действие
40	Едкий натр	NaOH Вода	10 г 90 мл	Погружение на 5 сек. в реактив, нагретый до 70°; промывать холодной водой	Общее действие
41	Серная кислота	H ₂ SO ₄ (конц.) Вода	20 мл 80 „	Погрузить на 30 сек. в реактив, нагретый до 70°; охладить в холодной воде	Позволяет отличать Al—Cu—Fe—Mn от Al—Fe—Mn или Al—Cu—Fe
42	Серная кислота	H ₂ SO ₄ (конц.) Вода	10 мл 90 „	Погружение в реактив, нагретый до 60—70°	Выявляет FeAl ₃ (окрашивается в темный до черного цвет). CuAl ₂ и NiAl ₃ не травятся
43	Азотная кислота	HNO ₃ (конц.) Вода	25 мл 75 „	Погружение на 40 сек. в реактив, нагретый до 70°; после травления охладить в холодной воде	Позволяет отличать α—Al—Fe—Si от FeAl ₃
44	Реактив Келлера	HF (конц.) HCl (конц.) HNO ₃ (конц.) Вода	1,0 мл 1,5 „ 2,5 „ 95 „	Погружение на 10—20 сек., после травления промыть в струе горячей воды. Если шлиф темнеет, добавить	Для дуралюминия и аналогичных сплавов

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
45	Реактив Виллелла	HF (конц.) HNO ₃ (конц.) Глицерин	2 част. 1 " 3 "	азотной кислоты. Большое количество соляной кислоты ускоряет травление, но уменьшает контрастность Шлиф погрузить в кипящую воду и немедленно после этого в реактив. Теплый шлиф травится быстрее	Реактив общего действия. Хорошо выявляет границы кристаллов
46	Азотнокислое железо	Fe(NO ₃) ₃ Этиловый спирт	50% немного	Время травления 3—5 мин. (при комнатной температуре). Способ приготовления: электролитическое железо растворить в концентрированной азотной кислоте до насыщения. Раствор развести до 50% и добавить немного этилового спирта	Для алюминиевых сплавов, содержащих медь. CuAl ₂ окрашивается в коричневый цвет (от темного до светлого оттенка). NiAl ₃ и FeAl ₄ не окрашиваются

Г. Реактивы для магния и его сплавов

47	Щавелевая кислота	20%-ный водный раствор		Втирать в течение 2—5 сек.	Для литого и деформированного магния и большинства его сплавов в литом состоянии
48	Азотная кислота	20%-ный водный раствор		Втирание	Для некоторых литых сплавов и для выявления наружной корки
49	Яблочная кислота-азотная кислота	Водный раствор яблочной кислоты (50%) и азотной кислоты (20%)		Время травления 10—30 сек.	Для деформированных сплавов
50	Винная кислота	20%-ный водный раствор винной кислоты		Время травления 10—20 сек.	Для деформированного марганцовистомagneзиевого сплава и для литых и термически

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
					обработанных сплавов магния с алюминием, марганцем и цинком

Д. Реактивы для никеля и его сплавов

51	Нормальный реактив	HNO_3 (конц.)	50 мл	Приготавливать ежедневно свежий; применять белую прозрачную азотную кислоту во избежание окрашивания шлифа; травить погружением при комнатной температуре в течение 5—20 сек.	Для никеля, монель-металлаидругих медноникелевых сплавов. Для сплавов, содержащих менее 25% Ni, разбавлять на 25—50% ацетоном
		Ледяная уксусная кислота	50 "		
52	Электролитический—контрастный	Ледяная уксусная кислота	5 мл	Травить в течение 20—60 сек. при напряжении 1,5 V при катоде из платиновой проволоки	Наиболее подходит для изучения величины зерна. Разъедает меньше, чем реактив 51
		Вода	85 "		
		HNO_3	10 "		
53	Цианистый калий	KCN Вода H_2O_2	5 г 95 мл Неск. капель	Погружение	Для нейзильбера с низким содержанием цинка
54	Аммиак—перекись водорода	NH_4OH H_2O_2	85 мл 15 "	Погружение	Для нейзильбера с высоким содержанием цинка

Е. Реактивы для олова и оловянистых сплавов

55	Азотная кислота	HNO_3 Этиловый спирт	2—5 мл 95—98 "	Втирать или погрузить в реактив на несколько минут	Для сплавов олова с кадмием и олова с железом
56	Двуххромовокислый калий	С кислотной реакцией, слабые растворы			Для сплавов олова с кадмием
57	Смесь кислот в глицерине	HNO_3 Уксусная кислота Глицерин	1 часть 1 " 8 "	Погружение на 0,5—10 мин. при 38—42°	Сплавы олова со свинцом

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
58	Смесь азотной и уксусной кислот в глицерине	HNO_3 Уксусная кислота Глицерин	1 часть 3 „ 5 „	Погружение на 0,5—10 мин. при 38—42°	Чистое олово
59	Соляная кислота	A. HCl (конц.) B. HCl Вода	10—20 мл 90—80 „	Погружение на несколько секунд Погружение на 0,5—5 мин.	Для удаления поверхностного искаженного шлифовкой слоя В применяется после A
60	Соляная кислота	HCl Вода	10 мл 90 „	Электролитическое травление при малых плотностях тока	Сплавы олова с железом
61	Хлорное железо	FeCl_3 HCl Вода	10 г 2 мл 95 „	Погружение на 0,5—5 мин. при комнатной температуре	Для баббитов с высоким содержанием олова

Ж. Реактивы для свинца и свинцовых сплавов

62	Молибденовокислый аммоний	85% молибденовая кислота NH_4OH (уд. вес 0,9). Вода Профильтровать и добавить к HNO_3 (уд. вес 1,32)	100 г 140 мл 240 „ 60 „	Последовательно несколько раз втирать реактив и промывать шлиф в проточной воде	Быстро травить. Очень подходит для удаления толстых слоев наклепанного металла
63	Смесь кислот	Ледяная уксусная кислота HNO_3 (конц.) Вода	3 части 4 „ 16 „	Применять только свежеприготовленный реактив. Травить погружением в реактив, подогретый до 40—42°, в течение 4—30 мин. в зависимости от глубины наклепанного слоя. Очищать влажной материей в проточной воде	Дает возможность получать детали структуры для фототрафирования
64	Смесь кислот в глицерине	Ледяная уксусная кислота HNO_3 (конц.) Глицерин	1 часть 1 „ 4 „	Применять только свежеприготовленный реактив. Травление производить при 80°	Применяется для последовательного травления и полировки

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
65	Молибденовокислый аммоний—смесь азотной и уксусной кислот	См. реактивы 62 и 63		Втирать реактив 62 до тех пор, пока структура не будет ясно видна; затем погрузить в реактив 63 на 6 мин.; очистить поверхность микрошлифа протиранием в проточной воде	Обладает преимуществами реактивов 62 и 63
66	Уксусная кислота—перекись водорода	Ледяная уксусная кислота H_2O_2 (90%)	3 части 1 "	Травить в течение 10—30 мин. в зависимости от толщины наклепанного слоя; если нужно—очищать поверхность концентрированной HNO_3	Для сплавов, содержащих до 20% сурьмы
67	Уксусная кислота—перекись водорода	Ледяная уксусная кислота H_2O_2 (30%)	3 части 1 "	Время травления 6—15 сек.	Для сплавов свинца с сурьмой
68	Уксусная кислота—перекись водорода	Ледяная уксусная кислота H_2O_2 (30%)	2 части 1 "	Погружение на 8—15 сек.	Для чистого свинца и свинцовокальциевых сплавов
69	Хлорная кислота	$HClO_4$ Вода	60 мл 40 "	Электролитическое травление; шлиф—анод, платина—катод	Для сплавов, содержащих свыше 20% сурьмы
70	Азотнокислое серебро	$AgNO_3$ Вода	5—10 г 95—90 мл	Втирание	Для антифрикционных сплавов
71	Азотная кислота	HNO_3 (конц.)		Многочисленное последовательное погружение в реактив и проточную воду	Для чистого свинца

3. Реактивы для цинка и цинковых сплавов

72	Реактив Пальмертона	CrO_3 (99,95%) Na_2SO_4 Вода	200 г 15 " 1000 мл	Погружение с легким помешиванием. Последующая промывка в растворе CrO_3 200 г Вода 1000 мл	Общий реактив (для всех сплавов). Уменьшить количество Na_2SO_4 до 7,5 г, если реактив применяется для сплавов, содержащих медь

Продолжение табл. 3

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
73	Соляная кислота	HCl Этиловый спирт	5 мл 95 "	Погружение на 2—3 сек.	Позволяет отличать металл отливок под давлением от металла электролитических покрытий

И. Реактивы для благородных металлов и их сплавов

74	Цианистый калий-персульфат аммония	KCN (50%) (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ (50%)	1 часть 1 "	Время травления 1—2 мин.	Для чистого серебра
75	Цианистый калий-персульфат аммония	KCN (100%) (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ (100%)	1 часть 1 "	Травление можно ускорить добавкой 20% KJ. Время травления 0,5—3 мин. Применять только свежеприготовленный реактив	Для чистого золота
76	Цианистый калий-персульфат аммония	KCN (200%) (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ (200%)	1 часть 1 "	Для ускорения травления можно добавлять 30% KJ	Для палладия и сложных зубных сплавов
77	Хромат	А. HNO ₃ (1:1) K ₂ Cr ₂ O ₇ 2 г Б. H ₂ CrO ₄ 20 " Na ₂ SO ₄ 1,5 " Вода 100 мл.	100 мл 2 г 20 " 1,5 " 100 мл.	Разбавить раствор А до 20 объемов, прибавить равное количество раствора Б. Наносить щеткой из верблюжьей шерсти. Красный осадок хромата серебра не должен приставать к шлифу; если слой осадка пристает, то к раствору нужно добавить раствора А; если осадка не образуется вовсе, то прибавить раствора В	Для сплавов серебра
78	Хромовая кислота-серная кислота	Водный раствор, содержащий по 0,20% H ₂ CrO ₄ и H ₂ SO ₄		Время травления 1 мин.	Для серебряных сплавов
79	Реактив для электролитического травления	10% раствор HF—небольшое количество SnCl ₂			Для сплавов серебра с оловом, содержащих свыше 730/0 серебра

Продолжение табл. 8

№ реактива	Название реактива	Состав реактива		Способ употребления реактива	Область применения и характер действия реактива
		составляющие	количество		
80	Реактив для электролитического травления	Разбавленный раствор HCl и KCN или KCN + KJ			Для золота
81	Иод	50%-ный раствор тинктуры иода в водном растворе KJ		Слой иодистого серебра может оставаться на поверхности сплавов серебра с золотом; этот слой может быть удален раствором KCN	Для сплавов золота
82	Царская водка	Слегка разбавленная		Травить 5 мин. в горячем реактиве	Для чистой платины
83	Царская водка	Концентрированная		Применять в горячем состоянии	Для сплавов платины. Применяется также для сплавов золота, но образует слой хлористых солей, если в сплаве содержится много серебра. Этот слой может быть удален аммиаком или раствором KCN
84	Царская водка	В глицерине		Применять в холодном состоянии	Для сплавов палладия
85	Сернистый калий			применять в горячем состоянии	Для сплавов золота с никелем
86	Расплавленные соли	KOH + 100% KNO ₃ или KHSO ₄		Травление в расплавленных солях	Для платины, если царская водка (реактив 82) оказывается недействительной
87	Азотная кислота	Концентрированная		Применять в горячем состоянии	Для палладия
88	Аммиак - перекись водорода	NH ₄ OH H ₂ O ₂	5 част. 1-3 "	Погружение	Для серебра и серебрянопалладиевых сплавов

микрофотография) ниталем, а в другом (нижняя микрофотография) пикралем.

Вилелла рекомендует применять ниталь (реактив 1) в следующих случаях:

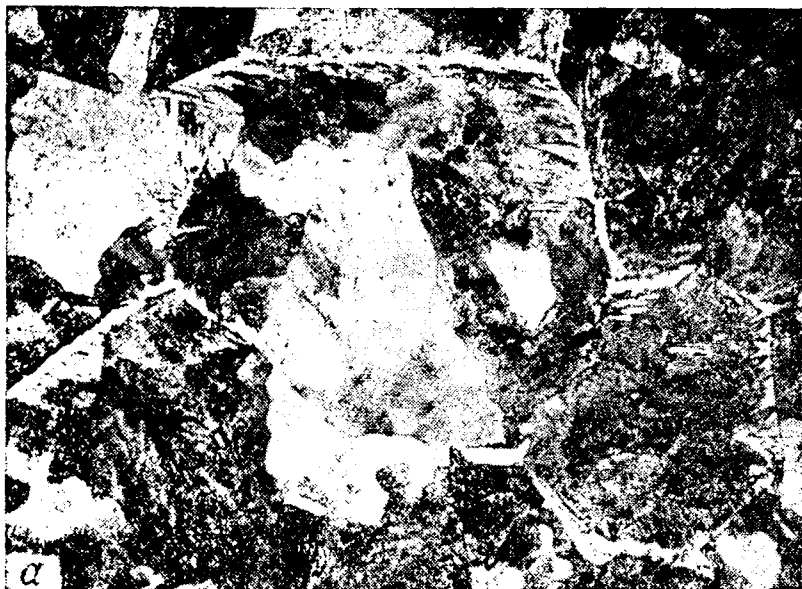


Рис. 47. Сравнение травления доэвтектоидной стали ниталем (а) и пикралем (б) (Вилелла). $\times 500$.

1) для выявления ферритного зерна в малоуглеродистых сталях;
2) с целью получения максимальной контрастности (при изучении структуры при малых увеличениях) между перлитом и сеткой цемента (или феррита);

3) для установления границ зерен феррита в структуре неполно закаленной доэвтектоидной стали (мартенсит + феррит);

4) для травления структуры низколегированных сталей перлитного класса, на которые не действует пикраль.

Пикраль (реактив 2) Вилелла рекомендует применять в следующих случаях:

1) для выявления деталей структуры перлита, мартенсита, отпущенного мартенсита и бейнита;

2) для обнаружения нерастворенных карбидов в мартенсите;

3) для установления разницы в окраске между ферритом, мартенситом и карбидами;

4) с целью отличить бейнит от троостита и сорбита;

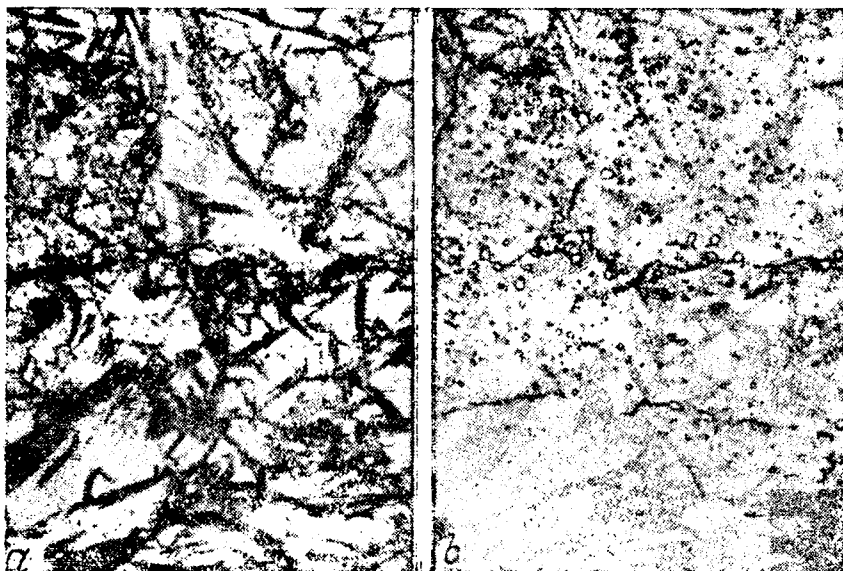


Рис. 48. Сравнение травления закаленной заэвтектоидной стали ниталем (а) и пикралем (б)

5) для выявления карбидов (структурно свободного цементита) по границам зерен малоуглеродистой стали.

Кроме обычного способа травления, описанного выше, в отдельных случаях применяют электролитическое травление. В частности электролитическое травление дает значительно лучшие результаты при изучении микроструктуры нержавеющей стали¹. Преимущество электролитического травления нержавеющей стали перед обычным травлением состоит в том, что при электролитическом травлении структура выявляется значительно равномернее, тогда как при обычном травлении происходит перетравливание одних структурных составляющих при недостаточном протравливании других. Травление производится следующим образом. В ванну с электролитом (10% водный раствор щавелевой кислоты²) помещается в качестве анода полированный шлиф. Катодом служит полированная пластинка из нержа-

¹ См. статьи Н. А. Соловьевой и А. Г. Амелиной, Заводская лаборатория, 1938, № 6 и Van den Bosch и Vilella. *Revue de Métallurgie*, 1936, 11—12.

² Можно применять также 10% раствор хромовой кислоты, который, однако, действует значительно медленнее.

веющей стали. Расстояние между анодом и катодом составляет обычно 25 мм. Ток получается от аккумулятора или от четырех соединенных последовательно сухих элементов, что дает напряжение в 6V. По данным Н. А. Соловьевой и А. Г. Амелиной, продолжительность травления на карбиды составляет всего 5—10 сек., для выявления двухфазности — 10—40 сек.; для получения четких границ зерен применяется 2—3-кратное травление с промежуточной переполіровкой шліфа.

Электролитический способ находит¹ применение при травлении шлифов из цветных сплавов, например оловянистых и кремнистых бронз, особенно в тех случаях, когда травление обычными реактивами не может отчетливо выявить дендритную структуру. Травление производится так же, как и в предыдущем случае; в качестве электролита могут служить растворы: 1) 10% водный раствор двуххромовокислого калия + 5 капель серной кислоты на 200 мл раствора; 2) 15% водный раствор хромовой кислоты + 5 капель серной кислоты на 200 мл раствора. Шлиф, зажатый в никелевые щипцы, является анодом, а катодом служит угольный электрод. Травление продолжается 30—60 сек.

Упомянем, наконец, о травлении при помощи окисления при нагревании. В некоторых случаях проявление структуры успешно производится путем нагревания шліфа. Для этого образец, положенный на подставку шлифом кверху, подогревается снизу пламенем (например бунзеновской горелкой). Появляющиеся при этом цвета побежалости с повышением температуры чередуются в определенном порядке, а именно — начиная, примерно, с 220° появляется желтоватый цвет, который в порядке очереди сменяется коричневатым, коричнево-фиолетовым, фиолетовым, индиго, синим, голубым; наконец, при температуре 350° цвета побежалости исчезают. Указанные температуры имеют весьма приближенные значения.

Проявление структуры при помощи нагревания основано на том, что отдельные структурные составляющие различно реагируют на нагревание, а именно — одни окисляются при нагреве быстрее других и потому различно окрашиваются. По достижении определенного цвета побежалости шлиф охлаждают в ртути.

Хорошие результаты проявления структуры методом нагревания дают чугуны, сталь, сплавы медь — олово, медь — фосфор и некоторые другие.

Предварительное травление обычными реактивами иногда бывает полезно. Так, например, при отпуске шліфа железа с хорошо выявленными предварительным травлением зернами феррита отдельные кристаллиты в зависимости от их ориентации окрашиваются в различные цвета побежалости.

г. Методика изучения микроструктуры. Изучение структуры сплавов под микроскопом имеет целый ряд мелких, но существенных особенностей, с которыми и нужно прежде всего хорошо ознакомиться, чтобы изучение структуры было наиболее продуктивным.

Изучение микроструктуры любого металла или сплава надо, как правило, производить в следующем порядке.

1. Установить нетравленный шлиф на предметном столике микроскопа полированной стороной вверх (если микроскоп вертикального типа) или вниз (если микроскоп горизонтального типа). При изучении шліфа на горизонтальном микроскопе плоскость шліфа (если он не кривой и не очень малых размеров) всегда оказывается перпенди-

¹ А. В. Ангелов и Е. В. Домбровская. Заводская лаборатория, 1939, № 2.

кулярной оптической оси объектива. Если шлиф мал или такой формы, что он опрокидывается, следует применять специальные держатели, например втулку, в отверстие которой вставляется шлиф и зажимается винтом, проходящим через стенку втулки, или простой магнит, который устанавливается на предметный столик микроскопа и к которому прижимаются шлифы из магнитных сплавов.

При изучении шлифа на вертикальном микроскопе следует прежде всего придать плоскости шлифа горизонтальное положение (вернее, перпендикулярное оптической оси микроскопа). Это достигается обычно при помощи так называемого пластилина (пластичной, почти не отвердевающей с течением времени замазки). Пластилин необходим потому, что если поставить шлиф непосредственно на предметный столик, то в силу того, что опорная плоскость шлифа и его полированная плоскость между собою не параллельны, шлиф может оказаться расположенным не перпендикулярно к оптической оси микроскопа. В этом случае, естественно, изображение структуры не будет находиться в фокусе. Ставя же шлиф не непосредственно на предметный столик, а на пластилин, лежащий на предметном столике, имеется возможность установить плоскость шлифа горизонтально. Затем, подведя объектив (с широкой фронтальной линзой) к шлифу почти вплотную, добиваются того, чтобы плоскость фронтальной линзы была параллельна плоскости шлифа, что легко установить, наблюдая за узким просветом между ними. Совершенно недопустимы как в этом, так и в других случаях работы с микроскопом никакие сильные нажатия (например объектива на шлиф) или иные виды физических воздействий на приборы.

При установке шлифа рекомендуется располагать его так, чтобы под (или над) объективом находилась центральная часть шлифа (так как края шлифа могут быть «завалены»).

2. Установить подбором соответствующих объектива и окуляра увеличение порядка не более 200—250. Следует отметить, что часто наблюдаемое у начинающих стремление с самого начала изучать шлиф при больших увеличениях — глубоко ошибочно. Совершенно ложным является мнение, что чем больше увеличение, тем лучше будет изучена структура. В очень многих случаях оказывается как раз наоборот. На первый взгляд утверждение, что при большом увеличении могут быть не замечены многие и существенные особенности структуры, может показаться странным, но тем не менее оно оправдывается в очень многих случаях. Такие явления в структуре, как строчечность, перегрев, дендритное строение и т. п. могут быть легко обнаружены и учтены лишь при малых увеличениях. На рис. 49 представлена структура стали, недогретой при отжиге. Микрофотография сделана при увеличении 100. В структуре, помимо нормальных для отожженной стали зерен, можно легко увидеть еще крупную ферритную сетку. Нетрудно представить, что при большом увеличении (например 500) эту ферритную сетку можно было бы и не различить.

3. Включить свет в осветитель микроскопа; если пользуются дуговой лампой, то проверить, что дуга включена через реостат.

4. Установить шлиф «на фокус». Установка «на фокус» производится следующим образом: начинают изменять при помощи винта для грубой наводки расстояние, уменьшая или увеличивая его, между объективом и шлифом до тех пор, пока в поле зрения окуляра не будет ясно видна структура шлифа. В вертикальных микроскопах изменять расстояние между объективом и шлифом можно либо поднимая или опуская тубус, либо же поднимая или опуская предметный

столик. Последнее предпочтительнее потому, что, спуская или поднимая тубус, мы можем вывести иллюминатор микроскопа из светового пучка осветителя, если только осветитель не соединен жестко с тубусом.

После того, как изображение структуры попало в фокус, для получения четкости и резкости рисунка следует произвести «тонкую» фокусировку вращением микрометрического винта, находящегося обычно рядом с винтом для грубой наводки.

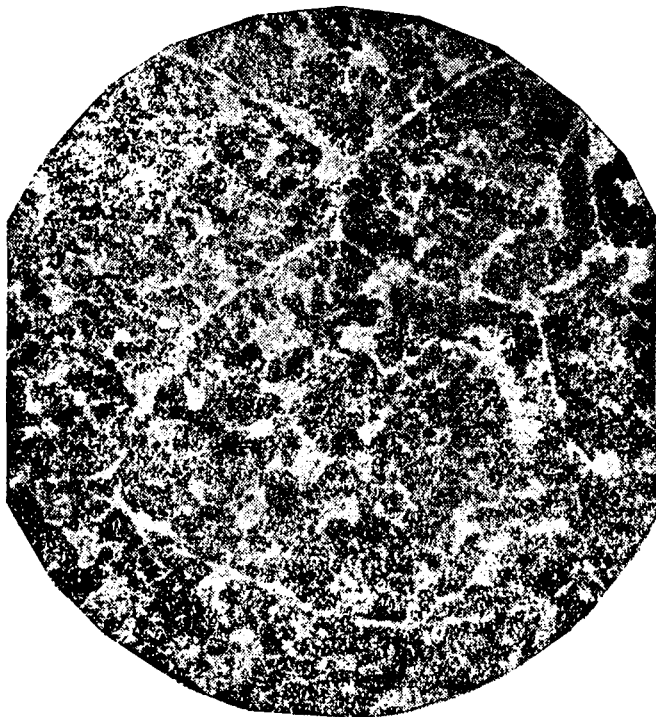


Рис. 49. Недогрев крупнозернистой дозвектоидной стали при отжиге. $\times 100$

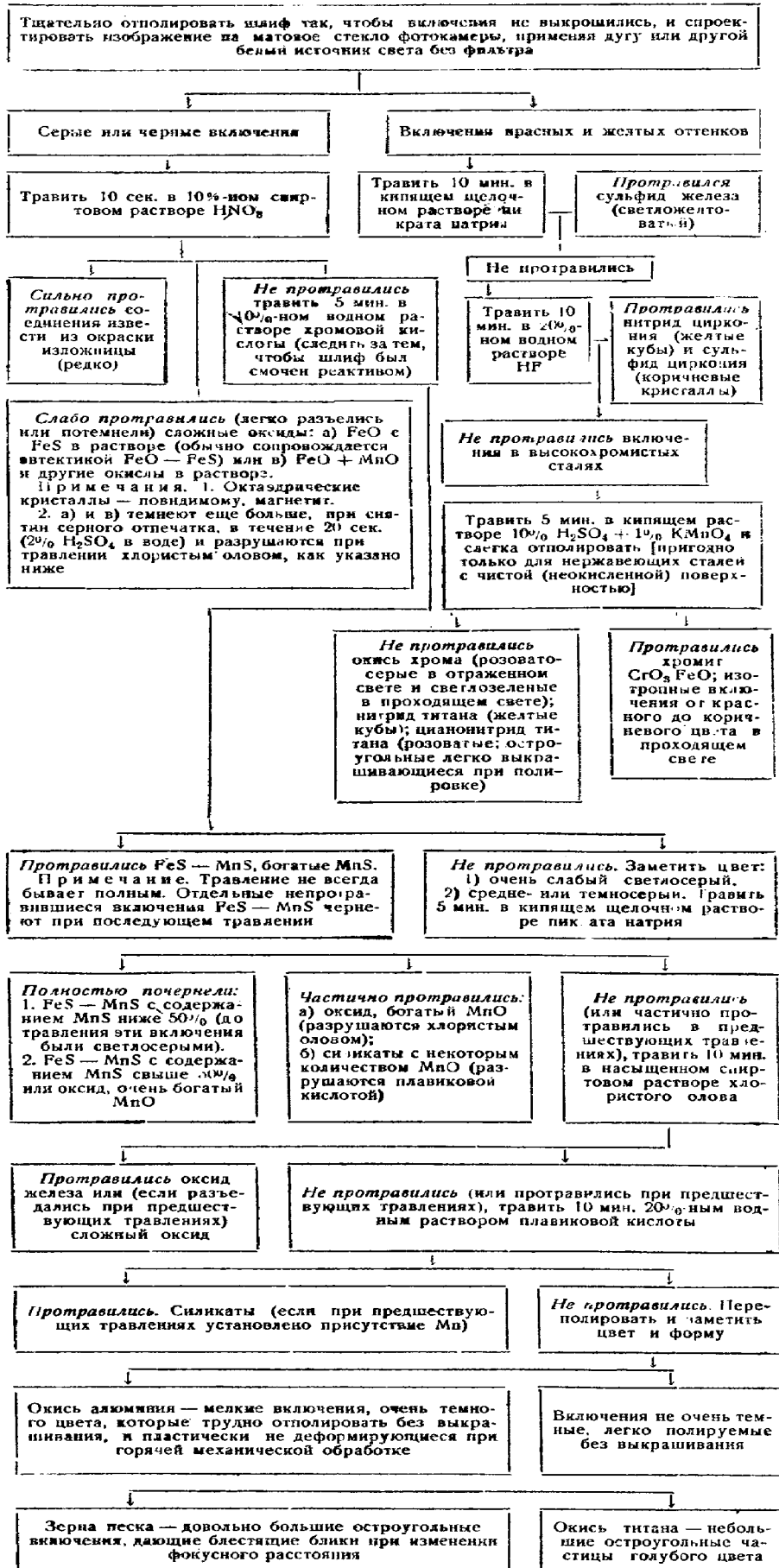
Для ускорения наводки на фокус следует иметь в виду, что чем большее увеличение дает объектив (чем меньше диаметр его фронтальной линзы), тем меньше его фокусное расстояние и, следовательно, тем ближе надо подводить объектив к шлифу.

Установку «на фокус» следует производить, медленно спуская или поднимая тубус (или предметный столик), так как иначе легко можно «проскочить» через фокус. Это в особенности относится к большим увеличениям.

Если при приближении объектива к шлифу или удалении его не удастся увидеть изображения структуры, необходимо проверить и обеспечить следующее:

- а) направить свет от осветителя в отверстие иллюминатора;
- б) полностью открыть диафрагмы;
- в) плоскость шлифа расположить горизонтально, т. е. перпендикулярно оптической оси микроскопа;
- г) добиться совпадения оси объектива (при револьверной головке) с осью тубуса;
- д) направить световой «зайчик» на шлиф, что достигается изменением угла между иллюминатором и осью тубуса;

Метод распознавания природы неметаллических включений в железе и стали
(по Кемпбеллу, Комстоку, Уорриану, Шейлю и Вайеру)



е) добиться, чтобы свет не перехватывался призмой или зеркалом и не направлялся на матовое стекло фотокамеры (это относится лишь к горизонтальным микроскопам);

ж) добиться, чтобы тубус окуляра (в горизонтальных микроскопах) был вдвинут в свое гнездо доотказа.

Если изображение удается получить, но оно оказывается мутным, необходимо осторожно протереть чистой сухой ваткой стекла объектива и окуляра (промывание спиртом недопустимо, так как спирт растворяет клей, которым приклеивают линзы объектива и окуляра к их оправе). Следует избегать касаться пальцами стекол объектива, окуляра и иллюминатора, так как они при этом покрываются жировым налетом.

5. Вначале нужно внимательно рассмотреть нетравленный шлиф. Изучение нетравленного шлифа даст возможность, во-первых, оценить качество изготовления шлифа, а во-вторых, позволит произвести изучение шлаковых и неметаллических включений и графита. Почему изучение шлаковых включений и графита рекомендуется производить на нетравленных шлифах? Несомненно, что шлаковые и графитные включения будут видимы и на травленном шлифе. Однако на травленном шлифе их структуры будут «теряться» среди подробностей структуры металла, тем более, что количество шлаковых включений и их величина обычно бывают небольшими, тогда как на нетравленном шлифе исследователю легче все свое внимание фиксировать именно на них.

В большинстве случаев количество шлаковых включений невелико и поэтому совершенно достаточно примерно оценить их количество, величину и наличие или, наоборот, отсутствие определенной ориентации в их расположении. Но в отдельных случаях необходимо более точно установить природу шлаковых включений, а при массовом контроле изломанной продукции (особенно на сталеплавильных заводах) оценить количественно также общее содержание и среднюю величину включений.

Методика определения природы неметаллических (шлаковых) включений является очень сложной и трудоемкой задачей. В табл. 4 приведена методика микроскопического определения природы неметаллических включений в стали, разработанная Кемпбеллом и Комстоком и усовершенствованная Уорманом, Шейлем и Байерц¹.

Для изучения характера неметаллических включений применяются также следующие методы.

Серный отпечаток. К шлифу прикладывается на 20 сек. фотобумага, смоченная 2% водным раствором H_2SO_4 . При этом испытании:

а) включения $FeS - MnS$ полностью растворяются;

б) включения FeO , содержащие в растворе FeS и окислы других металлов, растворяются частично (точечное разъедание);

в) сульфид железа (светложелтые включения), чистая окись железа (серые включения) и силикаты (темносерые) не изменяются.

Испытание по Матвееву. При этом испытании:

а) травление в разбавленном растворе винной кислоты не действует на кислородные включения и силикаты и окрашивает $MnS - FeS$ — легко и FeS — сильно;

б) при нагреве шлифа в водороде до 870° кислородные включения восстанавливаются, а силикаты и сульфиды остаются без изменения;

¹ Metal Progress, 1939, окт., т. 36, № 4, стр. 444.

в) после нагрева в водороде шлиф необходимо переполлировать и протравить разбавленным спиртовым раствором FeCl_3 . Если при этом травлении восстановленные кислородные включения сильно окрасятся, — это будет означать, что они содержали марганец.

Испытание по Роллю на сульфиды. Непродолжительное травление 1% спиртовым раствором пикриновой кислоты; затем травление окислением при нагревании до желтого цвета. Включения FeS окрашиваются в темносиний до краснофиолетового цвет; включения MnS окрашиваются в темносерый до блестящебелого цвет.

Помимо микроскопического способа установления природы неметаллических включений в настоящее время существует еще два, методика которых достаточно разработана: 1) химический, основанный на растворении образцов стали и последующем микроскопическом изучении осадков¹, и 2) применение отраженного поляризованного света².

Что касается оценки величины шлаковых включений и общего их содержания (чем определяется загрязненность стали шлаковыми включениями), то это производится путем сравнения изучаемого шлифа со шкалой стандартных структур. В настоящее время таких шкал существует несколько: 1) шкала шведской фирмы SKF, 2) шкала, разработанная Ассоциацией шведских металлургов JK³, 3) шкала, разработанная лабораторией завода Электросталь⁴, и др. Шкала SKF характеризует лишь сульфидные включения, включения силикатов и карбидную ликвацию. Шкала JK характеризует сульфидные, силикатные, оксидные включения и включения глинозема. Шкала, разработанная лабораторией завода Электросталь, помимо указанных типов включений, характеризует также карбидную ликвацию в инструментальных и шарикополшипниковых сталях. Наиболее совершенной шкалой является последняя шкала (завода Электросталь)⁵.

Шкала JK (рис. 50) состоит из четырех групп схематических изображений включений: А — легко деформируемые включения (сульфиды), В — непластичные включения (Al_2O_3), С — включения промежуточного характера между А и В (силикаты) и D — равноосные включения (оксиды, располагающиеся независимо от типа пластической деформации). В каждой группе имеется 5 изображений, различающихся между собой количеством включений, причем балл 1 относится к случаю минимального количества включений, а балл 5 — к случаю максимального количества включений. Каждому баллу каждой группы соответствует 2 изображения в зависимости от величины включений.

Методика оценки загрязненности стали неметаллическими включениями по JK заключается в следующем. От изделия отрезается проба для продольного шлифа, который обязательно должен захватить край изделия и его середину. Для того чтобы при изготовлении шлифа не происходило выкрашивания неметаллических включений, пробу следует предварительно закалить, а незакаливающиеся малоуглеродистые стали еще и цементировать. Готовый шлиф рекомендуется до изучения слегка протравить. Изображение проектируется

¹ Ю. Т. Лукашевич-Дуванова, Металлург, 1936, № 5.

² S. L. Hoyt и M. A. Sheil, Transactions of A. I. M. E., Iron and Steel Division; M. A. Sheil, M. Bayertz и I. R. Vilella в Metals Handbook of A. S. M., 1939, с. 741.

³ Ternkoutorets Annaler, 1936, 5, и А. Г. Спектор, Заводская лаборатория, 1938, 12.

⁴ И. Н. Голиков и М. И. Виноград, Заводская лаборатория, 1939, 7.

⁵ Привести эту шкалу здесь не представилось возможным, так как в статье ее авторов (см. выше) она дана в уменьшенном и крайне неотчетливом виде.

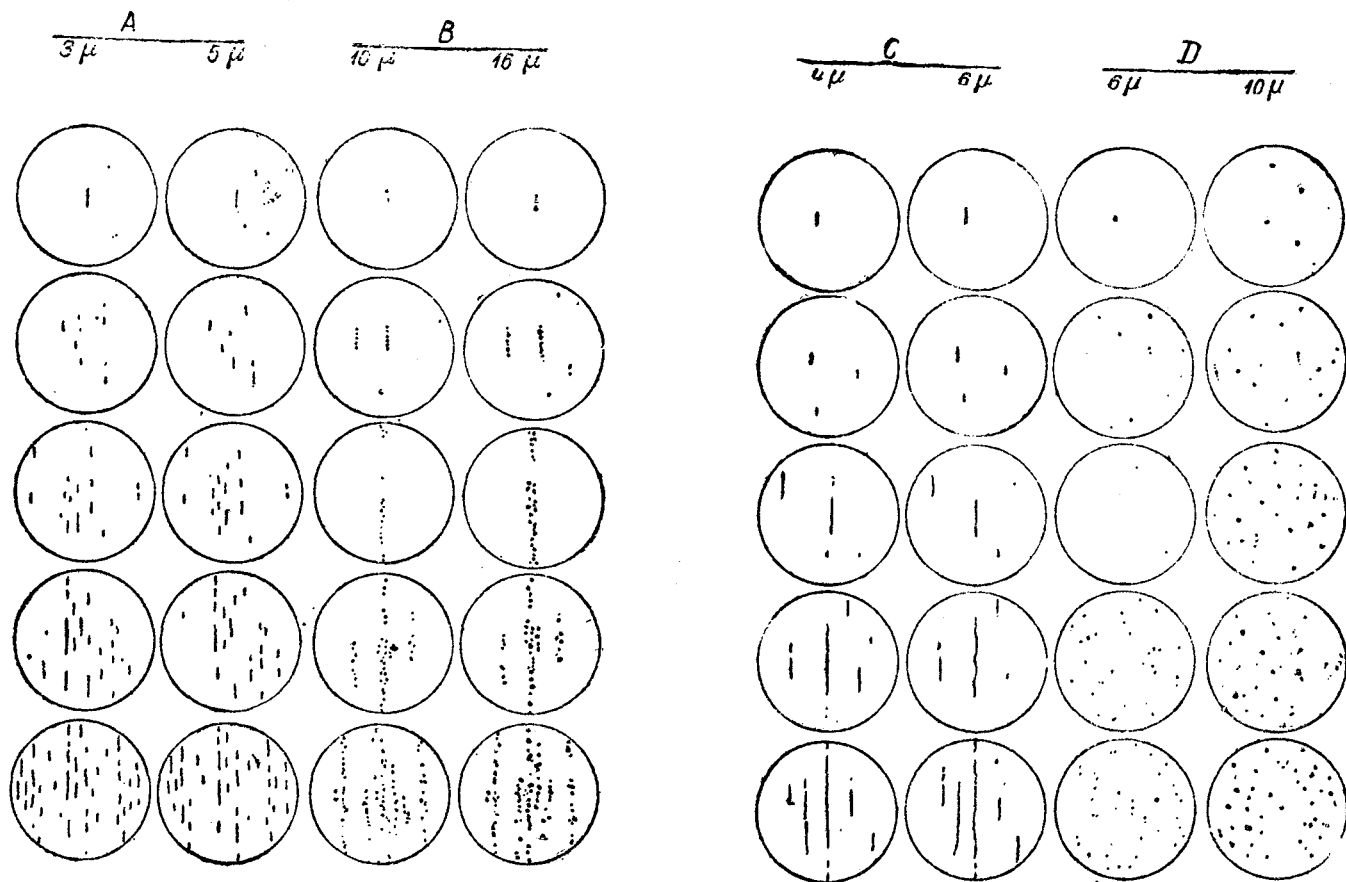


Рис. 50. Шкала JK неметаллических включений в стали. Уменьшена в 4 раза

на матовое стекло фотокамеры микроскопа и рассматривается при увеличении 100 на круговой площади диаметром 0,8 мм. Увеличение допускается также немного отличное от 100, тогда как диаметр истинного поля зрения должен быть равен строго 0,8 мм. Для этого диаметр изображения на матовом стекле должен приводиться (при помощи специальных экранирующих шайб) к размеру

$$0,8 \times n \text{ мм},$$

где n — увеличение микроскопа.

По методу JK оценка загрязненности производится по одному из двух способов; 1) просмотром всего шлифа с выбором участка, наиболее загрязненного каждым типом включений, что, однако, достаточно утомительно и при этом дает случайные, нетипичные результаты; 2) просмотром 100 полей зрения с определением балла загрязненности по каждому полю в отдельности. По полученным данным строят либо кривые частоты, либо определяют средний арифметический балл. Для повышения удельного веса высоких баллов, при суммировании, количество образцов или участков, соответствующих каждому баллу, умножают на дополнительный коэффициент.

Балл	Коэффициент
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16

Шкала завода Электросталь состоит из трех групп: O — оксиды хрупкие, S — сульфиды и оксиды пластичные и K — ледебуритные карбиды. Каждая из первых двух групп делится на две подгруппы: мелкие включения и крупные включения. Количество баллов в каждой группе так же, как в шкале JK, равно 5.

Методика подготовки и изучения шлифа в основном аналогична методу JK. При изучении карбидной ликвиации шлиф травится реактивом Курбатова (4% азотной кислоты в изоамиловом спирте).

Методика же оценки загрязненности стали неметаллическими включениями по способу завода Электросталь сильно разнится от методики JK. В зависимости от типа стали рекомендуются три способа: 1) для обычной высококачественной стали оценка загрязненности производится не менее, чем на 4 образцах, 2) для высококачественной стали с повышенными требованиями оценка загрязненности производится не менее, чем на 10 образцах, 3) для стали особо высокого качества и имеющей специальное назначение, требующее высокой достоверности контроля, оценка загрязненности производится не менее чем на 50 образцах.

Оценка загрязненности производится по среднему баллу, вычисленному как среднее арифметическое из максимальных значений каждого образца.

Графитовые включения в сером чугуна оцениваются по их величине (крупный, мелкий и т. д. графит), по их количеству (много, мало и т. д.), форме включений (прямолинейные пластинки, «завихренные» и т. д.) и по относительному их расположению (включения графита могут быть между собою связаны, разобщены, в виде «розеток» и т. п.). Чтобы исключить всякую неопределенность и субъективность в оценке величины графитовых включений, Махин и Гамильтон¹ предложили шкалу, состоящую из восьми изображений нетрав-

¹ Iron Age, 1937, 19 авг., т. 140, № 8, см. также Н. Ф. Болховитинов. Заводская лаборатория, 1937, № 12.



Рис. 51. Графитовые включения длиной свыше 100 мм.
Балл 1. $\times 100$

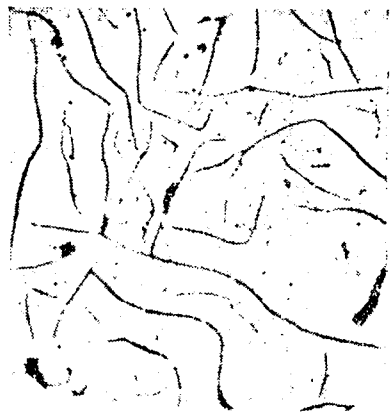


Рис. 52. Графитовые включения длиной 50—100 мм.
Балл 2. $\times 100$



Рис. 53. Графитовые включения длиной 25—50 мм.
Балл 3. $\times 100$

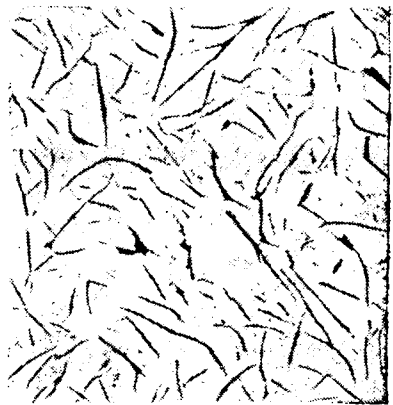


Рис. 54. Графитовые включения длиной 12—25 мм.
Балл 4. $\times 100$

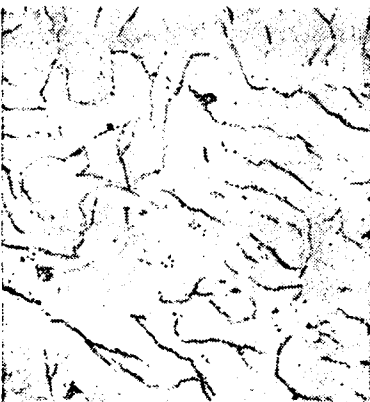


Рис. 55. Графитовые включения длиной 6—12 мм.
Балл 5. $\times 100$

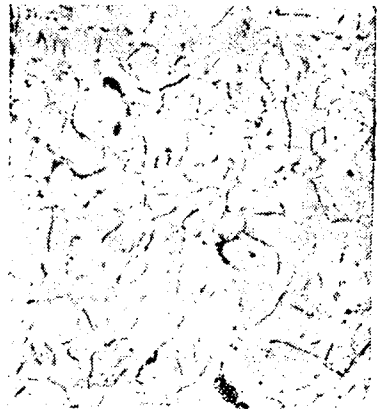


Рис. 56. Графитовые включения длиной 3—6 мм.
Балл 6. $\times 100$

ленных шлифов серого чугуна, сфотографированных при увеличении 100 (рис. 51—58). Графитовые включения длиной (при $\times 100$) свыше 4 дюймов (100 мм) оцениваются баллом 1 (рис. 51); графитовые включения длиной (при $\times 100$) 2—4 дюйма (50—100 мм) оцениваются баллом 2 (рис. 52), и т. д.

Пользуясь такой шкалой, можно не производить описания графитовых включений, а оценивать их величину соответствующим баллом. Точность и простота такого способа характеристики графитовых включений, особенно при массовом контроле, очевидны.

6. Шлиф при изучении как в травленном, так и в нетравленном виде совершенно необходимо просмотреть в нескольких местах, чтобы убедиться, что по всему шлифу наблюдается одна и та же структура или, наоборот, что структура в разных местах шлифа различна. В отдельных случаях это имеет очень большое значение. В прокатанном материале, например, очень частым явлением бывает полосча-



Рис. 57. Графитовые включения длиной 1,5—3 мм. Балл 7. $\times 100$

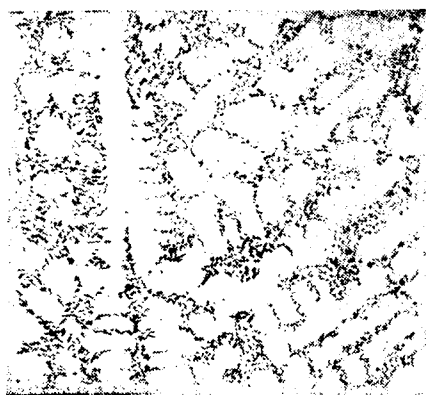


Рис. 58. Графитовые включения длиной менее 1,5 мм. Балл 8. $\times 100$

тая структура, вызванная строчечным расположением шлаковых включений. Наблюдая лишь одно место шлифа, мы можем не заметить этой строчечности. Особенно внимательно нужно просматривать края шлифа, соответствующие поверхности изделия, потому что такие явления, как пережог в сталях, отбел в чугунах и т. д., будут заметны лишь у края шлифа. Эти явления, кстати, могут быть замечены и на нетравленном шлифе: в случае пережога стали мы увидим у периферии шлифа включения окислов железа, а об отбеливании чугуна мы сможем судить по резкому уменьшению количества графитовых включений по направлению к краю шлифа.

Перемещение шлифа по отношению к объективу осуществляется передвижением предметного столика, который в большинстве современных микроскопов может двигаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости. Если же предметный столик не может перемещаться, то шлиф рекомендуется устанавливать при помощи пластилина не непосредственно на столике, а на куске стекла, и при необходимости рассматривать различные точки шлифа стекло вместе со шлифом передвигают по предметному столику.

7. После изучения шлифа в нетравленном состоянии производят травление шлифа. Как производится травление и какие реактивы следует при этом выбирать, — обо всем этом подробно излагалось

выше. Необходимо сделать лишь следующие указания. Решительно не рекомендуется обращаться к первому попавшемуся реактиву, а также применять без надобности несколько различных реактивов. Следует иметь в виду, что многие реактивы имеют ограниченное применение и потому пользование ими до тех пор, пока не будет более или менее детально выяснен вопрос о структуре сплава, не только бесполезно, но даже вредно, так как вместо расшифровки структуры можно сделать ее еще более неясной. Каждому работающему по микроанализу рекомендуется тщательно овладеть техникой микро-травления несколькими основными реактивами и применять остальные лишь в том случае, если травление основными реактивами не дает нужных результатов.

При травлении обычно происходит легкое помутнение шлифа. Если помутнения не наблюдается, то следует рассмотреть шлиф под микроскопом; при этом может оказаться, что структура уже намечается, но имеет нерезкий характер. В последнем случае шлиф следует дополнительно протравить тем же реактивом, пока микроструктура не станет достаточно отчетливой. Может оказаться, что ни первое, ни дополнительное травление не проявляют структуры; тогда естественно сделать предположение, что данный реактив является неподходящим для данного сплава, и следовательно, требуется применить специальный реактив. Так бывает, например, со сталями аустенитного класса: если, не зная, что это аустенитная сталь, травить ее реактивом 1 или 2, т. е. реактивами для сталей перлитного класса, то ни первоначальное, ни дополнительное травление структуры не проявит. В таком случае следует перейти к реактивам 5, 6, 7, 8 и т. д., указанным выше в табл. 3.

При перетравливании структура теряет контрастность, детали ее перестают быть заметными и она принимает неприятный мутный характер. Если шлиф перетравлен, его следует заново отполировать и протравить. Поскольку это связано с потерей времени, при травлении следует соблюдать осторожность: лучше не дотравить (что легко исправить), чем перетравить (что исправить значительно сложнее).

Заметим также, что если шлиф предполагают изучать при больших увеличениях, он должен быть протравлен значительно слабее, чем это требуется для рассматривания при средних и малых увеличениях, так как мелкие детали структуры при сильном травлении пропадают.

Если поверхность шлифа при его изготовлении подверглась значительной пластической деформации (а это в той или иной степени происходит всегда) и травление не сняло этого пластически деформированного слоя, то в микроскопе мы наблюдаем не истинную, а искаженную структуру сплава. Насколько искаженная структура может отличаться от истинной, можно видеть из сопоставления верхней и нижней микрофотографий на рис. 59. Обе эти микрофотографии соответствуют одному и тому же месту шлифа, протравленному к тому же одним и тем же реактивом. Разница между тем получается очень большая. Объясняется эта разница тем, что на верхней микрофотографии травление не сняло пластически деформированного слоя, тогда как нижняя микрофотография соответствует шлифу, на котором этот пластически деформированный слой удален многократно проведенным травлением и переполировкой. Чтобы избежать образования искаженного пластически деформированного слоя, следует не допускать больших давлений при полировке, применять при полировке только чистые незагрязненные абразивы, не допускать

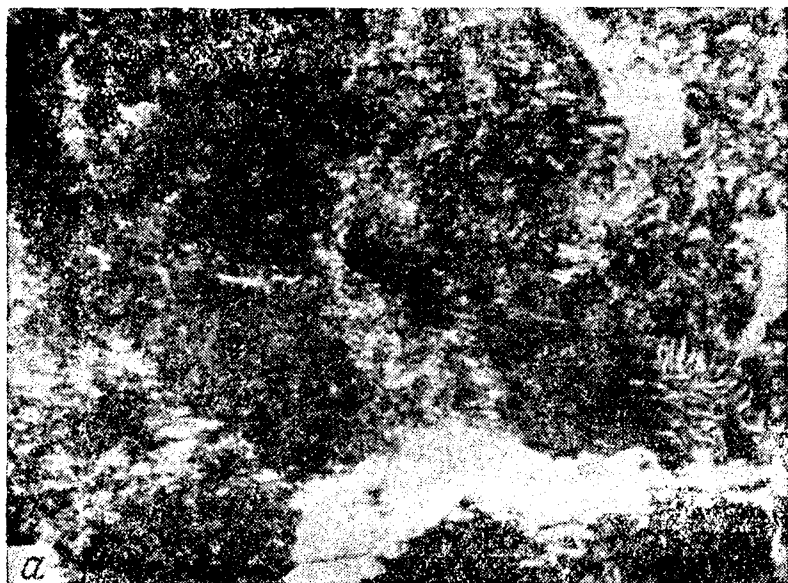


Рис. 59. Искривление микроструктуры доэвтектоидной стали в результате пластической деформации при шлифовке и полировке:

а — травление не сняло пластически деформированного слоя; б — травление сняло этот слой (Виллелла).

полировки на сухом диске. Тем не менее, несмотря на все эти предосторожности, все же небольшой искаженный слой получается почти всегда. Чтобы его устранить, следует шлиф после травления переполлировать, снова протравить, еще раз переполлировать и протравить окончательно. Обычно таких двух переполровок бывает совершенно достаточно. Заметим, кстати, что одно более глубокое травление не может заменить вышеописанной многократной переполровки и травления.

После того как шлиф протравлен, приступают к изучению его микроструктуры. Это наиболее важная и вместе с тем наиболее трудная часть всего микроанализа. При изучении микроструктуры шлифа в травленном состоянии следует придерживаться тех правил, которые были изложены выше, т. е. начинать изучение структуры при небольших увеличениях ($\times 200$ — 250) и просмотреть при этом увеличении по возможности наибольшую часть поверхности шлифа, обращая особое внимание на края шлифа, соответствующие поверхности изделия. Только после того, как структура будет тщательно изучена при малом увеличении, следует (если это требуется) перейти к ее изучению при средних и больших увеличениях ($\times 500$ — 1000). При средних и больших увеличениях выясняются многие детали структуры, которые были неразличимы при малом увеличении: строение перлита, наличие тонкой цементитной сетки в цементованном слое, наличие нерастворенных карбидов в закаленной стали и т. д. С другой стороны, как уже было указано, при больших увеличениях могут быть не замечены многие особенности структуры, имеющие значительную протяженность: дендритное строение, строчечная структура, карбидная ликвация, постепенность перехода от цементованного слоя к нецементованному, и т. д.

Таким образом, и большие и малые увеличения играют огромную роль при изучении микроструктуры, дополняя друг друга, и всякое правильно проводимое микроисследование должно умело сочетать применение и тех и других.

При изучении протравленного шлифа производятся определение и распознавание структурных составляющих сплава. Определение структурных составляющих основано прежде всего на имеющихся у исследователя зрительных представлениях, которые не могут быть заменены никакими даже самыми подробными описаниями. Известную помощь при установлении природы структурных составляющих могут оказать снимки микроструктур, обычно помещаемые в большом количестве во всех курсах металлографии. Существуют также специальные атласы структур¹.

Здесь мы остановимся на некоторых косвенных способах установления природы структурных составляющих путем применения: а) специальных реактивов; б) специальных методов освещения; в) специальных магнитных методов; г) метода микротвердости.

Применение специальных реактивов. Наиболее известным случаем применения специальных реактивов для установления природы структурных составляющих является протравливание шлифа пикратом натрия (реактив 21) для обнаружения цементита в сталях. Травление пикратом натрия применяют в тех случаях, когда либо цементит находится в столь малом количестве, что его можно «проглядеть», либо цементитная сетка может быть смешана с ферритной

¹ См., например: Atlas Metallographicus, Hanemann u. Schrader; Атлас цветных сплавов, под ред. А. М. Бочвар; И. С. Гаев, Металлографический атлас, 1941.



Рис. 60. Заэвтектоидная сталь с 1,22% углерода.
Травление ниталем (реактив 1). (Ганеман и
Шрадер). $\times 1200$



Рис. 61. То же место, что и на рис. 60. Травле-
ние пикратом натрия (реактив 21). (Ганеман и
Шрадер). $\times 1200$

(в сталях, близких к эвтектоидному составу). В таких сомнительных случаях и рекомендуется прибегать к травлению реактивом 21. При травлении пикратом натрия цементит окрашивается в черный цвет, а феррит остается белым. На рис. 60 и 61 представлено одно и то же место шлифа заэвтектоидной стали с 1,22% С. В одном случае (рис. 60) шлиф был протравлен реактивом 1. Если внимательно рассмотреть, то между зернами перлита можно различить тонкую сетку цементита. Но можно также утверждать, что если шлиф перетравить или если рассматривать его не при столь сильном увеличении или же если освещение шлифа недостаточно, то эту цементитную сетку можно и не различить. В то же время травление пикратом натрия



Рис. 62. Мягкая сталь с 0,06% углерода. Травление ниталем (реактив 1). (Ганеман и Шрадер). $\times 1200$



Рис. 63. То же место, что и на рис. 62. Травление пикратом натрия (реактив 21). (Ганеман и Шрадер). $\times 1200$

(рис. 61) окрашивает цементитную сетку в темный цвет и делает ее сильно заметной. На рис. 62 и 63 показан другой пример применения реактива 21 для обнаружения структурно-свободного цементита в мягкой стали.

Другим примером распознавания структурных составляющих травлением специальными реактивами может служить реактив 18, который позволяет установить разницу между фосфидом железа и цементитом в чугунах: фосфид железа окрашивается при этом в темный цвет, а цементит остается светлым.

Распознавание структурных составляющих в алюминиевых сплавах наиболее удачно производится применением специальных реактивов. В табл. 5 указано действие различных реактивов на главные составляющие алюминиевых сплавов (по Келлеру, Вилькоксу и Альтмансбергеру)¹.

Применение специальных методов освещения. Применением специальных методов освещения легко установить, например, наличие цементита в структуре стали. Дело в том, что цементит вследствие более высокой твердости всегда имеет рельеф, т. е. немного выступает над поверхностью шлифа. Чтобы обнаружить этот рельеф, можно поступить так: слегка перетравить шлиф и рассматривать его при большом увеличении, сильно сузив при этом отверстие диафрагмы. Цементитные участки, будучи блестяще белыми

¹ Metal Progress, 1933, апр., т. 23.

Действие различных реактивов на структурные составляющие алюминиевых сплавов

Структурные составляющие	Реактивы для микротравления					
	38	39	41	43	40	44
Кремний (цвет серый)	Очерчен, не травится, светлеет	Очерчен, не травится, светлеет	Не травится, светлеет	Очерчен, не травится, светлеет	Очерчен, не травится, светлеет	Очерчен, не травится, светлеет
Mg_2Si цвет серый с радужными оттенками, голубой налет при окислении)	Блестящеголубой, частично растворяется	Очерчен, цвет не изменяется	Энергично травится, частично разъедается, частично окрашивается в синий цвет	Окрашивается в цвет от коричневого до черного	Очерчен, светлеет	Очерчен, окрашивается в цвет от синего до коричневого
$CuAl_2$ (цвет серый с розовым оттенком)	Естественная розовая окраска частично исчезает, светлый и блестящий, резко очерченный	Очерчен, естественная розовая окраска частично исчезает, светлый и блестящий	Очерчен, естественная розовая окраска частично исчезает, светлый и блестящий	Окрашивается в цвет от коричневого до черного	Травится точками, окрашивается от светло- до темно-коричневого цвета	Очерчен, светлый и блестящий
Mg_2Al_3 ($\alpha = Al - Mg$) (цвет очень бледный, водянистый)	Очерчен, травится, окрашивается в светлосерый цвет с голубым оттенком; черные точки	Не очерчен, не травится, не окрашивается	Травится точками, частично разъедается	Сильно травится, частично окрашивается в серый и голубоватый цвета	Очерчен, не травится, не окрашивается	Резко очерчен, травится точками
$FeAl_3$ (цвет серый с розовым оттенком)	Слегка чернеет; коричневые пятна на первичных кристаллах	Очерчен, слегка чернеет	Сильно травится, разъедается, чернеет	Очерчен, контраст с $Al-Fe-Si$ увеличивается	Очерчен, темнокоричневый	Очерчен, не окрашивается
$\alpha = Al - Fe - Si$ (цвет серый с розоватым оттенком)	Очерчен, не окрашивается	Очерчен, не окрашивается	Очерчен, чернеет, травится	Очерчен, контраст с $FeAl_3$ увеличивается	Травится, чернеет	Резко очерчен, чернеет, шероховатый

Структурные составляющие	Реактивы для микротравления					
	38	39	41	43	40	44
$\beta = \text{Al} - \text{Fe} - \text{Si}$ (цвет светлосерый)	Травится и чернеет	Очерчен, не окрашивается, не травится	Очерчен, слегка чернеет, травится точками	Очерчен, не окрашивается, не травится	Очерчен, слегка чернеет, травится	Очерчен, слегка чернеет, шероховатый
MnAl_7 (Al—Mn) (цвет тусклосерый)	Очерчен, слегка темнеет	Травится, окрашивается в цвет от коричневого до синего, но неравномерно	Очерчен, не окрашивается, не травится	Очерчен, не травится, не окрашивается	Окрашивается в цвет от синего до коричневого	Очерчен, не травится, не окрашивается
NiAl_8 (цвет светлосерый с розовым оттенком)	Очерчен, окрашивается в цвет от синего до коричневого	Очерчен, слегка темнеет, не окрашивается	Очерчен, слегка темнеет, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Окрашивается в цвет от синего до темнокоричневого	Окрашивается в цвет от коричневого до черного
$\text{Al} - \text{Fe} - \text{Mn}$ (цвет светлосерый)	Очерчен, равномерно коричневый, иногда синий	Очерчен, травится точками, часто окрашивается в синий цвет	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Окрашивается в цвет от темнокоричневого до синего	Очерчен, травится, темный
$\text{Al} - \text{Cu} - \text{Ni}$ (цвет серый с розоватым оттенком)	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, легко темнеет, не травится	Очерчен, слегка темнеет, не травится	Окрашивается в черный цвет, частично растворяется	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, на некоторых включениях неравномерное образование пятен
$\alpha = \text{Al} - \text{Fe} - \text{Cu}$ (цвет серый)	Очерчен, чернеет	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, чернеет, травится	Чернеет
$\beta = \text{Al} - \text{Fe} - \text{Cu}$ (цвет серый)	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, слегка окрашивается в темный цвет	Очерчен, не окрашивается, часто некоторые кристаллы в средней части окрашены в черный цвет	Очерчен, темноватый, не травится	Травится точками, окрашивается в светлокоричневый цвет	Очерчен, окрашивается в черный цвет

Структурные составляющие	Р е а к т и в ы д л я м и к р о т р а в л е н и я					
	38	39	41	43	40	44
Al—Cu—Fe—Mn (цвет светлосерый)	Очерчен, окрашивается в цвет от светлокоричневого до черного, обычно шероховатый	Очерчен, не окрашивается	Очерчен, чернеет	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не окрашивается	Очерчен, не окрашивается
Al—Mn—Si (цвет серый, но темнее чем MnAl ₇)	Очерчен, окрашивается в цвет от светлокоричневого до черного, шероховатый	Очерчен, шероховатый, слегка окрашивается в темный цвет	Очерчен, шероховатый, слегка темнеет	Очерчен, шероховатый, слегка темнеет	Очерчен, травится, цвет не изменяется	Очерчен, слегка темнеет
Al—Mn—Mg (цвет серый)	Очерчен, чернеет	Очерчен, светло-коричневый	Очерчен, травится, чернеет	Очерчен, травится, чернеет	Очерчен, не травится, окрашивается в коричневый цвет	Окрашивается в цвета от коричневого до черного
CaSi ₂ (цвет серый, легко тускнеет)	Окрашивается в синий цвет, резко очерчен	Очерчен, цвет не изменяется	Очерчен, шероховатый, окрашивается в синий цвет	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, чернеет, травится, шероховатый	Окраска точками, от коричневого до синего цвета
Al—Cu—Mn (цвет серый)	Очерчен, травится, чернеет	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, окрашивается в светло-коричневый цвет	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, травится, чернеет	Травится, чернеет
CrAl ₇	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, окрашивается неравномерно в цвета от синего до черного	Очерчен, не травится, не окрашивается
Al—Cr—Fe	Не травится, окрашивается в светлокоричневый цвет	Не очерчен, не травится, не окрашивается	Очерчен, не травится, не окрашивается	Не очерчен, не травится, не окрашивается	Мелкие частицы окрашиваются в цвета от коричневого до черного, более крупные получают пятнистую окраску	Очерчен, не травится, окрашивается в светлокоричневый цвет

в своих центральных частях, имеют по краям теневые оторочки. Этого иногда удается добиться с большим эффектом, немного увеличив угол падения лучей света на шлиф (слегка повернув иллюминатор) при сильно суженной диафрагме.

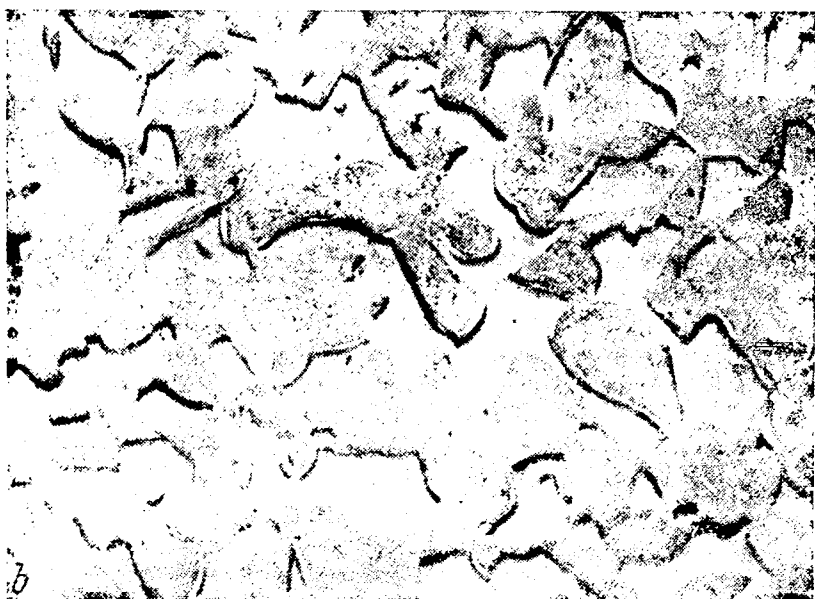


Рис. 64. Неполная закалка доэвтектоидной стали. Мартенсит и феррит. Освещение плоским стеклом (а) и коническое освещение (б). (Вилелла). $\times 800$

Еще более интересных результатов можно добиться, применяя коническое освещение: коническое освещение прекрасно передает рельефность структуры. На рис. 64 представлены микрофотографии одного и того же места структуры доэвтектоидной стали, закаленной при температуре, лежащей в интервале $A_1 - A_{\text{с}}$, т. е. получившей неполную закалку. Структура состоит из мартенсита (серый фон) и феррита (белые зерна). Верхняя микрофотография снята при обычном

плоском освещении шлифа, а нижняя — при коническом. Из последней с ясностью следует, что белые выступающие зерна представляют собой феррит, потому что при травлении мартенсит растворяется сильнее, чем феррит, и потому последний будет выступать над мартенситом.

Коническое освещение осуществляется установкой на пути светового пучка между конденсатором и диафрагмой непрозрачного экрана, располагаемого в центре светового пучка. Экран задерживает центральные лучи и пропускает только краевые, образующие конус.

Применение специальных магнитных способов. В своем элементарном виде этот способ сводится к применению простого магнита. Часто бывает необходимо отличить аустенитную сталь от чистого железа, так как их структуры имеют между собою большое сходство, а лица, мало искушенные в микроанализе, могут принять аустенитную сталь за чистое железо. В этом случае магнит окажется незаметным: аустенитная сталь, как материал немагнитный, не притянется магнитом; чистое же железо, очевидно, к магниту притянется.

Существуют и более сложные, но и более тонкие методы магнитного анализа структурных составляющих. Один из способов, разработанный Биттером, Эльмором и Маккихеном¹, дает возможность установить наличие магнитных фаз (например феррита) в сплавах с немагнитной основной массой (например в сплавах Ni—Cr—Fe). Этот способ состоит в том, что на поверхность нетравленного шлифа наносят тонкий слой суспензии из магнитного порошка и затем шлиф вносят в магнитное поле (рис. 65). Тогда частицы магнитного порошка располагаются на магнитных фазах, образуя

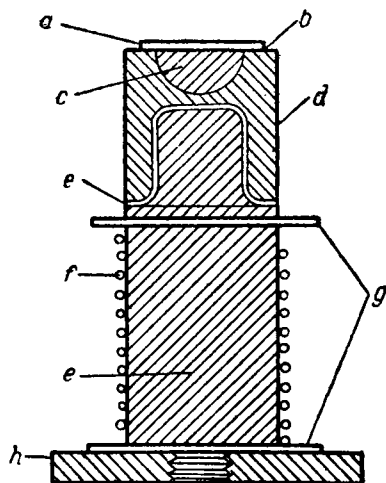


Рис. 65. Прибор для намагничивания шлифа при магнитном анализе со структуры: а — покровное стекло, б — слой магнитной коллоидальной суспензии; с — шлиф; d — заливка бакелитом, диаметр 25 мм, высота 25 мм; e — сердечник из мягкой стали диаметром 25 мм; f — эмалированная проволока (2300 ампервитков); g — защитные шайбы; h — подставка из мягкой стали

магнитный спектр структуры. На рис. 66 представлена структура жароупорного сплава, протравленная 50% водным раствором HCl. На рис. 67 представлено то же место структуры с нанесенным на шлиф слоем коллоидального магнитного порошка. Магнитный порошок расположился лишь на тех участках структуры, которые на рис. 66 были темносерыми. Из этого нетрудно заключить, что указанные участки являются зернами феррита, а остальные зерна (белые) — зернами аустенита.

На рис. 68 представлена структура наклепанной аустенитной стали, протравленной реактивами, а на рис. 69 — то же место шлифа с магнитным спектром. Из рассмотрения магнитного спектра ясно следует, что линии скольжения в аустените являются магнитными.

Способ приготовления магнитной суспензии таков. Надо растворить 2 г $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и 5,4 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (или соответствующее количе-

¹ H. S. Avery, V. O. Homerberg и E. Cook, Metals and Alloys, 1939, т. 10, № 11.



Рис. 66. Жароупорный сплав (0,11% С, 1,08% Мн, 11,6% Ni, 28,2% Cr). Травление 50% раствором соляной кислоты. $\times 250$



Рис. 67. То же место, что и на рис. 66. Магнитный спектр структуры. $\times 250$



Рис. 68. Наклепанная аустенитная сталь (0,40% С, 13,80% Мн, 1,34% Si). Травление: 1) ниталь, 2) 10% спиртовой раствор соляной кислоты. $\times 250$



Рис. 69. То же место, что и на рис. 68. Магнитный спектр структуры. $\times 250$

ство серноокислых солей) в 300 см³ горячей воды и прибавить при непрерывном помешивании 5 г NaOH, растворенного в 50 см³ воды. Профильтровав раствор, промыть осадок несколько раз водой и, наконец, с антинормальным раствором HCl. Затем перенести осадок в 1 л 0,5% мыльного раствора, прокипятить в течение короткого времени и профильтровать в горячем виде.

Определение твердости. Определение твердости с целью распознавания структурных составляющих может быть применено в отдельных случаях с большим успехом. Хорошо известно, например, что мартенсит и полученный путем отпуска из мартенсита сорбит настолько сходны под микроскопом, что различить их (особенно в легированных сталях) часто бывает почти невозможно. Определение твердости дает безошибочные указания относительно природы структуры.

Особый интерес представляет определение *микротвердости* по способу проф. Ганеманна. Этот способ состоит в непосредственном измерении твердости отдельных кристаллов при помощи очень небольшого алмаза, вставленного во фронтальную линзу объектива (рис. 70 и 71). При помощи этого способа удается определить отдельно твердость карбидов и основной массы в высокохромистых (рис. 72) и быстрорежущих сталях (рис. 73). На указанных рисунках черные прямоугольники представляют собою следы алмазных отпечатков. Нас же этот способ интересует с точки зрения тех возможностей, которые он дает для распознавания природы структурных составляющих. На рис. 74 представлено место пайки стали меднофосфорным припоем. Считалось, что зерна, расположившиеся в виде каемки по линии пайки, идентичны с серыми кристаллами (Cu₃P) припоя. Однако сравнение величины отпечатков при измерении микротвердости указанной каемки и серых участков позволило установить, что природа их различна.

д. Определение величины зерна. Весьма часто при изучении микроструктуры требуется определить среднюю величину зерна. Существует несколько способов измерения величины зерна.

Первый способ. Этот способ — способ Джеффериса — применим к сплавам с равноосным зерном, т. е. к литым или отожженным сплавам. Этот способ сводится к тому, что изображение структуры проектируется на матовое стекло фотокамеры микроскопа. Затем подсчитывают число зерен, полностью заключенных внутри определенного круга, площадь которого известна и равна F мм². Пусть это число зерен равно u . Затем подсчитывают число зерен, пересекающих окружность. Пусть это число будет равно z . Общее число зерен, заключенных на данной площади, определяют (по стандарту A. S. T. M.) по формуле:

$$x = u + 0,5 z.$$

Истинная величина площади, на которой располагаются эти x зерен, равна:

$$\frac{F}{m^2} \text{ мм}^2,$$

где m — линейное увеличение.

Тогда истинная величина a среднего зерна будет равна:

$$a = \frac{F}{m^2 x} \text{ мм}^2.$$

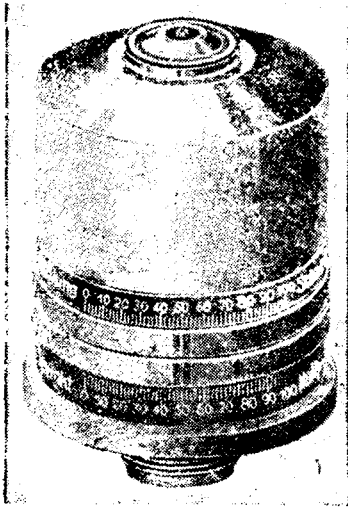


Рис. 70. Общий вид объектива ДЗО с вставленным во фронтальную линзу алмазом для измерения микротвердости

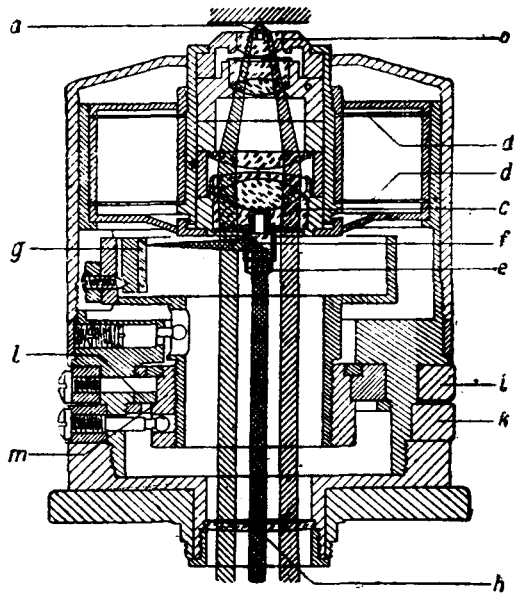


Рис. 71. Продольный разрез объектива ДЗО с алмазом (а) для определения микротвердости:

а — алмаз; б — фронтальная линза; с — задняя линза; d — кольцевая пружина; е — вспомогательный объектив; f — зеркало; g — шкала, указывающая нагрузку; h — коррекционная линза; i, k — установочные кольца; l — эксцентрик для резкой установки; m — гайка для установки на ноль



Рис. 72. Определение микротвердости карбидов и основной массы хромистой стали для волоочильных досок (2% С, 12% Cr). $\times 700$

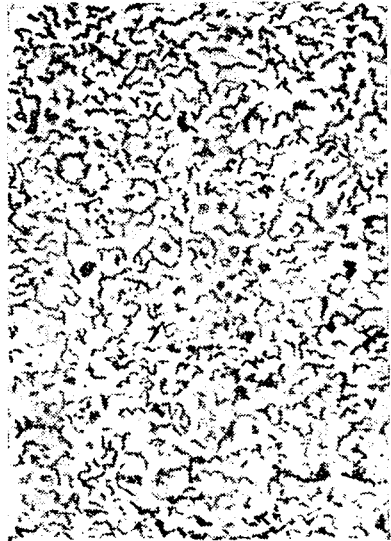


Рис. 73. Определение микротвердости карбидов и основной массы быстрорежущей стали. $\times 850$

Для того чтобы не выражать площадь зерна в дробных единицах, лучше вместо размерности мм^2 принять размерность μ^2 . Так как $1 \text{ мм} = 1000 \mu$ и $1 \text{ мм}^2 = 10^6 \mu^2$, то площадь одного среднего зерна будет равна:

$$a = \frac{F \cdot 10^6}{m^2 x} \mu^2.$$

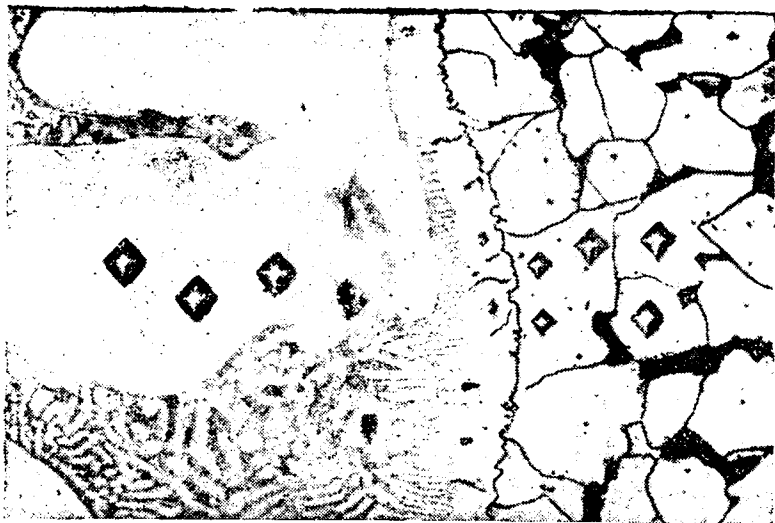


Рис. 74. Определение микротвердости составляющих в месте пайки мягкой стали меднофосфорным припоём. $\times 500$

Эту формулу можно несколько упростить, если условиться производить подсчет зерен на площади круга диаметром 80 мм (точнее — 79,8 мм). Тогда $F = 5000 \text{ мм}^2$. Значения отношения $\frac{m^2}{F} = \frac{m^2}{5000}$, которое мы обозначим через f , приведены ниже:

	m	f	m	f	m	f
Нат. вел.	...	0,0002	100	2,0	500	50,0
10	...	0,02	150	4,5	750	112,5
25	...	0,125	200	8,0	1000	200,0
50	...	0,5	250	12,5	1500	450,0
75	...	1,125	300	18,0	2000	800,0

тогда

$$a = \frac{10^6}{fx} \mu^2.$$

За средний диаметр зерна принимают

$$d = \sqrt{a} \mu.$$

Второй способ. Этот способ — способ Гейна — применяется в особенности к сплавам, у которых зерна неравносны. По предыдущему, изображение структуры проектируют на матовое стекло, на котором должны быть проведены две взаимно перпендикулярные оси, причем одна из них должна быть параллельна направлению прокатки. Затем измеряют число зерен, пересеченных каждым диаметром на одной и той же определенной длине k мм. За число зерен на площади $\frac{k^2}{m^2} \text{ мм}^2$ принимают произведение $p \times q$ чисел зерен

по двум осям. Истинная величина площади среднего зерна будет:

$$a = \frac{k^2 10^6}{m^2 pq} \mu^2.$$

2. Средние размеры зерна будут:

$$b = \frac{k}{mp} 10^3 \mu \text{ или } \frac{k}{mp} \text{ мм};$$

$$c = \frac{k}{mq} 10^3 \mu \text{ или } \frac{k}{mq} \text{ мм}.$$

Третий способ. Проектируют изображение на матовое стекло микроскопа и измеряют размеры нескольких зерен, а затем берут среднее значение. Для определения площади зерна изображение зарисовывают на кальку или тонкую бумагу и затем планиметрируют площади нескольких зерен. Для определения средних размеров или средней величины площади этот способ является наименее подходящим, так как дает случайные и неточные результаты. Обычно он применяется для определения размеров и площади каких-либо отдельных зерен, представляющих почему-либо особый для нас интерес.

Четвертый способ. Этот способ также применяется только для измерения размеров индивидуальных зерен.

Вместо обычного окуляра вставляют микрометрический окуляр, т. е. окуляр, имеющий сетку с делениями (цена этих делений безразлична). Вместо шлифа на предметный столик ставят микрометр, т. е. стеклянную или металлическую линейку, на которой нанесены деления через 0,01 мм. Затем следует установить, сколько делений шкалы микрометрического окуляра соответствует, например, 0,1 мм или 1,0 мм. Для измерения размеров зерна шлиф ставят на предметный столик и измеряют размеры зерна в делениях микрометрического окуляра. Пересчет полученных значений в истинные, т. е. в миллиметры, очевидно, не составит труда.

Способы третий и четвертый пригодны не только для измерения размеров зерен, но и для измерения глубины цементации, глубины заковки и т. д.

Пятый способ. Видимая структура сравнивается со шкалой стандартных структур, сфотографированных при том же увеличении и различающихся между собой по величине зерна. Для характеристики величины зерна изучаемой структуры достаточно лишь указать, какому баллу по шкале она соответствует.

На рис. 75—84 приведена (по стандарту E2-36 A. S. T. M.) шкала величин зерна в прокатанных α -латунях (70:30), пригодная для всех прокатанных и однофазных цветных сплавов (латуни, бронзы, нейзильбера и т. д.). Структуры протравлены раствором 24 и сфотографированы при увеличении 75. Средний диаметр зерна в структурах этой шкалы равен:

№ 1 (рис. 75)	0,010 мм
№ 2 (рис. 76)	0,15 "
№ 3 (рис. 77)	0,025 "
№ 4 (рис. 78)	0,035 "
№ 5 (рис. 79)	0,045 "
№ 6 (рис. 80)	0,065 "
№ 7 (рис. 81)	0,090 "
№ 8 (рис. 82)	0,120 "
№ 9 (рис. 83)	0,150 "
№ 10 (рис. 84)	0,200 "

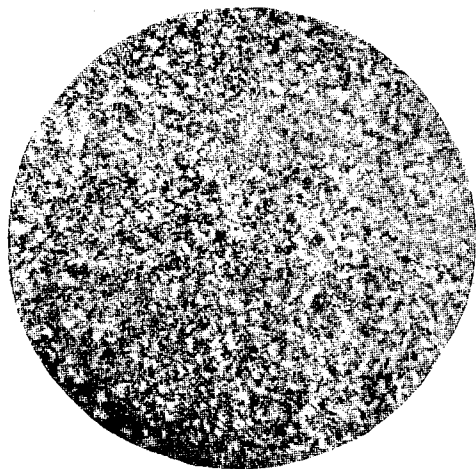


Рис. 75. Зерно № 1. 0,010 мм. $\times 75$

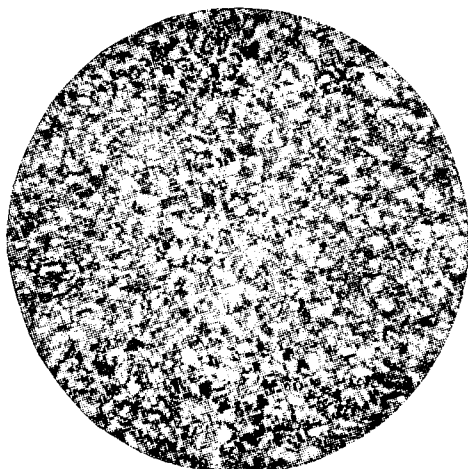


Рис. 76. Зерно № 2. 0,015 мм. $\times 75$

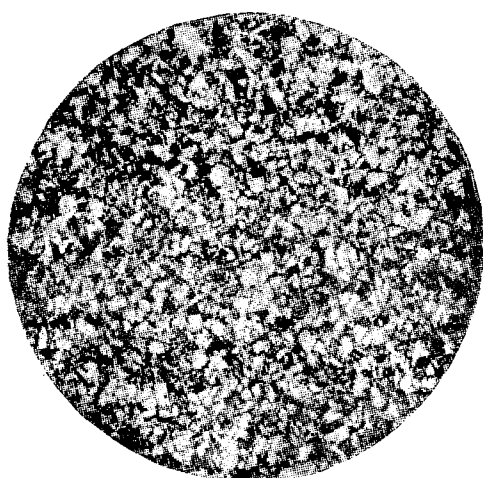


Рис. 77. Зерно № 3. 0,025 мм. $\times 75$

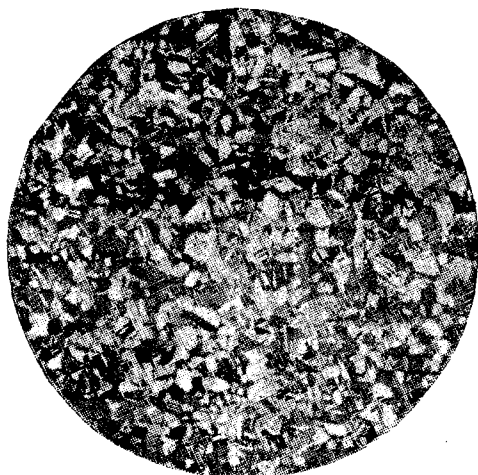


Рис. 78. Зерно № 4. 0,035 мм. $\times 75$



Рис. 79. Зерно № 5. 0,045 мм. $\times 75$



Рис. 80. Зерно № 6. 0,065 мм. $\times 75$

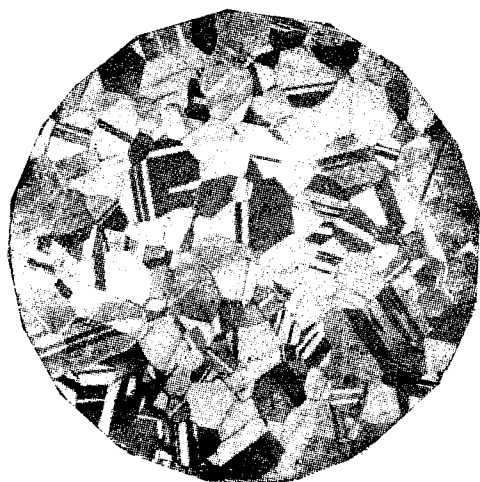


Рис. 81. Зерно № 7. 0,090 мм. $\times 75$

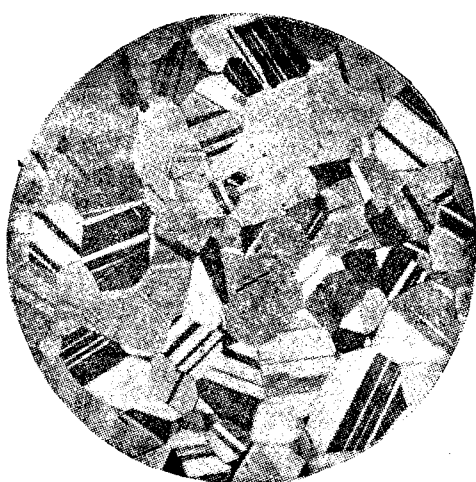


Рис. 82. Зерно № 8. 0,120 мм $\times 75$

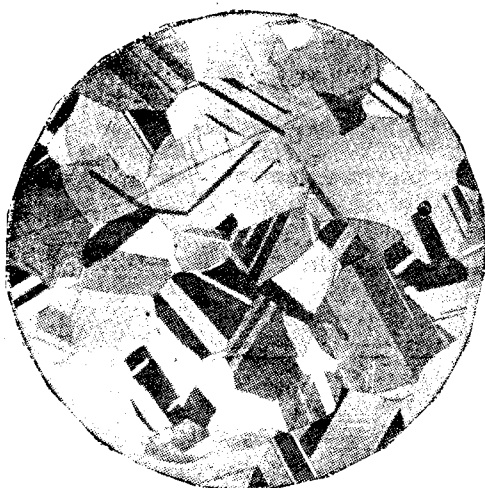


Рис. 83. Зерно
№ 9. 0,150 мм $\times 75$



Рис. 84.
Зерно № 10.
0,200 мм. $\times 75$

Что касается сталей, то существующие шкалы относятся к величине зерна структуры сталей не в отожженном состоянии, а к величине аустенитного зерна (аустенитное зерно часто называют еще «первичным», «прирожденным», «наследственным», «природным» и т. д.). Важность определения аустенитного зерна объясняется тем, что величина его оказывает очень большое влияние на целый ряд важнейших свойств стали и прежде всего на способность стали к глубокой прокаливаемости, на деформацию стали при термической обработке и т. д.

Классический способ определения величины аустенитного зерна стали, разработанный Мак-Кведом и Эном и регламентированный американским стандартом E19-33 A. S. T. M., состоит в том, что границы аустенитных зерен определяются сеткой вторичного цементита. Для этого испытываемая сталь подвергается цементации при 927° в продолжение не менее 8 час. в энергичном карбюризаторе, который дал бы возможность получить в цементованном слое сетку вторичного цементита. В качестве такого энергичного карбюризатора можно рекомендовать смесь из 40% углекислого бария и 60% мелкого древесного угля. Охлаждение после цементации производится медленное (с печью). После охлаждения образца изготавливается шлиф, который травится реактивом 1, и при увеличении 100 рассматривается структура цементованного слоя. Величина зерна определяется либо непосредственно одним из изложенных выше способов, либо — что рекомендуется — сравнивается со шкалой A.S.T.M., состоящей из 8 структур (рис. 85—92), причем каждой из них присвоен определенный балл. Величина аустенитного зерна изучаемой стали оценивается баллом той стандартной структуры, к которой наиболее близко приближается исследуемая.

Таблица 6

Величина аустенитного зерна по шкале E19-33 A. S. T. M.

Балл зерна	Число зерен на площади 1 кв. дюйм (6,25 см ²) при увеличении 100			Среднее число зерен на площади 1 мм ²	Истинная площадь зерна μ ²		
	наименьшее	среднее	наибольшее		наимень- шая	средняя	наиболь- шая
1	0,75	1	1,5	16	40 000	64 000	—
2	1,5	2	3	32	20 000	32 000	40 000
3	3	4	6	64	10 000	16 000	20 000
4	6	8	12	128	5 000	8 000	1 000
5	12	16	24	256	2 500	4 000	5 000
6	24	32	48	512	1 200	2 000	2 500
7	48	64	96	1024	600	1 000	1 200
8	96	128	192	2048	—	500	600

В табл. 6 приведены истинная величина площади зерна и число зерен на определенной площади, соответствующие каждому баллу шкалы в отдельности. Основная зависимость шкалы A.S.T.M. выражается уравнением

$$n = 2^{N-1},$$

где n — число зерен на площади 1 кв. дюйма (6,25 см²) и N — балл зерна.

Для облегчения определения величины зерна путем сравнения стандарт A.S.T.M. содержит также восемь структур (рис. 93—100), соответствующих переходному слою от цементованного к нецементованному.



Рис. 85. Зерно № 1. $\times 100$.

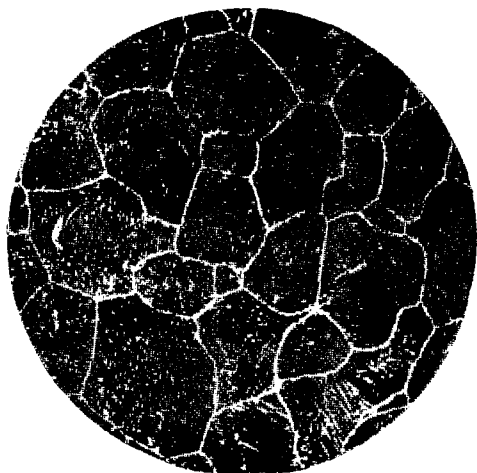


Рис. 86. Зерно № 2. $\times 100$

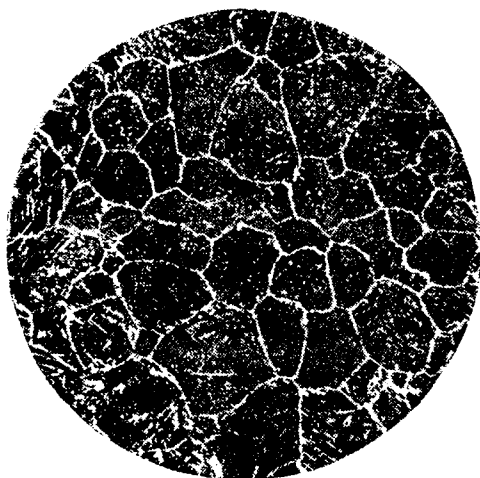


Рис. 87. Зерно № 3. $\times 100$

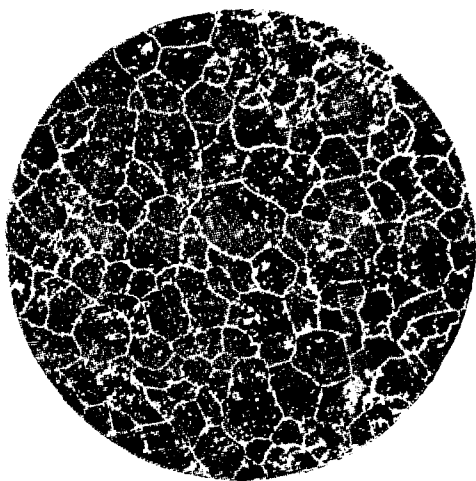


Рис. 88. Зерно № 4. $\times 100$

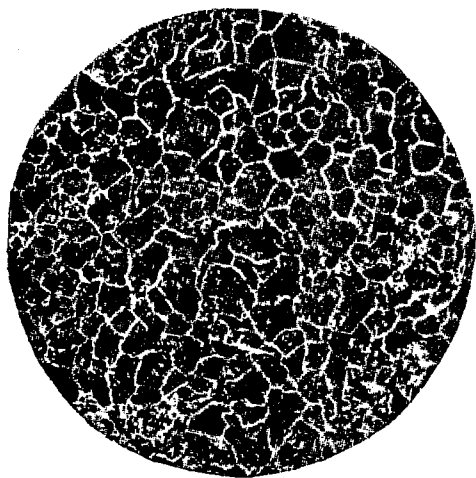


Рис. 89. Зерно № 5. $\times 100$

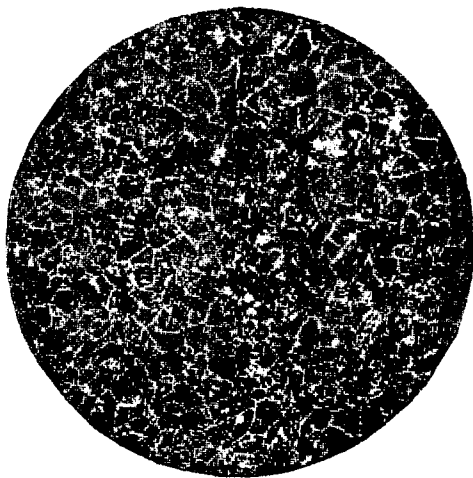


Рис. 90. Зерно № 6. $\times 100$

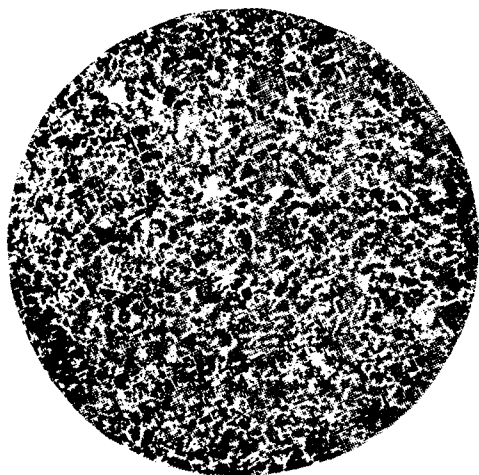


Рис. 91. Зерно № 7. $\times 100$

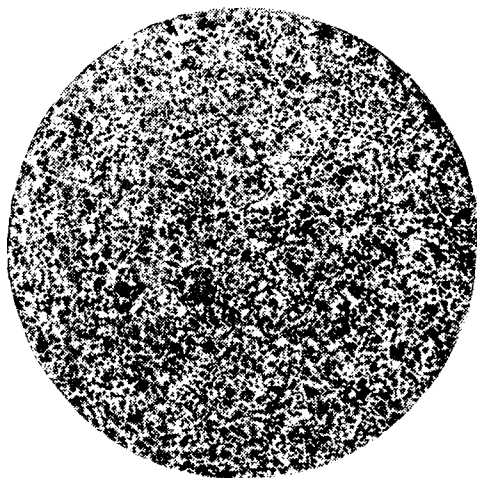


Рис. 92. Зерно № 8. $\times 100$

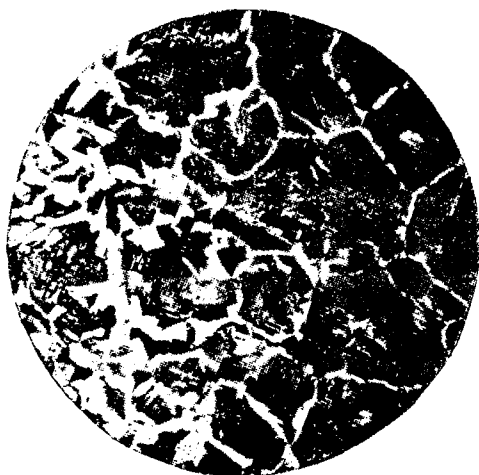


Рис. 93. Зерно № 1. $\times 100$

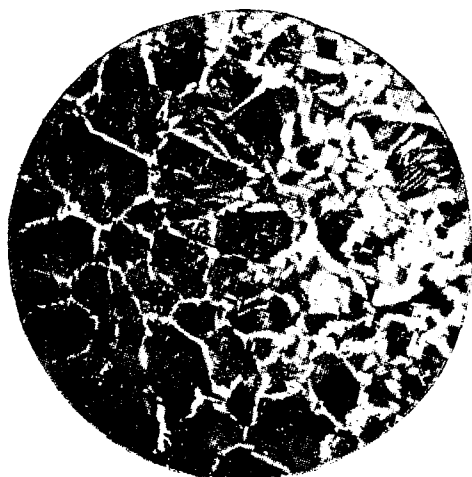


Рис. 94. Зерно № 2. $\times 100$

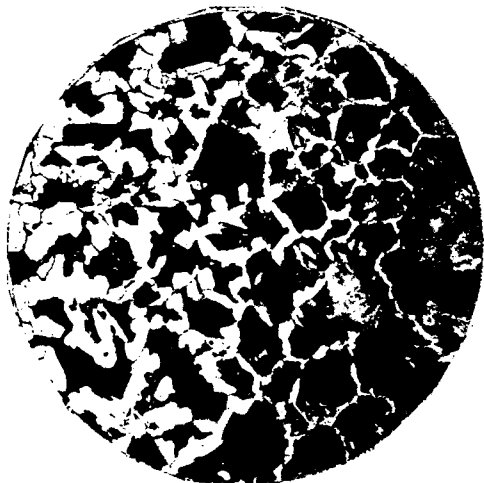


Рис. 95. Зерно № 3. $\times 100$

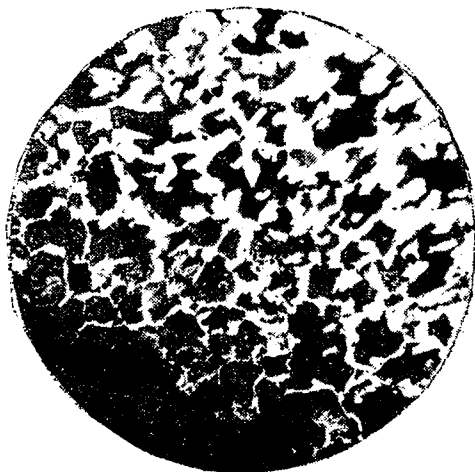


Рис. 96. Зерно № 4. $\times 100$

Бывают случаи, когда в структуре одновременно присутствуют два типа зерна. В таких случаях, по предложению Давенпорта и Вейна, определяют относительное количество зерен каждого типа, например 75% зерен № 5 и 25% зерен № 1.

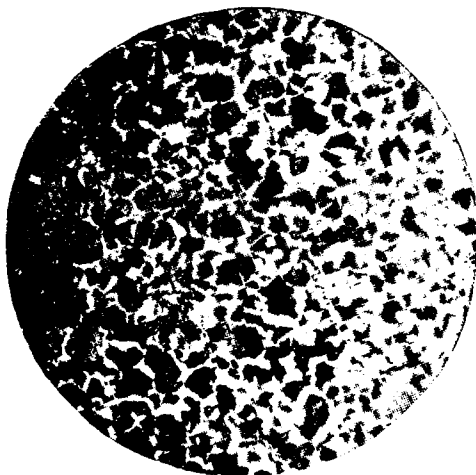


Рис. 97. Зерно № 5. $\times 100$

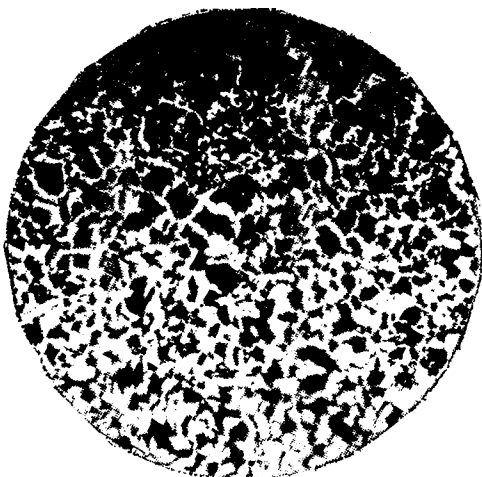


Рис. 98. Зерно № 6. $\times 100$



Рис. 99. Зерно № 7. $\times 100$

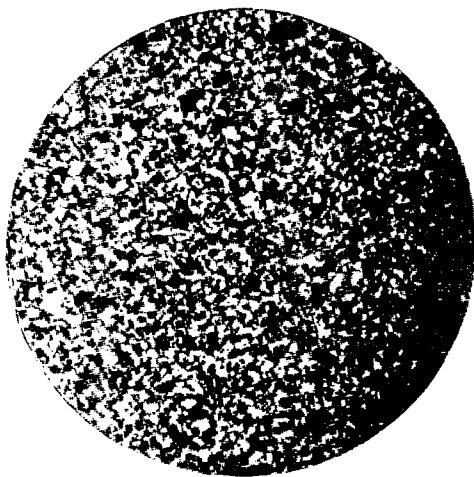


Рис. 100. Зерно № 8. $\times 100$

Описанный способ определения величины зерна по Мак-Кведу и Эну имеет ряд недостатков. Одним из самых существенных является необходимость продолжительной цементации. Поэтому был предложен целый ряд других более простых и скорых методов. Очень подробный сравнительный анализ всех этих методов приведен в статье Бастьена¹.

Приведем краткое описание этих способов.

1. Выявление аустенитного зерна в заэвтектоидных сталях производится путем отжига стали при температуре выше A_{cm} с последующим медленным охлаждением. Получающаяся при таком отжиге цементитная сетка располагается по границам аустенитного зерна.

¹ Revue de Métallurgie, 1939, янв., т. 36, № 1.

2. В доэвтектоидных среднеуглеродистых сталях аустенитное зерно может быть выявлено путем *нормализации*, в результате которой в структуре стали образуется сетка феррита.

3. В доэвтектоидных сталях с содержанием углерода 0,2—0,8% аустенитное зерно может быть выявлено путем *неполной закалки*, т. е. закалки с температуры $A_3 - 15^\circ$. В этом случае структура стали будет состоять из мартенсита, окруженного тонкой сеткой феррита, ячейки которой и определяют величину аустенитного зерна (метод Гроссмана).

4. Величина аустенитного зерна в сталях с любым содержанием углерода может быть установлена путем *закалки со скоростью немного ниже критической*. В этом случае структура будет состоять из мартенсита с тонкой сеткой-оторочкой из троостита. Очевидно, что участки мартенсита внутри трооститной сетки и соответствуют бывшим аустенитным зернам. Давенпорт и Бейн такую закалку рекомендуют осуществлять охлаждением образца в расплавленном свинце до 600—650° с последующим переносом его в воду для окончательного охлаждения. Вместо этого можно производить закалку в воде с частичным погружением образца и для определения величины зерна рассматривать структуру переходной зоны. Этот способ особенно пригоден для определения величины аустенитного зерна в сталях, близких к *эвтектоидному* составу, потому что в этих сталях, естественно, не может получиться ни ферритная, ни цементитная сетка.

5. Определить величину аустенитного зерна в сталях с любым содержанием углерода¹ можно путем *травления* нормального закаленного на мартенсит образца реактивом 3. Отпуск шлифа при 200—300° и применение многократной переполіровки и травления значительно улучшают результаты. Этот способ усиленно рекомендуется Вилелла, из книги которого заимствованы микрофотографии, представленные на рис. 101.

6. Величина аустенитного зерна в сталях с любым содержанием углерода может быть, наконец, зафиксирована *окислением* полированного шлифа в воздухе, в атмосфере кислорода или в смеси кислорода с азотом при температуре выше A_3 . Произведя легкую полировку шлифа и протравив его реактивом 2, наблюдают в микроскоп границы аустенитных зерен, окаймленных черной сеткой окислов.

7. Вместо длительного способа цементации по способу Мак-Кведа и Эна может быть применен метод *ступенчатой цементации* при 930° в течение 3 час., после чего производится охлаждение до критической точки данной стали, выдержка при этой температуре в течение 15 мин. и затем охлаждение с печью.

8. Аустенитное зерно может быть установлено также по способу, примененному Л. И. Шушпановым², состоящему в том, что отполированные шлифы нагревались в вакууме в течение 1—2 час. при температуре выше верхней критической точки (A_3). Границы аустенитного зерна получают совершенно отчетливыми в результате аллотропического превращения ($\alpha - \gamma$).

Существует еще целый ряд способов и вариантов установления аустенитного зерна. Для подробного ознакомления с ними отсылаем читателя к специальной литературе³.

¹ Впрочем, Бастьен на основании личного опыта считает этот способ применимым лишь к сталям, содержащим не выше 0,75% С.

² Металлург. 1937, № 6.

³ Статьи Н. Ф. Болховитинова и Козловского (Качественная сталь, 1936, 6); Я. Л. Фрида и Л. Н. Подвойского (Заводская лаборатория, 1936, 3); А. П. Гуляева (там же, 1936, 5); С. А. Бернасовской и И. Н. Голикова (там же, 1936, 5); С. Л. Эльгот (там же, 1936, 10);

Новый американский стандарт E19-38T A.S.T.M.¹ допускает, помимо способа Мак-Кведа и Эна, применение следующих способов выявления аустенитного зерна: метод нормализации, метод неполной закалки, метод закалки со скоростью ниже критической, метод травления, метод окисления.

К новому стандарту приложена шкала аустенитного зерна, состоящая не из микрофотографий, а из схем. Одни схемы (рис. 102—109) изображают аустенитное зерно светлым с черной сеткой. Эти

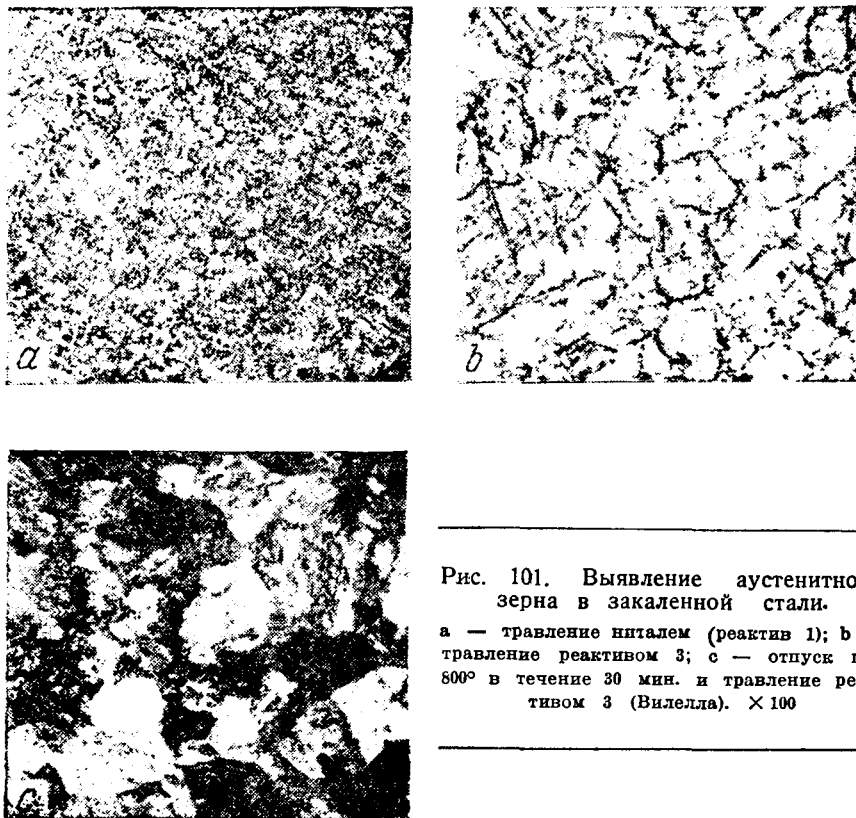


Рис. 101. Выявление аустенитного зерна в закаленной стали.

а — травление ниталем (реактив 1); б — травление реактивом 3; с — отпуск при 800° в течение 30 мин. и травление реактивом 3 (Виллелла). $\times 100$

схемы наиболее пригодны в тех случаях, когда аустенитное зерно выявлено методом окисления и методом закалки со скоростью ниже критической или определяется цементитной сеткой на шлифе, протравленном пикратом натрия. Другие схемы (рис. 110—117) представляют аустенитное зерно черным с белой сеткой. Такие схемы наиболее подходят к тем случаям, когда аустенитное зерно выявляется методом нормализации или методом цементации с травлением шлифа ниталем.

А. П. Гуляева и А. П. Беловой (там же, 1936, 11); П. П. Чичканова и К. К. Виноградова (там же, 1937, 1); М. И. Теплоуховой (там же, 1937, 6); С. М. Дорогова (там же, 1939, 1); С. К. Дунаева и В. Н. Махова (там же, 1938, 1); Н. Ф. Болховитинова (там же, 1938, 1); И. А. Долгопольского (там же, 1938, 10); Н. С. Вайнштейн и Е. В. Домбровской (там же, 1939, 2); Т. П. Соболю (там же, 1939, 6); М. С. Хвалова, Н. В. Ведерникова и А. А. Осипова (там же, 1940, 9); А. М. Харитюнюк (там же, 1940, 10); Н. С. Фрейкиной (Техн. отчет лаборатории металлов завода Электросила).

¹ A. S. T. M. Proceeding of the 41 Annual Meeting, т. 38, ч. 1, стр. 1296—7; см. также Н. Ф. Болховитинов, Заводская лаборатория, 1939, 4—5.

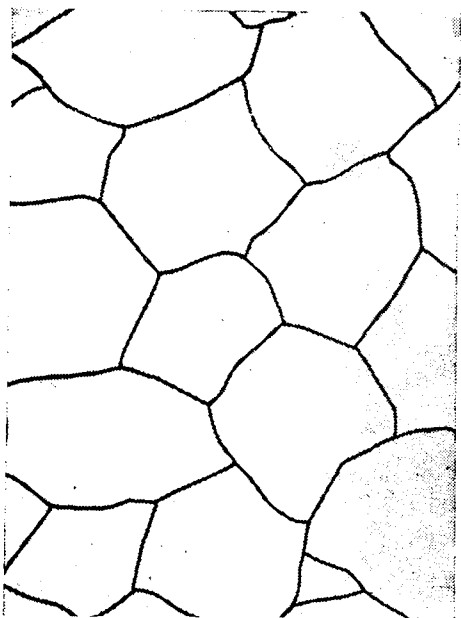


Рис. 102. Зерно № 1

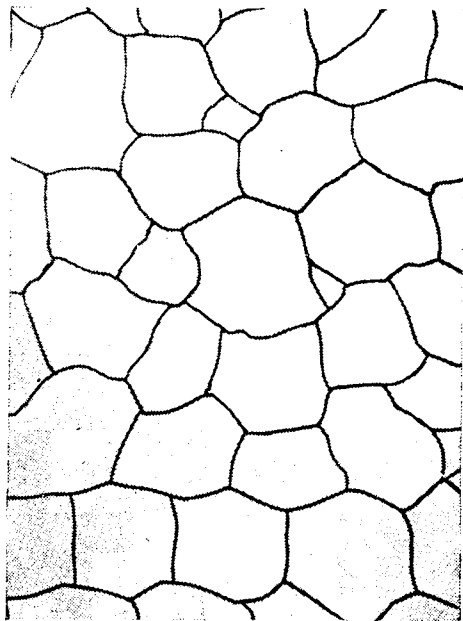


Рис. 103. Зерно № 2

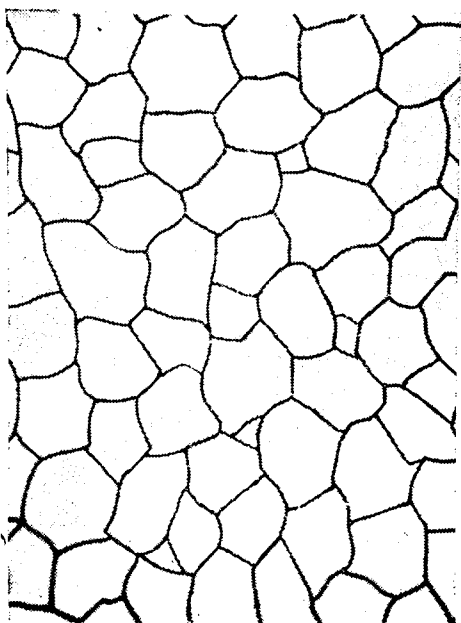


Рис. 104. Зерно № 3

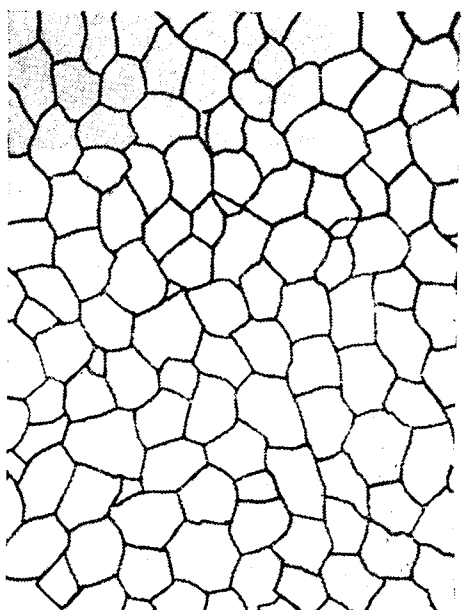


Рис. 105. Зерно № 4

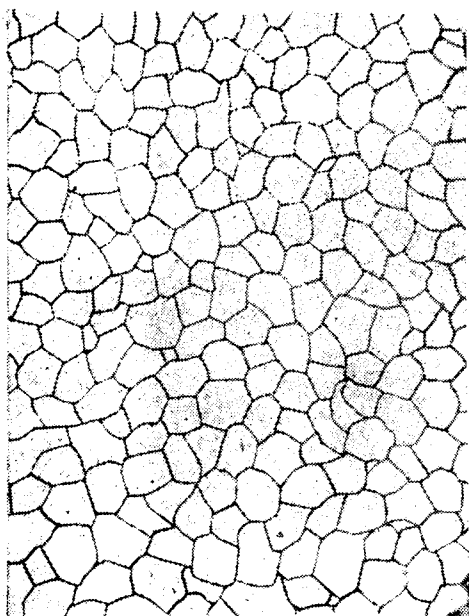


Рис. 106. Зерно № 5

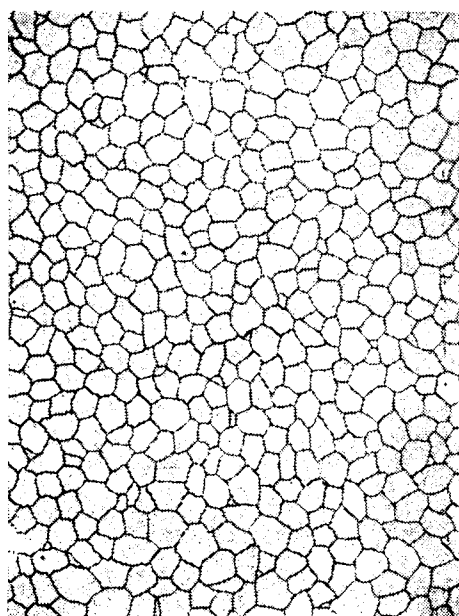


Рис. 107. Зерно № 6

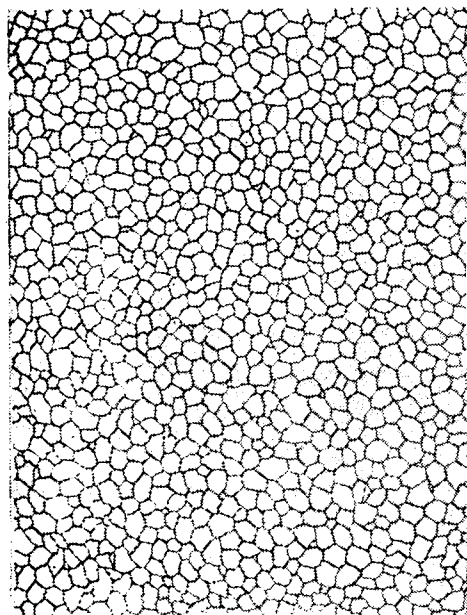


Рис. 108. Зерно № 7

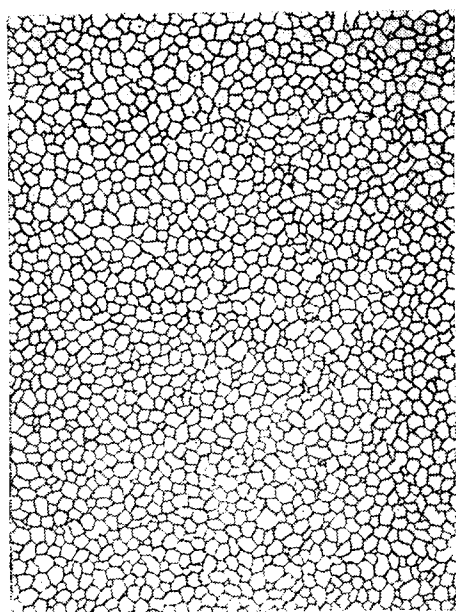


Рис. 109. Зерно № 8

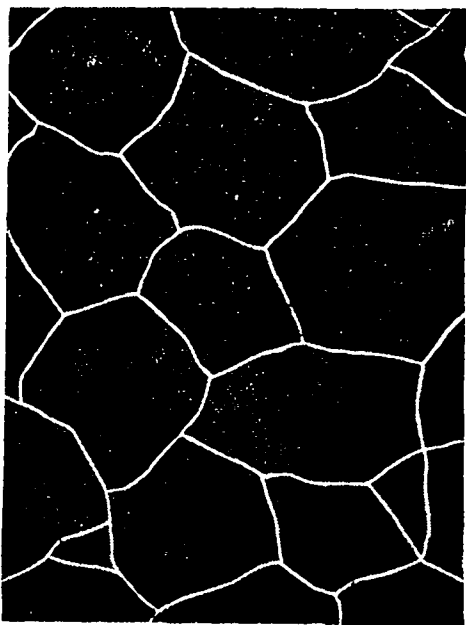


Рис. 110. Зерно № 1

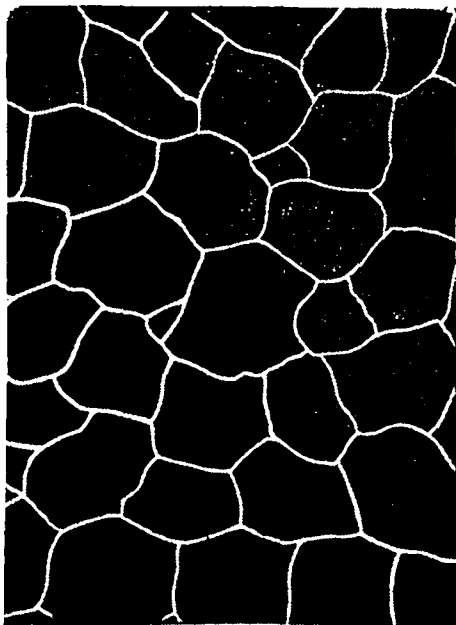


Рис. 111. Зерно № 2

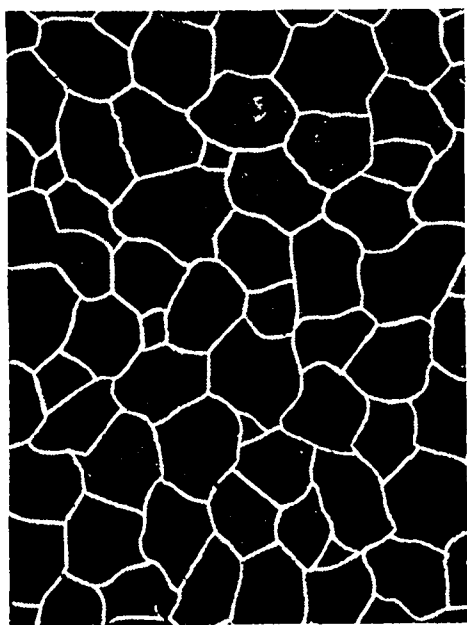


Рис. 112. Зерно № 3

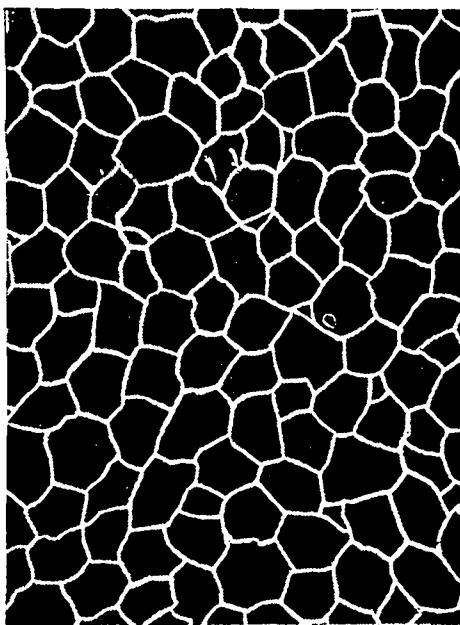


Рис. 113. Зерно № 4

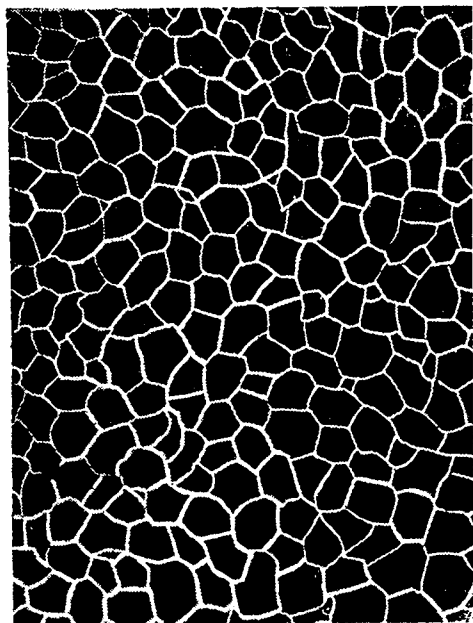


Рис. 114. Зерно № 5

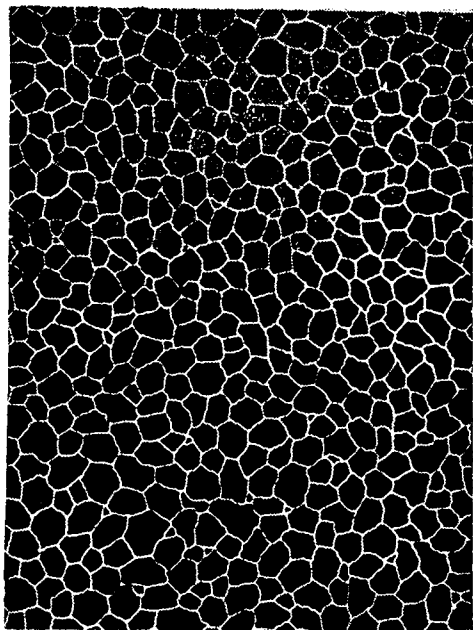


Рис. 115. Зерно № 6

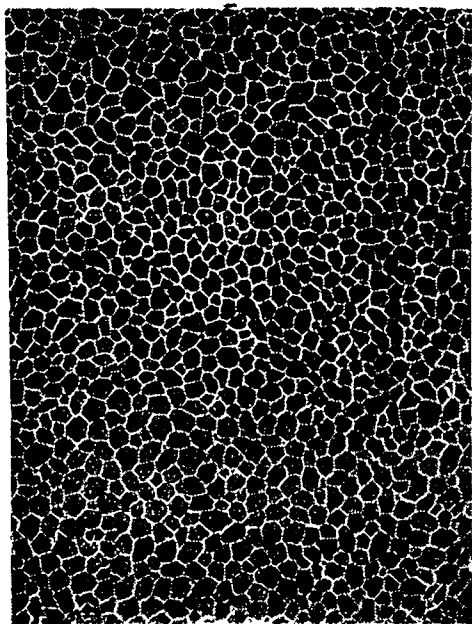


Рис. 116. Зерно № 7

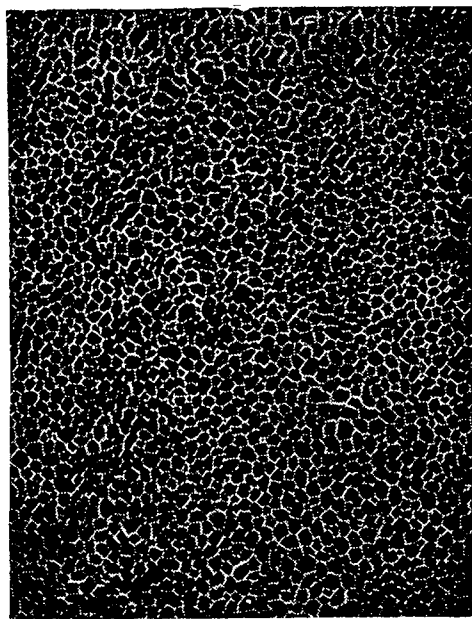


Рис. 117. Зерно № 8

ГЛАВА III

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ

1. Рентгеновские лучи

Рентгеновские лучи, или так называемые *X*-лучи, представляют собой, как и световые лучи оптического спектра, электромагнитные колебания. Существенное отличие рентгеновских лучей от световых состоит в длине волны: если длина волны видимой части оптического спектра составляет $(0,4 \text{ до } 0,8) \times 10^{-3} \text{ мм}$, то длина волны рентгеновских лучей, применяемых в рентгентехнике, равна $(2 \text{ до } 0,06) \times 10^{-7} \text{ мм}$. Так как $1 \text{ мм} = 10\,000\,000 \text{ ангстремов } (\text{\AA})$, можно сказать, что длина волны наиболее часто применяемых для исследования материалов рентгеновских лучей равна $0,60\text{—}2,00 \text{ \AA}$ и что она, примерно, в 10 000 раз короче длины световой волны.

Открытием *X*-лучей мы обязаны Рентгену, который в течение 1895—1899 гг. в своих трех капитальных сообщениях описал все основные свойства этих лучей. Однако доказать электромагнитную природу рентгеновских лучей удалось значительно позже — в 1912 г. исследованиями Лауэ и его сотрудников Фридриха и Книппинга. С этого момента рентгеновские лучи стали применяться и для целей изучения структуры кристаллических веществ.

Генераторами рентгеновских лучей являются *рентгеновские трубки*. В зависимости от принципа действия эти трубки делятся на две категории: 1) ионные и 2) электронные.

Получение рентгеновских лучей в ионных трубках, которые еще называются *газовыми* или *физическими* трубками, происходит следующим образом. В сосуде *b* (рис. 118), в котором насосом с поддерживается вакуум порядка 0,001 мм ртутного столба, впаяны электрические изолированные друг от друга катод *к* и антикатод *а*. Соединяя *к* с отрицательным полюсом, а *а* с положительным полюсом источника постоянного электрического тока высокого напряжения, можно в сосуде *b* (рентгеновской трубке) наблюдать следующие явления. Благодаря высокому напряжению, приложенному к *к* и *а*, в разреженном газе трубки будет происходить ионизация молекул. Электрически отрицательно заряженные ионы будут двигаться к аноду *а*, а положительно заряженные ионы — направляться к катоду *к*, создавая таким образом электрический ток. Ионы, ударяющиеся о катод, вырывают из материала последнего электроны, которые, благодаря наличию электрического поля между *к* и *а*, ускоренно летят к антикатоде *а*.

Такой поток электронов носит название *катодных лучей*. Ударяясь об антикатод, электроны внезапно затормаживаются. Большая часть их кинетической энергии превращается в теплоту и лишь очень незначительная часть — электронной энергии около 0,1% — переходит в энергию рентгеновского излучения. Рентгеновская трубка является генератором с весьма низким коэффициентом полезного действия. По-

следний понижается еще и вследствие того, что образовавшиеся рентгеновские лучи от поверхности антикатада распространяются во все стороны, и следовательно, часть их остается потерянной, так как еще не найден способ концентрации их в желаемом направлении.

В электронных трубках, которые иначе называются *техническими* или *обезгаженными* (кроме того их называют *трубками с калящимся катодом и трубками Кулиджа*), рентгеновское излучение вызывается следующим образом. Из сосуда *b* (рис. 119) газ откачен до максимально возможного разрежения, например до получения вакуума, равного 10^{-8} мм ртутного столба. Катод *k* присоединяется к отрицательному полюсу, а анод *a* к положительному полюсу высокого напряжения постоянного тока. Ввиду высокого вакуума эффект ионизации практически в этом случае не имеет места, и тока между *k* и *a* не будет.

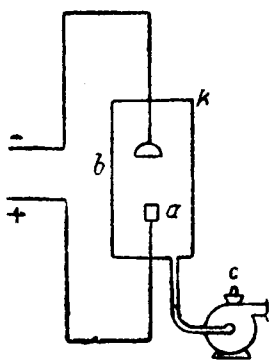


Рис. 118. Схема ионной трубки

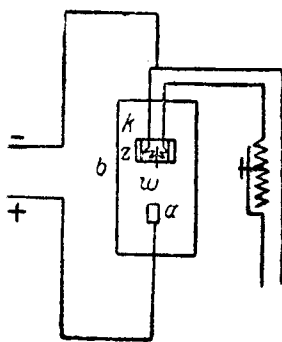


Рис. 119. Схема электронной трубки

Если же катод, изготовленный, например, из спиральной вольфрамовой проволоки *w*, нагревать путем пропускания тока, то катод начнет испускать электроны, которые ускоренно, благодаря электрическому полю высокого напряжения, будут лететь к антикатоду и возбуждать, как и в случае ионной трубки, рентгеновское излучение. Для концентрации катодных лучей служит направляющий цилиндр *z*.

На рис. 120 представлена очень распространенная ионная трубка Хаддинга. В металлический корпус *b* вставлен изолятор *k₁*, через который в трубку введен катод *k*. Поверхность катода шаровая, и это способствует концентрации потока электронов на небольшой площади антикатада *a*, так как электроны вырываются с катода в направлении, перпендикулярном его поверхности. Катод изготавливается обычно из алюминия и охлаждается водой, которая вводится через *k₁*. Корпус трубки *b* — металлический и для охлаждения также снабжен водяной рубашкой *c*. Большим достоинством трубки является ее сменный антикатод. Как будет показано ниже, для получения рентгеновских лучей желаемой длины волны необходимо антикатод изготавливать из определенного материала. Антикатод входит в корпус трубки пришлифованной конусной поверхностью. Для отвода теплоты, в которую переходит почти весь электронный поток (0,5—1,0 kW), антикатод снабжен водяным охлаждением (трубки *k₂* и *k₄*). Образующиеся рентгеновские лучи выпускаются из трубок через алюминиевые окна *o* (обычно 4—6 шт.).

Требуемое разрежение достигается в трубке специальным вакуумным насосом, присоединяемым к отверстию f .

Работа с такими трубками весьма неудобна, так как требует непрерывной регулировки как вакуумной системы, так и электрической. Значительно удобнее запаянные электронные трубки, тип которых изображен на рис. 121.

Электрическая схема присоединения трубки к сети представлена на рис. 122. От электрической сети v переменный ток напряжением 110—210 В направляется в трансформатор T , в котором он преобразуется в ток высокого напряжения. Регулировкой тока первичной сети достигается регулировка напряжения тока во вторичной цепи. Ток высокого напряжения из трансформатора направляется для выпрямления в кенотрон a , а затем в рентгеновскую трубку b . Последняя заземлена, так же как один полюс вторичной цепи трансформатора.

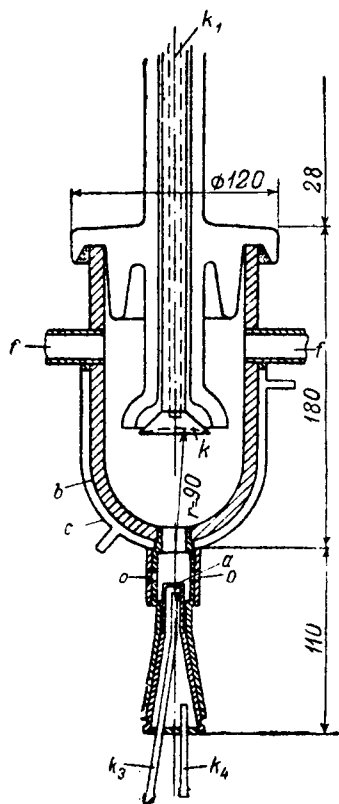


Рис. 120. Трубка Хаддинга

2. Свойства рентгеновских лучей

Качество рентгеновских лучей зависит от режима трубки и от материала антикатада. В общем случае рентгеновское излучение представляет собой пучок с различными длинами волн, обладающих при этом разной интенсивностью. На рис. 123 представлены кривые спектрального распределения энергии при возбуждении излучения от антикатада. Здесь по оси ординат отложены значения относительной интенсивности излучения, а по оси абсцисс — длина волн. Легко видеть, что интенсивность лучей весьма существенно из-



Рис. 121. Электронная трубка

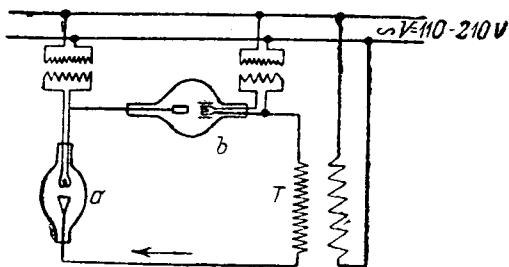


Рис. 122. Схема присоединения рентгеновской трубки к сети

меняется с длиной волн. До некоторого напряжения между катодом и антикатодом это изменение происходит по плавной кривой, имеющей при некоторой длине волны максимум интенсивности. Такой спектр носит название *сплошного*. Однако, начиная с некоторого напряжения, разного для различных антикатодных материалов, кри-

вые относительной интенсивности обнаруживают при некоторых длинах волн пики, указывающие, что некоторые длины волн имеют особую большую интенсивность. Эта часть спектра называется *характеристическим излучением атомов антикатада*. Она накладывается на сплошной спектр и возбуждается при определенных условиях.

Как будет указано ниже, для некоторых исследований металлов и сплавов требуется применение сплошного спектра (просвечивание, исследование монокристаллов) — так называемых *полихроматических* лучей, а в некоторых случаях необходимо применение лучей определенной длины волны, так называемых *монохроматических* лучей (исследования поликристаллических металлов и сплавов).

В первом случае применяют такой антикатод и такой режим трубки, которые позволили бы получить достаточно интенсивный сплошной спектр. Чаще всего для этого служит вольфрамовый антикатод.

Во втором случае, собственно, работают не с монохроматическим пучком рентгеновских лучей, а также со сплошным спектром, на который лишь наложены «пики» характеристических лучей. Поскольку же интенсивность последних значительно превышает интенсивность лучей других длин волн, постольку и эффект, вызываемый характеристическими лучами, проявится особенно четко и рельефно. Поэтому практически можно считать, что лучи являются в этом случае монохроматическими.

Для возбуждения характеристических лучей желаемой длины волны нужно выбрать подходящий материал антикатада и приложить к трубе некоторое напряжение.

Не останавливаясь на природе возникновения характеристического излучения, обратимся к табл. 7, в которой приведены материалы, наиболее часто применяемые для изготовления антикатодов, и длины волн их характеристического излучения — так называемой серии К.

В последней графе указаны те минимальные напряжения, которые нужно приложить между катодом и антикатодом для возбуждения характеристического излучения. Рабочее напряжение превышает минимальное обычно в 2—3 раза.

Из этих данных видно, что на рентгеновском спектре получают четыре «пики» интенсивностей: α_1 , α_2 , β_1 и β_2 . Из них α_1 и α_2 , так же как и β_1 и β_2 , весьма мало отличаются по длине волны, и поэтому чаще всего различают лишь две группы — α и β . Из них лучи α значительно более интенсивны, что позволяет сравнительно легко их отличать на рентгенограмме от лучей β .

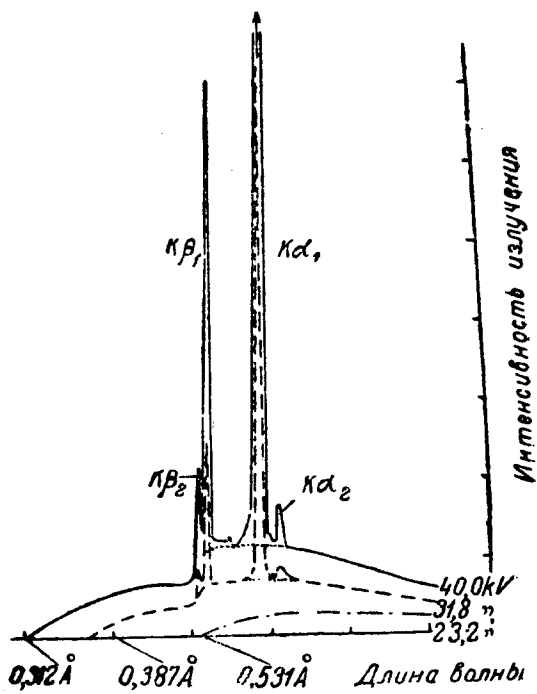


Рис. 123. Кривые спектрального распределения энергии рентгеновского излучения

Таблица 7

Длина волн серии K в ангстремах

Элемент \ Интенсивность	Очень сильная	Сильная	Средняя	Слабая	Минимальное напряжение для возбуждения характерист. излучения kV
	α_1	α_2	β_1	β_2	
Хром	2,285	2,289	2,080	2,067	6
Железо	1,932	1,936	1,753	1,740	7
Кобальт	1,785	1,789	1,617	1,605	—
Никель	1,654	1,658	1,497	1,485	—
Медь	1,537	1,541	1,389	1,378	9
Молибден	0,708	0,712	0,631	0,020	20
Серебро	0,558	0,562	0,496	0,486	25
Вольфрам	0,209	0,213	0,184	0,179	70

Таким образом, работая, например, с медным антикатодом при напряжении 20—25 kV, считают, что излучение состоит из α -лучей длиной

$$\lambda_{\alpha} = \frac{\lambda_{\alpha_1} + \lambda_{\alpha_2}}{2} = \frac{1,537 + 1,541}{2} = 1,539 \text{ \AA}$$

и β -лучей длиной

$$\lambda_{\beta} = 1,889 \text{ \AA}.$$

Для λ_{α} вычисляют среднюю арифметическую между α_1 и α_2 , так как обе волны имеют весьма большую интенсивность. Для λ_{β} принимают волну β_1 , так как β_2 обладает незначительной интенсивностью.

О причинах выбора того или иного излучения будет сказано дальше. Здесь же отметим, что рентгеновский луч, падая на металлическую пластинку, частично от нее отражается, частично же ею поглощается.

Закон отражения рентгеновских лучей будет рассмотрен ниже. Что касается поглощения, то значения интенсивности лучей I_0 (рис. 124) до прохождения через слой и интенсивности I после прохождения связаны между собой уравнением:

$$I = I_0 e^{\mu D},$$

где e — неперово число, D — толщина слоя в см, μ — коэффициент поглощения.

Приближенно можно принять, что коэффициент поглощения прямо пропорционален плотности ρ вещества, кубу атомного числа Z поглощаемого элемента и кубу длины волны λ , т. е.:

$$\mu = k \rho \lambda^3 z^3.$$

Следовательно, лучи с более короткими длинами волн проникают в большую толщу металла. Этим же уравнением можно объяснить также причину применения свинца ($z=82$) для защиты от рентгеновских лучей.

3. Отражение рентгеновских лучей

Основой структурного анализа металлов рентгеновскими лучами является закон их отражения от кристаллической решетки. Этот закон, сформулированный английскими учеными отцом и сыном Брэггами и русским ученым Вульфом, представляет собой исходный пункт рентгенографии металлов, без которого совершенно невозможно освоить и рентгеноанализ.

Представим себе, что на конгломерат атомов, расположенных в строго геометрическом порядке (рис. 125) и образующих, следовательно, кристаллическую решетку, падает пучок рентгеновских лучей P_1P_2 некоторой определенной длины волны λ . Лучи частично проникнут в кристалл и будут здесь поглощены. Частично же, отражаясь

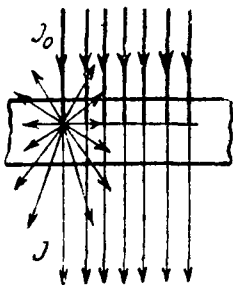


Рис. 124. Поглощение рентгеновских лучей

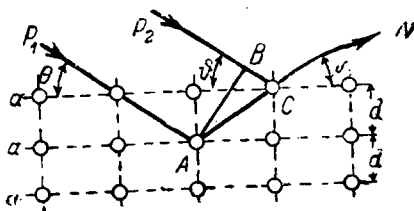


Рис. 125. Отражение рентгеновских лучей

от данной системы, они будут рассеиваться в различных направлениях. Однако интенсивность рассеянных лучей в различных направлениях будет неодинаковой. Среди различных направлений будет направление *максимальной интенсивности*, нахождение которого и составляет основную задачу рентгеноанализа.

Определение этого направления максимальной интенсивности отраженных лучей проще всего можно представить, если к рентгеновским лучам применить обычный закон отражения оптики, а кристалл рассматривать состоящим из ряда параллельных отражающих плоскостей aa , на которых расположены атомы. Тогда для направления максимальной интенсивности N должно быть соблюдено условие усиления интерференции падающих лучей P_1P_2 и отраженного N , т. е. отраженные лучи P_1 , встречаясь в точке C с отраженным лучом P_2 , должны совпасть с ним по фазе.

Совпадение же фаз возможно лишь в том случае, если разность пути Δ лучей P_1 и P_2 будет равна целому числу волн, т. е. при условии

$$\Delta = n\lambda,$$

где n — целое число.

Из рис. 125 имеем:

$$\Delta = AC - BC;$$

но

$$BC = AC \cos 2\theta$$

и следовательно,

$$\Delta = AC (1 - \cos 2\theta) = AC 2 \sin^2 \theta.$$

А так как

$$AC = \frac{d}{\sin \vartheta},$$

где d — расстояние между плоскостями, то

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta.$$

Это уравнение и представляет собой закон Брэгг-Вульфа отражения рентгеновских лучей от кристаллической решетки. На основании этого заключаем, что закон равенства углов падения и отражения ϑ сохраняет свою силу и для рентгеновских лучей, но отраже-

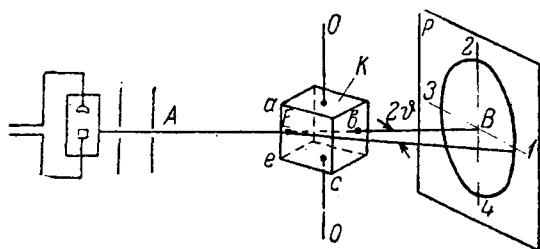


Рис. 126. Схема отражения рентгеновских лучей

ние, точнее — направление максимальной интенсивности отраженных лучей, возможно получить лишь при известных условиях; а именно: при заданной длине волны λ отражение возможно лишь при определенном отношении расстояния d между отраженными плоскостями и синусом угла от-

ражения. Светочувствительная пластинка покрывается вуалью под действием рассеянных лучей при различных положениях кристалла. Пятно же от луча максимальной интенсивности или, как говорят, пятно отраженного луча, зафиксировано на пластинке лишь в том случае, если ϑ , d и λ будут удовлетворять уравнению Брэгг-Вульфа.

Достаточно изменить один из членов уравнения, например уменьшить угол падения, или избрать кристалл с иным d , или же, наоборот, применить рентгеновский луч с иной длиной волны λ , как уравнение нарушится, и отражения не получится. Изменяя же одновременно два члена, например d и ϑ , возможно сохранить условия уравнения.

Обратимся к рис. 126. Представим себе, что из узкой щели диафрагмы выходит тонкий параллельный пучок рентгеновских лучей AB некоторой длины волны λ . Перпендикулярно к пучку поставлен экран P , например фотографическая пластинка. Возьмем какой-либо кристалл K , вырезанный так, что грань $abce$ совпадает с какой-нибудь кристаллической плоскостью. Мы можем себе представить весь кристалл состоящим из атомов, расположенных на ряде таких параллельных плоскостей $abce$, расстояние между которыми равно d . Поместим этот кристалл между диафрагмой и фотопластинкой так, чтобы его грань $abce$ была перпендикулярна пучку рентгеновских лучей. Отражения в этом случае от рассматриваемых кристаллографических плоскостей $abce$, конечно, не будет. Начнем теперь вращать кристалл вокруг оси $OO' \perp AB$. Когда кристаллографическая плоскость $abce$ составит с падающим пучком угол ϑ , который будет удовлетворять уравнению Брэгг-Вульфа

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta, \quad (1)$$

лишь тогда на экране P появится пятно 1 отраженного луча. Легко видеть, что при избранной длине волны λ такое условие может быть получено лишь при определенных размерах d .

Установив кристалл так, чтобы это условие соблюдалось, начнем теперь вращать кристалл вокруг оси AB , точка 1 начнет тогда передвигаться по окружности 1, 2, 3, 4 и, следовательно, луч $E-1$ зафиксирует на фотопленке окружность. Измерив радиус $B-1$ этой окружности и расстояние EB , легко определить угол ϑ из уравнения

$$\operatorname{tg} 2\vartheta = \frac{BI}{BE},$$

после чего вычисление d также не представит труда.

4. Метод Дебай-Шеррера

В рассмотренном выше примере для получения отражения рентгеновского луча длиной волны λ от плоскости кристалла нужно было соблюсти два условия: 1) кристалл должен был быть повернут вокруг оси OO так, чтобы образовался требуемый угол ϑ , и 2) расстояние между плоскостями должно было быть равным некоторой определенной величине. В монокристаллическом образце соблюдение таких условий представляет большие трудности. В поликристаллическом агрегате эти затруднения пропадают.

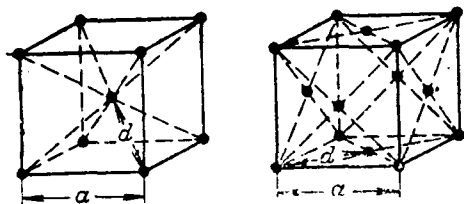


Рис. 127. Решетка простого куба

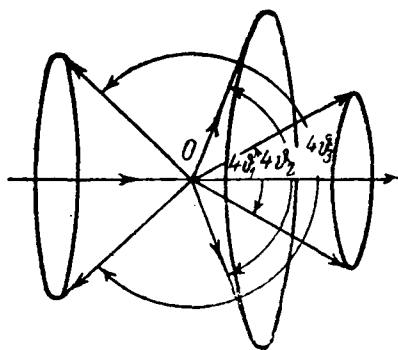


Рис. 128. Конуса отражения

Действительно, представим, что пучок pp монохроматических рентгеновских лучей омывает небольшой поликристаллический агрегат, состоящий из многих тысяч небольших кристалликов (зерен), различно ориентированных по отношению к падающему лучу.

Среди этого конгломерата различно ориентированных зерен всегда имеются такие, которые ориентированы так, чтобы удовлетворить уравнению Брэгг-Вульфа. Можно себе представить, что этот конгломерат состоит из зерен, повернутых на различный угол вокруг оси OO и оси AB (рис. 126). Среди них обязательно найдутся такие, которые будут ориентированы так, что их кристаллические плоскости составят угол ϑ с пучком.

Остается теперь рассмотреть второе условие. В кристалле можно себе представить большое количество кристаллических плоскостей с различными индексами hkl , следовательно, расположенных на различных расстояниях d друг от друга. Расстояния d плоскостей с индексом (hkl) при параметре ячейки a (рис. 127) выражаются следующими уравнениями:

для кубической системы

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}},$$

для тетрагональной системы

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + \left(\frac{al}{c}\right)^2}},$$

для гексагональной системы

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + hk + k^2) + \left(\frac{al}{c}\right)^2}},$$

для ромбической системы

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{\left(\frac{ch}{a}\right)^2 + \left(\frac{ck}{b}\right)^2 + l^2}}.$$

(2)

Следовательно, среди этих плоскостей также всегда найдутся такие, которые при заданной длине волны будут удовлетворять уравнению Брэгг-Вульфа.

В результате этого пучок лучей, омывающий поликристаллический агрегат, даст ряд «конусов отражения», схематически представленных на рис. 128.

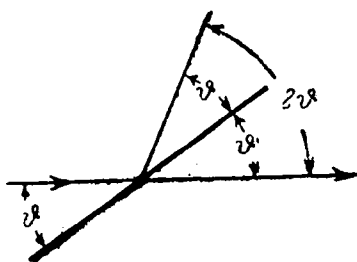


Рис. 129. Схема отражения от плоскости

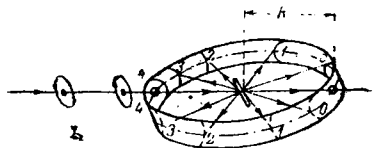


Рис. 130. Схема получения рентгенограммы на цилиндрической пленке

Угол при вершине такого конуса, как это видно из сопоставления рис. 128 с рис. 129, будет равен 4θ . Поверхность каждого конуса будет соответствовать отражению от какой-либо определенной плоскости.

Если окружить исследуемый образец фотопленкой (рис. 130), то на последней зафиксируются линии пересечения конусной и цилиндрической поверхностей. Такая пленка в развернутом виде приводится на рис. 131, которая и представляет собой рентгенограмму Дебай-Шеррера (независимо от указанных авторов этот метод одновременно был разработан Гуллем в США).

Сравнивая конечный результат рентгеновского анализа — рентгенограмму с результатом микроскопического анализа — с микрофотографией, можно прийти к заключению, что рентгеноанализ в чрезвычайной степени уступает микроанализу по своей наглядности. Рентгенограмма дает лишь эффект отражения рентгеновского луча от кристаллических плоскостей. По одному виду ее нельзя получить представления о точной структуре металлов — о расположении атомов в зернах. Для разрешения этой задачи такую рентгенограмму нужно еще расшифровать, а именно — произвести ее обмер и на основании этих данных рассчитать параметр и определить систему кристаллической решетки.

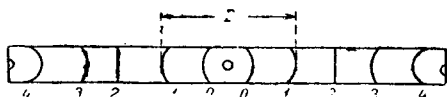


Рис. 131. Рентгенограмма в развернутом виде

5. Расшифровка Дебай-диаграммы

Первая операция расшифровки рентгенограммы Дебая состоит в измерении расстояния между линиями. Пусть это расстояние между двумя какими-либо симметрично расположенными линиями 1—1 равно D (рис. 131). Это расстояние соответствует дуге 1—1 с углом, равным 4ϑ . При диаметре камеры, равном $2R$, угол ϑ определится:

$$\vartheta = 360^\circ \cdot \frac{D}{2\pi R} \cdot \frac{1}{4} = 90^\circ \frac{D}{2\pi R}.$$

По величине этого угла уже просто определить величину $\sin \vartheta$. Определив его для ряда линий, нужно приступить к разрешению второй более трудной задачи — узнать, какой плоскости соответствует та или иная линия. Для этого в основном уравнении Брэгг-Вульфа величину d_{hkl} заменяем выражением (2). Для кубической системы имеем:

$$n\lambda = \frac{2a \sin \vartheta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

На основании предыдущего известно, что плоскости, индексы которых отличаются друг от друга целым делителем, например плоскости (001) и (002), (112) и (224), (013) и (026) и т. д., — кристаллографически равнозначны. Следовательно, в левой части основного уравнения отражения величину n можно принять равной единице, так как отражения первого порядка от плоскостей (002), (224), (026) и т. д. будут соответственно такими же, как и отражения второго порядка от плоскостей (001), (112), (013). Следовательно, уравнение Брэгг-Вульфа можно упростить, приняв в нем $n = 1$.

Тогда имеем

$$\lambda = \frac{2a \sin \vartheta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Произведя такую же замену величины d_{hkl} в уравнении (1) из уравнения (2) и принимая для них $n = 1$, имеем:

для кубической системы

$$\sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2),$$

для тетрагональной системы:

$$\sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left(h^2 + k^2 + \frac{a^2}{c^2} l^2 \right),$$

для гексагональной системы:

$$\sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right) = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left[\frac{4}{3} (h^2 + k^2 + hk) + \frac{a^2}{c^2} l^2 \right],$$

для ромбической системы:

$$\sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right).$$

(3)

Эти уравнения, представляющие собой весьма простую зависимость между индексами плоскостей и $\sin^2 \vartheta$, служат основой для решения второй задачи при расшифровке рентгенограмм Дебая, а именно — для индексации линий рентгенограммы. Для этого по $\sin^2 \vartheta$ определяют величину $\sin^2 \vartheta$. Сопоставляя их с уравнением (3), нетрудно в целом ряде случаев определить, каким плоскостям соответствует та или иная линия рентгенограммы. Например для случая кубической системы имеем:

для (001)	$\sin^2 \vartheta_1 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (0^2 + 0^2 + 1^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 1
для (011)	$\sin^2 \vartheta_2 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (0^2 + 1^2 + 1^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 2
для (111)	$\sin^2 \vartheta_3 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (1^2 + 1^2 + 1^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 3
для (002)	$\sin^2 \vartheta_4 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (0^2 + 0^2 + 2^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 4
для (012)	$\sin^2 \vartheta_5 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (0^2 + 1^2 + 2^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 5
для (112)	$\sin^2 \vartheta_6 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (1^2 + 1^2 + 2^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 6
для (022)	$\sin^2 \vartheta_7 = \frac{\lambda^2}{4a^2} (0^2 + 2^2 + 2^2) = \frac{\lambda^2}{4a^2}$	. 7

И если из опыта найдено:

для линии 1—1	$\sin^2 \vartheta_1 = 0,227$
„ „ 2—2	$\sin^2 \vartheta_2 = 0,454$
„ „ 3—3	$\sin^2 \vartheta_3 = 0,681$
„ „ 4—4	$\sin^2 \vartheta_4 = 0,908$

то легко сопоставить, что:

$$0,227 : 0,454 : 0,681 : 0,908 \Rightarrow 2 : 4 : 6 : 8, \text{ т. е., что}$$

линия 1—1	соответствует плоскости (011)
„ 2—2	„ (002)
„ 3—3	„ (112)
„ 4—4	„ (022)

В действительности проведение такой расшифровки представляет несколько большие трудности, так как кроме лучей α на рентгенограмме обычно присутствует еще и линия лучей β . Часть линий, как

это было уже видно и в предыдущем примере [линии (001), (111) и (012)], на рентгенограмме вообще не получаются. Линии лучей β можно соответствующими фильтрами сильно ослабить. Например, Глокер указывает фильтры для некоторых антикатодов, приведенные в табл. 8.

Таблица 8

Антикатод	Вещество фильтра	Толщина фильтра, мм	Количество ве- щества на 1 см ² , г
Железо . . .	Марганец . .	0,005	0,004
Медь	Никель	0,007	0,0067
Молибден . . .	Цирконий . . .	0,03	0,020
Серебро	Палладий . . .	0,03	0,036

Чаще же линии лучей β довольно просто отделяются от линий лучей α по признаку интенсивности: интенсивность лучей β меньше, чем лучей α . Однако линии лучей α для различных кристаллических плоскостей также имеют различную интенсивность. Этим обстоятельством всегда пользуются при расшифровке рентгенограммы.

6. Расшифровка интенсивности линий

Интенсивность I линии рентгенограммы зависит от нескольких факторов. Приближенно можно написать:

$$I = K \left[H \frac{T}{L} (\Sigma)^2 \right],$$

где K — коэффициент, а H , T , L и Σ — факторы, которые ниже будут рассмотрены каждый в отдельности.

Фактор H обуславливает число равноценных отражающих плоскостей. Таких плоскостей куба имеется шесть: (001), (010), (100), (00 $\bar{1}$), (0 $\bar{1}$ 0), (1 $\bar{0}$ 0); плоскостей октаэдра — восемь; ромбического додекаэдра — двенадцать и т. д. При беспорядочном расположении кристаллов совершенно безразлично, от какой из этих равноценных плоскостей отразится рентгеновский луч. Но чем больше число равноценных плоскостей, тем больше возможности отражения и тем, следовательно, интенсивнее будет отраженный луч. Фактор H для некоторых кристаллических плоскостей приведен в табл. 9 (по Глокеру).

Таблица 9

(hkl)	H	(hkl)	H	(hkl)	H
001	6	122	24	004	6
011	12	003	6	014	24
111	8	013	24	223	48
002	6	113	24	033	12
012	24	222	8	114	24
112	24	023	24	313	24
022	12	213	48	024	24

Фактор T , так называемый поляризационный фактор Томсона, учитывает интенсивность рассеивания атомов в различных направлениях и выражается уравнением:

$$T = 1 + \cos^2 2\theta.$$

На рис. 132 представлена кривая, характеризующая относительную величину этого фактора. При изменении ϑ от 0 до 90° фактор T меняется последовательно от 1 до 2, достигая своего минимума при $\vartheta = 45^\circ$.

Фактор L (Лоренца) учитывает, что отражение рентгеновского луча происходит не только при угле ϑ , но и при углах, отличающихся от него на очень малую величину. Он равен:

$$L = \frac{1}{\sin^2 \vartheta \cos \vartheta}$$

и изменение его в зависимости от угла ϑ представлено на рис. 133.

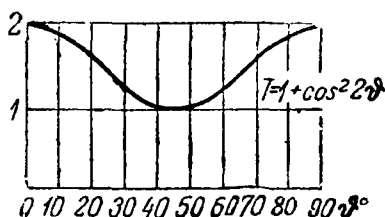


Рис. 132. Изменение фактора Томсона в зависимости от угла ϑ

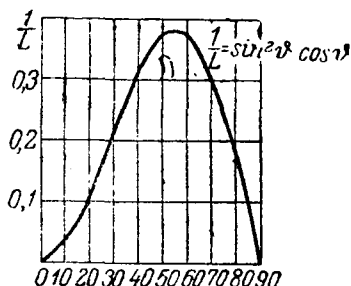


Рис. 133. Изменение фактора Лоренца в зависимости от угла ϑ

Наконец, обратимся к так называемому структурному фактору, характеризующему интенсивность отражения луча, зависящую от фазового соотношения волн, которое обуславливается взаимным расположением атомов в решетке. Он равен:

$$\Sigma = Z_1 e^{2\pi i(x_1 h + y_1 k + z_1 l)} + Z_2 e^{2\pi i(x_2 h + y_2 k + z_2 l)},$$

где Z_1 , Z_2 и т. д. — атомные номера элементов, hkl — индексы отражающей плоскости, x_1 , y_1 , z_1 — координаты атома I элемента, x_2 , y_2 , z_2 — координаты атома II элемента.

Не входя здесь в рассмотрение вывода этого уравнения, продемонстрируем лишь, как им пользуются.

Рассмотрим случаи, когда исследуется чистый металл, имеющий решетку центрированного куба. Элементарному кубу принадлежат два атома. Координаты первого, расположенного в углу, равны:

$$x_1 = 0; y_1 = 0; z_1 = 0.$$

Координаты центрального атома:

$$x_2 = \frac{1}{2}; y_2 = \frac{1}{2}; z_2 = \frac{1}{2}.$$

Поскольку оба атома относятся к одному и тому же элементу, атомные числа их одинаковы:

$$Z_1 = Z_2$$

и следовательно, их можно вынести за скобку и не принимать во внимание при расчете интенсивности. Тогда имеем:

$$\Sigma = e^{2\pi i(oh + ok + ol)} + e^{2\pi i\left(\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}l\right)} = 1 + e^{\pi i(h + k + l)}.$$

По формуле Муавра определяем:

$$e^{\pi i (h+k+l)} = \cos \pi (h+k+l) + i \sin \pi (h+k+l).$$

Поскольку индексы hkl являются целыми числами, постольку

$$i \sin \pi (h+k+l) = 0$$

и следовательно,

$$\Sigma = 1 + \cos \pi (h+k+l).$$

Здесь возможны два случая: сумма индексов представляет четное число. Если сумма индексов четное число, то

$$\Sigma = 1 + 1 = 2,$$

если же нечетное число, то

$$\Sigma = 1 - 1 = 0.$$

Таким образом на рентгенограмме решетки централизованного куба у чистых металлов будут отсутствовать линии отражения от плоскостей, сумма индексов которых является нечетным числом. По этой причине в примере, разобранным в предыдущем параграфе, на рентгенограмме были пропущены линии плоскостей (001), (111), (012) и т. д.

Рассмотрим второй случай, когда исследуется чистый металл, имеющий решетку куба с центрированными гранями. Элементарный куб в этом случае имеет четыре атома с координатами:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0; y_1 = 0; z_1 = 0 \\ x_2 &= \frac{1}{2}; y_2 = \frac{1}{2}; z_2 = 0 \\ x_3 &= \frac{1}{2}; y_3 = 0; z_3 = \frac{1}{2} \\ x_4 &= 0; y_4 = \frac{1}{2}; z_4 = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Все атомы из одного и того же элемента, следовательно, их атомные числа равны

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_4$$

и во внимание приниматься не будут. Имеем:

$$\begin{aligned} \Sigma &= e^{2\pi i (oh+ok+ol)} + e^{2\pi i \left(\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}l\right)} + \\ &+ e^{2\pi i \left(\frac{1}{2}h + ok + \frac{1}{2}l\right)} + e^{2\pi i \left(oh + \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}l\right)} = \\ &= 1 + e^{\pi i (h+k)} + e^{\pi i (h+l)} + e^{\pi i (k+l)}. \end{aligned}$$

Применяя формулу Муавра, имеем:

$$\Sigma = 1 + \cos \pi (h+k) + i \sin \pi (h+k) + \cos \pi (h+l) + i \sin \pi (h+l) + \cos \pi (k+l) + i \sin \pi (k+l) = 1 + \cos \pi (h+k) + \cos \pi (h+l) + \cos \pi (k+l),$$

так как синусы целых π равны нулю. В этом уравнении легко видеть, что при всех четных индексах

$$\Sigma = 1 + 1 + 1 + 1 = 4,$$

при всех нечетных индексах:

$$\Sigma = 1 - 1 - 1 - 1 = -2$$

и, наконец, при смешанных индексах:

$$\Sigma = 0.$$

Следовательно, для решетки куба с центрированными гранями на рентгенограмме чистых металлов будут отсутствовать линии отражения тех плоскостей, которые имеют смешанные индексы, например: (001), (112) и т. д. (ноль принимают за четный индекс).

Отсутствие одних линий для случая решетки центрированного куба и других линий для случая решетки куба с центрированными гранями позволяет очень быстро ориентироваться в рентгенограммах при определении системы решетки.

Рассмотрим теперь случай, когда исследуемый объект представляет собой не чистый металл, а сплав, атомы которого занимают определенные места в решетке. Например рассмотрим центрированный куб, в центре которого расположен атом цинка, а в углах — атомы серебра. Координаты атомов серебра равны:

$$x_1 = 0; \quad y_1 = 0; \quad z_1 = 0.$$

Координаты же атомов цинка равны:

$$x_2 = \frac{1}{2}; \quad y_2 = \frac{1}{2}; \quad z_2 = \frac{1}{2}.$$

В первом примере было показано, что для случая центрированного куба на рентгенограмме получаются лишь линии тех плоскостей, сумма индексов которых есть четное число. Принимая атомный номер для серебра $Z_1 = 47$ и для цинка $Z_2 = 30$, можно для таких плоскостей определить величину структурного фактора:

$$\Sigma = 1 \cdot 47 + 1 \cdot 30 = 77.$$

Для тех же плоскостей, сумма индексов которых есть число нечетное, имеем:

$$\Sigma = 1 \cdot 47 + (-1 \cdot 30) = 17,$$

т. е. в этом случае при разнородных атомах на рентгенограмме появляются и линии этой группы плоскостей. Это так называемые *сверхструктурные линии*. Интенсивность этих линий значительно ослаблена. Однако наличие их позволяет сделать вполне определенное заключение о природе сплава, а именно — что сплав представляет твердый раствор, в котором атомы обоих элементов расположены в определенных местах решетки.

Из рассмотренного в этом параграфе видно, что различная интенсивность отдельных линий рентгенограммы при поверхностном обзоре усложняет ее. При более же подробном анализе это явление дает чрезвычайно существенные данные для расшифровки тонкой структуры сплава.

7. Методы съемки рентгенограмм Дебая

При съемке рентгенограммы в цилиндрической камере (по схеме рис. 130) получают отражения от плоскостей, индексы которых при заданной длине волны и параметре решетки удовлетворяют согласно уравнению (3) условию

$$\sin^2 \vartheta \leq 1.$$

При исследовании тонкого цилиндрического образца нужно при измерении расстояния между линиями рентгенограммы вводить неко-

торую поправку в силу следующего явления. Рентгеновские лучи (рис. 134), падая на исследуемый объект, отражаются в случае сильно поглощающего вещества в виде линии шириной AB . В случае же менее поглощающего вещества ширина линии увеличивается до AC , так как в этом случае в отражении принимают участие более глубокие слои. Измеряя расстояние между линиями, от края одной до края другой или же от середины одной до середины другой, неизбежно получают ошибку. Для исправления ее предложено несколько формул:

$$D_{испр.} = D_n - 2\rho, \quad (a)$$

где D_n — расстояние между наружными краями линий (длины дуги AA'), 2ρ — диаметр исследуемого объекта, $D_{испр.}$ — исправленное расстояние между линиями.

$$D_{испр.} = D_0 - \rho(1 + \cos 2\vartheta), \quad (б)$$

где D_0 — расстояние между серединами линий;

$$D_{испр.} = D_\epsilon - 2\epsilon\rho \cos 2\vartheta, \quad (в)$$

где D_ϵ — расстояние между внутренними краями линий (длина дуги CC'), $\epsilon = 0,6—1,0$ — коэффициент, зависящий от поглощаемой способности вещества.

Очень часто вместо цилиндрической пленки рентгенограмма снимается на плоской пленке, согласно схеме рис. 135. В этом случае на рентгенограмме фиксируются или линии плоскостей малых углов отражения (пленка AB) или же линии плоскостей больших углов отражения (пленка $A'B'$). Второй метод часто называют методом обратных лучей.

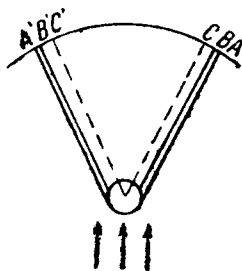


Рис. 134. Ширина линии рентгенограммы

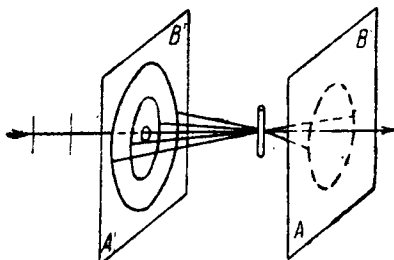


Рис. 135. Съемка рентгенограммы на плоскую пленку

Рентгенограмму можно снимать не только с цилиндрического образца, но и со шлифа, так, как это для случая цилиндрической пленки представлено на рис. 136. В этом случае нужно съемку производить дважды: один раз при положении образца AA , для получения правой стороны рентгенограммы, а второй — при положении образца BB , для получения левой части рентгенограммы. Иногда возможно ограничиться односторонней съемкой, однако расчет рентгенограмм в этом случае менее точен. Угол ψ , составляемый плоскостью шлифа и первичным лучом, должен быть меньше двойного минимального угла отражения $\vartheta_{\min}$.

Если

$$2\vartheta_{\min} > \psi,$$

то часть линий на рентгенограмме не получится вследствие поглощения этих лучей.

Применяются камеры, в которых угол $\psi = 90^\circ$. При такой установке (рис. 137) получается двойная рентгенограмма для углов отражения $\vartheta \geq 45^\circ$.

Наконец, шлифы могут сниматься и на плоскую пленку обратными лучами, а в случае достаточно тонких объектов — и прямыми лучами.

8. Пример расчета рентгенограммы

На рис. 141 дана рентгенограмма алюминия, заснятая лучами $\text{FeK}\alpha\beta$ в цилиндрической камере диаметром, равным $2R = 59,2$ мм.



Рис. 136. Съемка шлифа

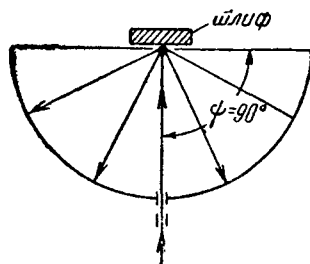


Рис. 137. Съемка камеры Делингера

Прежде всего линии такой рентгенограммы нужно перенумеровать и эти номера внести в графу I табл. 10. Затем необходимо на глаз оценить интенсивность линий, разбив их, примерно, на три группы:

- 1) очень сильная,
- 2) сильная,
- 3) средняя,

и этими данными заполнить графу II.

При помощи линейки или специального компаратора измеряют с точностью $0,10\text{--}0,05$ мм расстояния между обозначенными линиями, так называемый диаметр D дебаевских колец. Эти данные заносят в графу III.

Диаметры D определялись по наружным краям линий, и поэтому для исправления применяем формулу (а) предыдущего параграфа. Диаметр образца $2r = 0,8$ мм. Исправленные значения диаметров Дебая заносят в графу VI.

На основании этих данных согласно уравнению вычисляется угол ϑ , а на основании его — $\sin \vartheta$ и $\sin^2 \vartheta$. Результаты этих вычислений заносятся в графы VII, VIII и IX.

Сопоставляя величины $\sin^2 \vartheta$ и руководствуясь данными интенсивности графы II, подбирают индексы плоскостей, соответствующих тому или иному из дебаевских диаметров, подразделяя при этом, какое из колец относится к лучам $\text{K}\beta$ и $\text{K}\alpha$ (антиматериальный). Результаты занесены в графу XI.

Все данные, помещенные в табл. 10, позволяют теперь уже заключить, что решетка исследуемого вещества является центрогранным кубом, так как в рентгенограмме отсутствуют линии тех плоскостей, сумма индексов которых нечетное число. Они же позволяют вычислить параметр этой решетки $a = 4,04$.

Расчет рентгенограммы для алюминия; лучи FeK $\alpha\beta$

Диаметр камеры 59,2 мм

№ линии	Интенсивность	$D_{изм.}$ мм	$\vartheta_{изм.}$	$\cos 2\vartheta$	$D_{испр.}$ мм	$\vartheta_{испр.}$	$\sin \vartheta$	$\sin^2 \vartheta$	$h^2+k^2+l^2$	hkl
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1	Средняя	45,8	22°10'	0,715	45,57	22°03'	0,3750	0,1407	—	(111) β
2	Очень сильная . . .	50,8	24°35'	0,653	50,53	24°28'	0,4141	0,1715	3	(111) α
3	Средняя	53,5	25°54'	0,627	53,2	25°46'	0,4340	0,1883	—	(002) β
4	Очень сильная . . .	59,4	28°45'	0,537	59,00	28°34'	0,4782	0,2287	4	(002) α
5	Средняя	77,6	37°33'	0,256	77,00	37°17'	0,6040	0,3700	—	(022) β
6	Сильная	87,4	42°18'	0,093	86,93	42°0'	0,6691	0,4480	8	(022) α
7	Средняя	94,4	45°42'	0,025	93,62	45°19'	0,7112	0,5055	—	(113) β
8	Очень сильная . . .	107,2	51°54'	0,388	106,71	51°41'	0,7844	0,6155	11	(113) α
9	Сильная	114,0	55°12'	0,506	113,61	55°06'	0,8191	0,6710	12	(222) α
10	Средняя	144,2	69°48'	0,761	144,01	69°45'	0,9381	0,8810	—	(004) β
11	Сильная	148,0	71°36'	0,801	147,84	71°33'	0,9486	0,9020	16	(004) α

Наконец, для проверки правильности сделанного заключения о кристаллической системе исследованного объекта и параметра ячейки полезно бывает еще подсчитать число атомов N в элементарной ячейке, руководствуясь следующими соображениями. Общая масса атомов в ячейке, отнесенная к единице объема, должна равняться плотности исследованного вещества. Обозначим $\rho = 2,7$ — плотность алюминия, $A = 26,97$ — атомный вес алюминия, $m_H = 1,65 \cdot 10^{-24}$ — масса атома водорода, $A \cdot m_H$ — масса одного атома алюминия, $V = a^3$ — объем ячейки.

Имеем:

$$\rho = \frac{N \cdot A \cdot m_H}{V},$$

откуда

$$N = \frac{\rho a^3}{A m_H} = \frac{2,7 \cdot (4,04 \cdot 10^{-8})^3}{26,97 \cdot 1,65 \cdot 10^{-24}} \cong 4,$$

что соответствует центрогранному кубу.

9. Задачи рентгеноанализа

Рассмотренный пример расшифровки рентгенограммы Дебая позволил нам определить кристаллическую структуру металла. Но следует иметь в виду, что незнакомую кристаллографическую систему расшифровать одним методом Дебая нельзя. Для этого нужно использовать еще и другие методы и в первую очередь метод вращения и метод Лауэ, которые будут рассмотрены ниже. Необходимо лишь отметить, что, с одной стороны, нельзя переоценивать значения рентгеноанализа структуры поликристаллического агрегата, а с другой стороны, нельзя и не дооценивать этот замечательный метод. Ниже будет показано, какие тонкости в изменении кристаллической структуры, а следовательно, и в изменении свойств металлов обнаруживаются рентгеноанализом. Механизм пластической деформации, механизм образования и распада твердых растворов, наличие остаточных напряжений, ориентация кристаллов при затвердевании сплавов — являются основными задачами, разрешаемыми особенно убедительно и точно рентгеноанализом, хотя данный перечень далеко не исчерпывает задачи рентгеноанализа. Очень часто по отношению к микроанализу предъявляли требования определять, например, химический состав сплава, хотя ясно, что микроанализ не может заменить собою химического анализа. Каждый из этих методов имеет свои задачи. Точно так же и рентгеноанализ, который по существу еще переживает период переселения из лаборатории физики в инженерные лаборатории, не заменяет других методов исследования металлов. Рентгеноанализ является необходимым методом наряду с другими известными способами испытания металлов, и сила и значение его тем больше, чем совершеннее освоены другие методы анализа.

10. Примеры рентгенограмм

Для облегчения расшифровки рентгенограмм и ориентации при их рассмотрении на рис. 138—148 приводятся рентгенограммы некоторых типичных структур. Все рентгенограммы засняты на цилиндрическую пленку при диаметре камеры $2R = 57,8$ мм.

Рис. 141, 146 и 148 представляют рентгенограммы металлов, кристаллизующихся в систему куба с центрированными гранями. Сравнивая рентгенограмму меди и алюминия, заснятых медными лучами, видно, что линии остались одни и те же. Лишь в силу того, что параметр алюминия больше параметра меди, все линии рентгенограммы сдвинуты к центру.

На рис. 144 и 145 дана рентгенограмма кремния, имеющего алмазную решетку, на рис. 142 — олова, имеющего тетрагональную решетку, и на рис. 143 — цинка, имеющего гексагональную решетку. Легко видеть, что рентгенограммы во всех случаях сильно отличаются друг от друга, и следовательно, система кристаллов может легко различаться уже при общем просмотре диаграммы.

Таблица 11

Вычисление положения дебаевских колец для кубической решетки

$$a = 4,0 \text{ \AA}; \sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2); \lambda = 1,539 \text{ \AA} (K_\alpha - \text{меди})$$

следовательно:

$$\frac{\lambda^2}{4a^2} = 0,037$$

hkl	$h^2 + k^2 + l^2$	$\sin^2 \vartheta$	hkl	$h^2 + k^2 + l^2$	$\sin^2 \vartheta$
001	1	0,037	014	17	0,629
011	2	0,074	223	17	0,629
111	3	0,111	033	18	0,666
002	4	0,148	114	18	0,666
012	5	0,185	313	19	0,703
112	6	0,222	024	20	0,740
022	8	0,296	214	21	0,777
122	9	0,333	323	22	0,814
003	9	0,333	224	24	0,888
013	10	0,370	034	25	0,925
113	11	0,407	005	25	0,925
222	12	0,444	314	26	0,962
023	13	0,481	015	26	0,962
213	14	0,518	333	27	0,999
004	16	0,592	115	27	0,999

Таблица 12

Вычисление положения дебаевских колец для тетрагональной решетки

$$a = 4,0 \text{ \AA}; \frac{c}{a} = 0,67; \sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left(h^2 + k^2 + l^2 \frac{a^2}{c^2} \right); \lambda = 1,539 \text{ \AA} (K_\alpha - \text{меди}),$$

следовательно:

$$\frac{\lambda^2}{4a^2} = 0,037$$

hkl	$h^2 + k^2 + l^2 \frac{a^2}{c^2}$	$\sin^2 \vartheta$	hkl	$h^2 + k^2 + l^2 \frac{a^2}{c^2}$	$\sin^2 \vartheta$
100	1	0,037	300	9	0,333
110	2	0,074	102	9,8	0,363
101	2,2	0,081	130	10	0,370
011	3,2	0,118	221	10,2	0,377
200	4	0,148	112	10,8	0,400
111	4,2	0,155	301	11,2	0,415
120	5	0,185	131	12,2	0,454
121	6	0,222	202	12,8	0,474
201	6,2	0,229	230	13	0,481
220	8	0,296	212	13,8	0,511
002	8,8	0,325	и т. д.	и т. д.	и т. д.



Рис. 138. Рентгенограмма поваренной соли (лучи $K - Fe_{\alpha\beta}$)



Рис. 139. Рентгенограмма мягкой стали

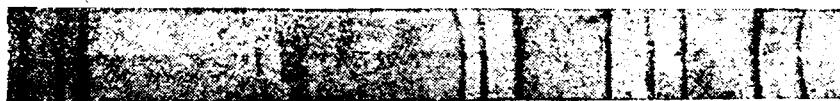


Рис. 140. Рентгенограмма аустенита



Рис. 141. Рентгенограмма алюминия



Рис. 142. Рентгенограмма олова



Рис. 143. Рентгенограмма цинка

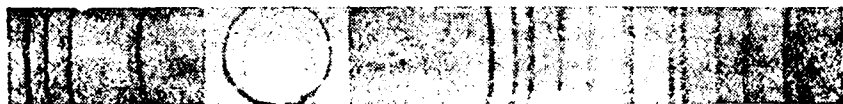


Рис. 144. Рентгенограмма кремния

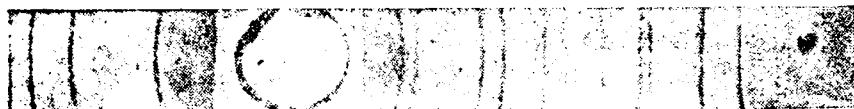


Рис. 145. Рентгенограмма кремния (лучи Co)



Рис. 146. Рентгенограмма меди

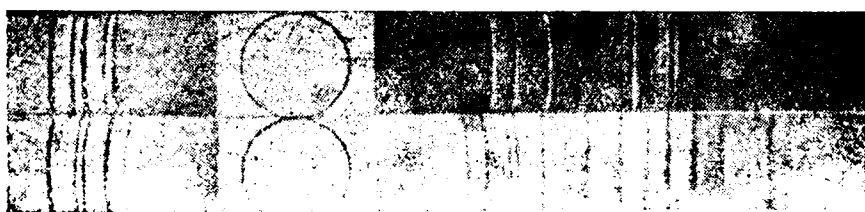


Рис. 147. Рентгенограмма сплавов меди и серебра



Рис. 148. Рентгенограмма серебра

Сравнивая рентгенограмму кремния (рис. 144), заснятую один раз железными, а другой кобальтовыми лучами (рис. 145), мы наблюдаем согласно уравнению Брэгг-Вульфа сдвиг линий к центру для slučaj съемки лучами, имеющими более короткие длины волн.

Наконец, на рис. 138 представлена рентгенограмма поваренной соли, кристаллизующейся в простую кубическую решетку. Поваренная соль очень часто применяется для градуировки камер.

Приводимые табл. 11—13 также служат для облегчения процесса расшифровки рентгенограммы.

Таблица 13

Вычисления положения дебаевских колец для гексагональной решетки

$$a = 4,0 \text{ Å}; \frac{c}{a} = 1,633; \sin^2 \vartheta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left[\frac{4}{3} (h^2 + k^2 + hk) + l^2 \frac{a^2}{c^2} \right]; \lambda = 1,539 \text{ Å}$$

(K_{α} — меди)

следовательно:

$$\frac{\lambda^2}{4a^2} = 0,037$$

hkl	$\frac{4}{3} (h^2 + k^2 + hk)$	$l^2 \frac{a^2}{c^2}$	$\frac{4}{3} (h^2 + k^2 + hk) + l^2 \frac{a^2}{c^2}$	$\sin^2 \vartheta$
001	0	0,375	0,375	0,014
100	1,33	0	1,33	0,041
002	0	1,5	1,5	0,055
101	1,33	0,37	1,7	0,063
102	1,33	1,5	2,83	0,104
003	0	3,27	3,37	0,125
110	4	0	4	0,148
111	4	0,37	4,37	0,162
103	1,33	0,37	4,70	0,174
020	5,33	0	5,33	0,198
112	4	1,5	5,5	0,204
021	5,33	0,37	5,7	0,211
004	0	6	6	0,222
202	5,33	1,5	6,83	0,253
104	1,33	6	7,33	0,272
113	4	3,37	7,37	0,273
203	5,33	3,37	8,70	0,322
120	9,33	0	9,33	0,345
005	0	9,37	9,37	0,346
121	9,33	0,37	9,7	0,359
114	4	6	10	0,370
и т. д.	и т. д.	и т. д.	и т. д.	и т. д.

11. Определение величины кристаллитов

Определение величины зерен в поликристаллическом металле, величина которых превышает 10^{-3} см, проще всего производится при помощи микроанализа. Для более мелких зерен, имеющих поперечник меньше 10^{-3} см, микроскоп может вскрыть величину зерна лишь при условии применения ультрафиолетовых лучей (Лукас). Однако и этот способ, дающий увеличение до $2 \cdot 10^4$, применим лишь для зерен, поперечник которых не менее 10^{-5} см. Для более мелких зерен необходимо прибегать к помощи рентгеновского анализа.

Определение величины зерна по диаграмме Дебая основано на том, что если поперечник зерен меньше 10^{-5} см, то линии Дебая по-

лучаются более широкими. Согласно предложению Лауэ (2), операция производится в следующем порядке. При помощи микрофотометра регистрируется интенсивность линии Дебая, как это представлено на рис. 149. Характеристикой служит величина ab , соответствующая интенсивности J , равной половине максимальной. Обозначим величину ab через B , т. е.

$$ab = B.$$

Согласно Лауэ, прежде всего определяют величину

$$\eta = \frac{1}{3\pi} \left[B \cos \frac{\vartheta}{4} - \frac{1}{B} \left(\pi \frac{r}{R} \right)^2 \cos \frac{\vartheta}{4} \right],$$

где ϑ — угол отражения, r — радиус исследуемого цилиндрического образца, R — радиус камеры.

Эта величина подставляется во второе уравнение:

$$\eta = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{m_1 a^2}\right)^2 + \left(\frac{k}{m_2 b^2}\right)^2 + \left(\frac{l}{m_3 c^2}\right)^2}{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2}},$$

где λ — длина волны, h, k, l — индексы плоскости, a, b, c — параметр ячейки для общего случая, m_1, m_2, m_3 — искомые величины, указывающие, во сколько раз ребро зерна вдоль каждого параметра больше последнего.

Для кубической решетки $a = b = c$ формула упрощается:

$$\eta = \frac{\lambda}{4\pi a} \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{k}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{l}{m_3}\right)^2}{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Обычно для облегчения расчетов вычисляют ширину B трех линий, соответствующих плоскостям $(h00)$, $(0k0)$ и $(00l)$. На основании этого вычисляют m_1, m_2, m_3 и, умножая их соответственно на a, b и c (для кубической решетки a), определяют размеры зерна am_1, bm_2 и cm_3 в трех направлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глоккер, Рентгеновские лучи и испытание материалов. Пер. под ред. Н. Я. Селякова и Я. И. Френкеля, 1932.
2. Лауэ, Ergebnisse, II, 8, 115—117.

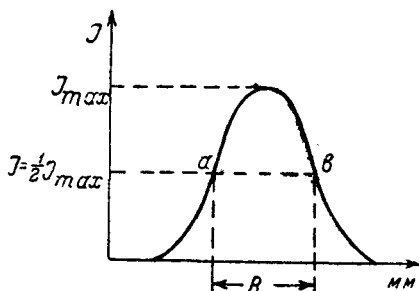


Рис. 149. Определение интенсивности линий

ГЛАВА IV

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

1. Электрические лабораторные печи

а. Материал печей. Главным требованием, предъявляемым к лабораторным печам, является легкость регулировки температуры. Из всевозможных видов печей лучше всех удовлетворяют этому требованию печи электрические, которые и получили общее распространение в лабораториях.

Электрические лабораторные печи строятся различных конструкций в зависимости от характера работы печи и от материалов, из которых печь построена. При проектировании такой печи прежде всего необходимо задаться максимальной температурой, которую должна развивать печь. Зная эту температуру и задавшись еще площадью рабочего пространства, легко подсчитать требуемую мощность печи, пользуясь данными табл. 14 (Пирани).

Таблица 14

Ватт на 1 см ²	Максимальная температура °C	Ватт на 1 см ²	Максимальная температура °C
0,4	400	3,5	1400
0,8	600	4,5	1600
1,3	800	5,7	1800
1,9	1000	7,0	2000
2,6	1200	11,0	2500

Значения, указанные в табл. 14, имеют, конечно, лишь примерную точность и выведены для среднего качества тепловой изоляции печи в предположении, что при температуре рабочего пространства не выше 1000° температура внешней поверхности печи не превысит 100°.

Определив мощность W печи и обозначая напряжение V электрической сети, легко подсчитать потребное число ампер:

$$J = \frac{W}{V}$$

и необходимое сопротивление печи:

$$r = \frac{V}{J}.$$

По этим данным можно уже рассчитать размеры обмотки печи и данные регулировочного реостата, пользуясь табл. 15 (Пирани). В этой таблице даны величины удельного сопротивления материалов при 20, 100 и 1500°.

6. Печи сопротивления с металлической обмоткой. Типичным представителем таких печей является печь системы Гереуса, изображенная на рис. 150. Она состоит из фарфорового цилиндра *a*, на который накручена лента платиновой фольги толщиной около 0,007 мм. Применение платиновой фольги объясняется тем, что она дает большую поверхность соприкосновения с фарфоровым цилиндром, а это обстоятельство обеспечивает более равномерный нагрев, позволяет легче регулировать температуру и уменьшает расход платины.

Цилиндр *a* вставляется в шамотовый цилиндр и прикрепляется к нему при помощи шамотовых колец. Все эти части вставляются в железный цилиндр *b*, а промежуток заполняется материалом, плохо проводящим тепло.

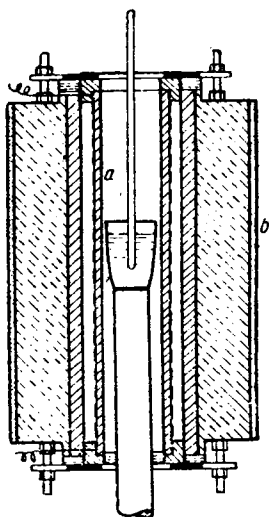


Рис. 150. Печь системы Гереуса

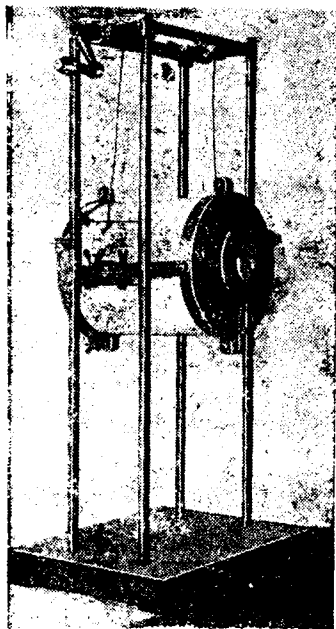


Рис. 151. Печь системы Гереуса

Печи Гереуса изготовляются различных конструкций, в зависимости от назначения, при этом максимальная температура в рабочем пространстве может доводиться до 1300°. Эту температуру следует считать предельной; нормальной же температурой при продолжительной работе печи следует считать 1000—1100°.

Печи обычно устанавливаются в станках, позволяющих передвигать и вращать самую печь (рис. 151).

По такому же принципу можно построить электрическую печь без применения столь дорогого материала, как платина. Для более низких температур, не превышающих 600—700°, можно пользоваться никелиновой, реотановой, железной и т. п. обмоткой, для более высоких температур эти материалы уже непригодны, так как быстро окисляются и перегорают.

Существуют конструкции печей, в которых этот дефект устраняется тем, что промежуток между шамотовым и фарфоровым цилиндрами заполняют каким-либо нейтральным газом, например водородом и т. п. (табл. 15). Пользование такими печами, конечно, ограничено и

возможно лишь в тех лабораториях, где имеются установки для получения этих газов.

В последние годы все чаще применяют для обмотки печей нихромовую проволоку. Нихром, представляющий собой сплав никеля и хрома, весьма стоек при высоких температурах. Для нихромовых печей гарантируется температура в 1000° .

в. Угольные печи сопротивления. Еще более простой конструкцией отличаются электрические печи, в которых фарфоровый цилиндр с металлической нагревательной обмоткой заменен цилиндром, материал которого электропроводен. При пропускании тока через такой цилиндр последний разогревается и накаливается.

В качестве материала для изготовления таких цилиндров может служить *силит*, если температура печи не будет превышать 1400° . Силит представляет собой карборундовую композицию с большим удельным сопротивлением, весьма твердую, но легко поддающуюся обработке резцом.

Силитовые цилиндры изготавливаются различных диаметров, начиная с 50 мм и более. Для лучшего контакта с подводящими ток проводами концы силитовых цилиндров часто покрывают металлической пленкой и прикрепляют к ним провода или непосредственно или же пользуясь специальными зажимами.

Наподобие силитовых печей можно сконструировать печи с угольными или графитными цилиндрами. Эти печи имеют то преимущество, что максимальная температура нагрева для них повышается до 3000° . Но эти печи имеют и некоторые недостатки, а именно: 1) при накаливании угольный или графитный цилиндр постепенно стораёт и требует замены новым; 2) внутри цилиндра постоянно имеется науглероживающая атмосфера и 3) благодаря малому электрическому сопротивлению этих цилиндров печь требует ток низкого напряжения и большой силы, что приводит к необходимости применять трансформатор. К неудобствам указанной печи следует еще отнести высокий коэффициент расширения угля, что особенно становится заметным при работе с длинными цилиндрами.

Наиболее распространенным типом угольной электрической печи является так называемая криптольная печь (рис. 152). В этой печи материалом, через который пропускают ток, служит толченый уголь. Лучше всего применять толченый ретортный кокс или толченые угли, обычно употребляющиеся для вольтовой дуги. Уголь должен быть измельчен не очень крупно, но и не очень мелко; лучшим размером считают зерна, имеющие 2—3 мм в поперечнике. Такой уголь засыпается между шмотовыми цилиндрами *a* и *b*. Снизу и сверху подводятся два металлических контакта *c*. Дабы предотвратить нагрев контактов, сечение угля снизу и сверху увеличено. Наибольший нагрев будет в месте наименьшего сечения засыпанного угля *l*. Благодаря большому удельному сопротивлению толченого угля, этой печью можно пользоваться и при высоковольтном токе. Так, например, печь размеров, указанных на рис. 152, потребляя 12 kW при 220 V, развивала через 3—4 часа температуру в 1600° .

К недостаткам этой печи следует отнести опять-таки науглероживающую атмосферу внутри печи, выгорание угля, который необходимо периодически добавлять, и, наконец, большое изменение сопротивления печи при разогревании, а также при засыпке свежего угля. При пользовании углем, крупинки которого имеют неодинаковые размеры, при неравномерно плотной засыпке угля в печи образуется неравномерный нагрев, который помимо прочих неудобств весьма часто разрушает цилиндры.

Криптольные печи чаще всего применяются как плавильные печи — для приготовления сплавов. В качестве таких печей очень хорошо работают печи типа, указанного на рис. 153. Железный кожух *a* обмазывается смесью глины с шамотовой мукой *b*, как это указано на чертеже. Пространство между тиглем и обмазкой засыпается углем, и ток подводится двумя угольными стержнями. Работа с такой печью чрезвычайно проста.

Что касается максимальной темпера-

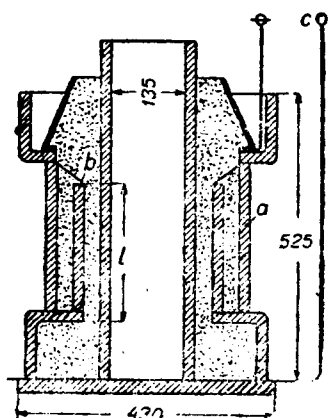


Рис. 152. Криптольная печь

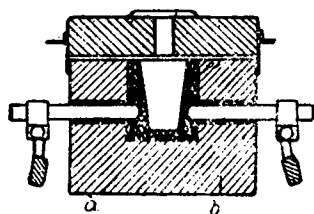


Рис. 153. Криптольная печь

туры, развиваемой в криптольных печах, то она всецело зависит от огнеупорности материала, из которого сделана самая печь. Поднять температуру выше 1600—1700° без повреждения этих печей удастся редко.

Для работ при высоких температурах — до 3300° — можно применять печь типа, предложенного Тамманном. Одна из конструкций этой печи подробно описана Левенштейном¹. Печь Тамманна является короткозамкнутой печью сопротивления, причем роль последнего выполняет угольный цилиндр. Устройство печи следующее. Полый угольный цилиндр *A* (рис. 154) охвачен разрезным латунным конусом *B*; нажимное кольцо *D* поворотом винта производит прижатие конуса *B* к цилиндру *A*. Во избежание оплавления металлических частей при нагревании печи, последняя снабже-

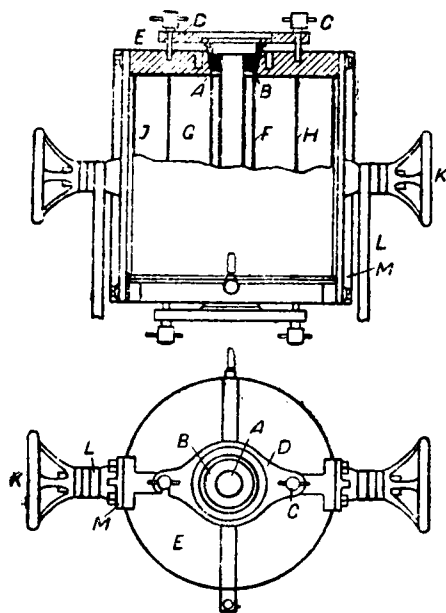


Рис. 154. Печь системы Тамманна

на щеками *E*, через которые для охлаждения пропускается вода. Нагревательный цилиндр *A* находится внутри второго, тоже угольного, цилиндра *F*, играющего роль экрана. За этим цилиндром идет слой угольного порошка *G*, заполняющий пространство между ним и шамотным цилиндром *H*. Далее следует слой асбеста и, наконец, металлический кожух печи.

¹ Löwenstein, Z. Anorgan. Chemie, V. 154, S. 173, 1926.

Вращение печи вокруг ее горизонтальной оси осуществляется поворотом колес *К*. Нажимом последних, кроме того, достигается плотное прилегание подводящих ток проводов. Смена цилиндров сопротивления производится весьма просто: под латунное кольцо *В* просовывают рычажок и вытаскивают его вместе с угольной трубкой.

Фирмы *Ruhrstrat* и *Elektroschaltwerk* строят печи этого типа, потребляющие для нагревания угольного цилиндра ток силою от нескольких сот до нескольких тысяч ампер при вторичном напряжении 5—20 V. Регулирование нагрева такой печи производится при помощи многоступенчатого трансформатора. Потеря энергии при этом управлении печью будет незначительная. На рис. 155 изображен общий вид этой печи.

г. Печи с вольтовой дугой. В тех случаях, когда необходимо получить температуру свыше 1800° , применяются печи с вольтовой дугой. На рис. 156 изображена такая печь системы Симониса для нагревания тигля с металлом.

Печь состоит из четырехугольной снимающейся крышки *а* и вынимающейся подставки *б*, на которую положен повернутый кверху дном угольный тигель *с*, в свою очередь поддерживающий тигель с расплавляемым металлом.

Вся печь изготовляется из хорошего огнеупорного материала.

Введенные в печь два угля образуют вольтову дугу, которая и производит нагрев пространства печи.

д. Вакуум-печи. Большое распространение получают за последнее время электрические вакуум-печи. На рис. 157 изображена такая печь системы Арсема.

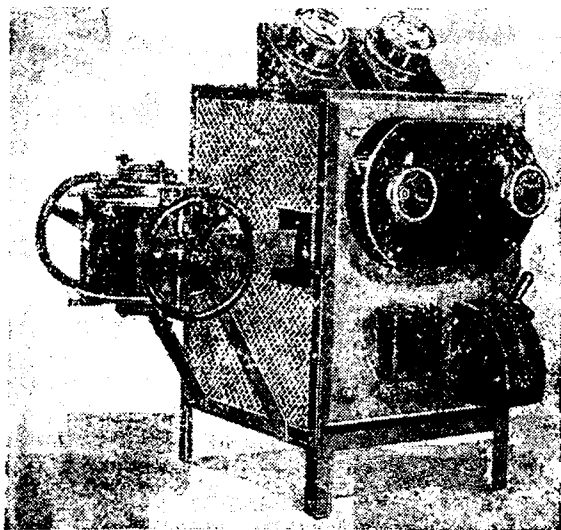


Рис. 155. Печь системы Тамманна

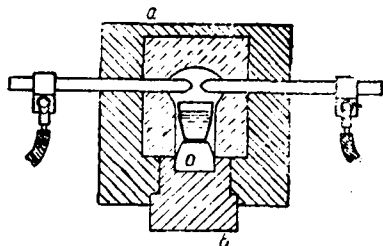


Рис. 156. Печь с вольтовой дугой

Нагревательный цилиндр представляет собой трубу, полученную от спирально свернутой графитной пластинки. Длина этого цилиндра равна 350 мм при диаметре в 50 мм и толщине стенок 5—10 мм.

Изолятором тепла служит кольцеобразный ящик *а* из графита, наполненный графитовым порошком. Ток подводится к контакту *б* при помощи трубки *с*, охлаждаемой водой. Деталь *А* указывает конструкцию соединения

трубы, подводящей ток, с внешними стенками. Необходимая плотность, чтобы препятствовать проникновению воздуха, достигается свинцовой прокладкой *d*. Изоляторами служат фибровые прокладки *е* и *ф*.

Печь потребляет около 15 кВт и развивает температуру до 3100°. На рис. 158 изображена вакуум-печь Обергоффера¹.

е. Печи высокого внутреннего давления. Наряду с вакуум-печами большое распространение получают электрические печи, работа которых должна происходить под большим внутренним давлением. Такой печью пользовался Гринуд в 1912 г. при определении испарения ряда металлов при давлении в 50 ат.

На рис. 159 изображена такая печь. Она состоит из стального цилиндра, покрытого крышкой. Герметичность достигается свинцовой кольцевой прокладкой. Электроды сделаны из графита. Один из них покрыт медью и припаян к трубке *a*, охлаждаемой водой. Другой электрод соединяется помощью стальных пластин с чугунной футеровкой, которая, в свою очередь, соединяется при помощи медных частей со стальным цилиндром. В отверстия *b* и *c* вставляются стекла для наблюдения.

ж. Высокочастотные печи. Вышеописанные печи сопротивления имеют один общий недостаток: вместе с печью разогревается и материал сопротивления (металлическая обмотка, уголь и т. д.), который

при высокой температуре разрушается. При правильной сборке печи, при аккуратной работе с ней это разрушение происходит не сразу, а постепенно. Но достаточно нарушить одно из условий правильного режима печи, например несколько повысить температуру, как интенсивность разрушения печи сильно возрастает.

Весьма интересными поэтому являются электрические печи другого типа — индукционные, работающие на токах высокой частоты².

На рис. 160 изображена такая печь. Тигель *a* окружен обмоткой *b*, представляющей собой медную несколько сплюснутую трубку. Через такую обмотку пропускается переменный ток большой

частоты — от 1 000 до 20 000 периодов в секунду. Благодаря такой большой частоте в металле, заложенном в тигле, образуются пара-

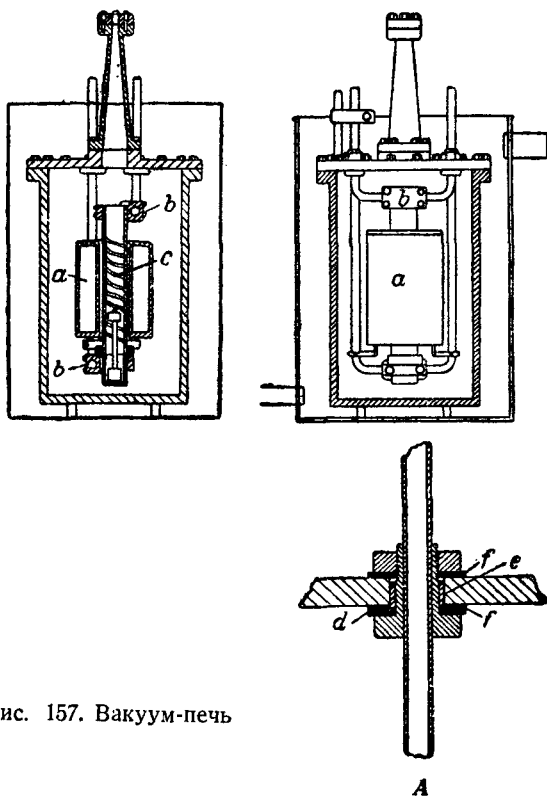


Рис. 157. Вакуум-печь

¹ Stahl u. Eisen, 1927.

² Chem. Met. Engg. 19, стр. 115—6 (1918); Trans. Am. Elektrochem. Soc., 35, стр. 69 (189), (1919), Chem. Met. Engg., 20, стр. 381—2 (1919); Iron Age, 103, стр. 1294—5 (1919); Chem. Met. Engg., 21, стр. 258—9 (1919); St. u. E., 39, стр. 5479 (1919); 41, стр. 898—9 (1921); 45, стр. 1388—9 (1925); Iron and Steel Inst., т. II, 1925, E. T. Z., № 7, стр. 225—6, 1925.

зитные токи, которые разогревают его и расплавляют. Разогревающаяся при этом обмотка охлаждается пропусканием через нее воды. Как видно, устройство такой печи весьма просто. Значительно

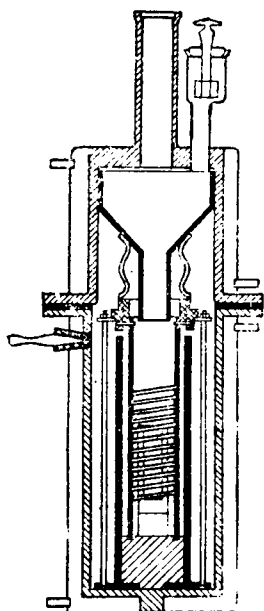


Рис. 158. Вакуум-печь Обергоффера

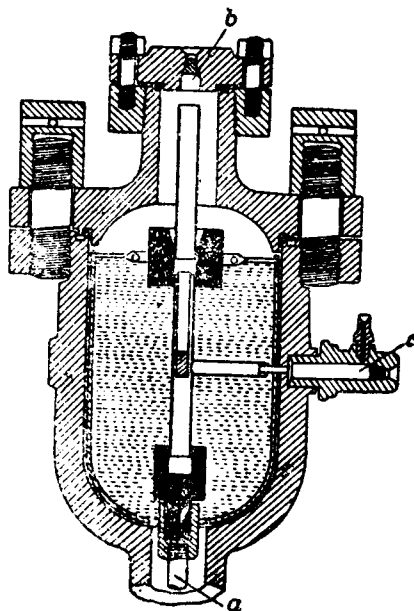


Рис. 159. Печь высокого внутреннего давления

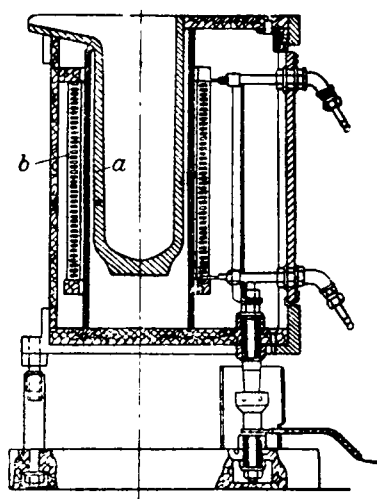


Рис. 160. Высокочастотная печь

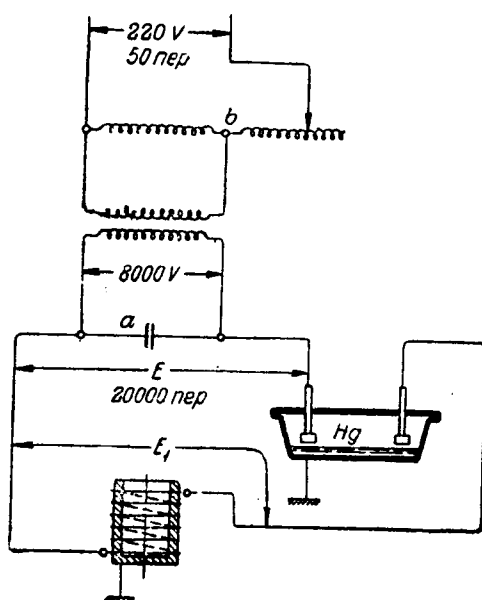


Рис. 161. Схема высокочастотной печи.

сложнее оборудование для получения тока высокой частоты. Это оборудование может состоять из одного генератора при сравнительно низком числе периодов или же из агрегата приборов: трансформатора, конденсатора и прерывателя.

На рис. 161 представлена схема таких приборов для преобразования тока напряжением 220 V и частотой 50 периодов в ток напряжением 8 000 V и частотой 20 000 периодов.

Совершенство работы таких печей привело к их широкому распространению.

2. Приборы для измерения температур

Впервые термический анализ стали произведен русским инженером Д. К. Черновым, причем температура определялась им не при помощи каких-либо приборов, а на-глаз, по цвету каления. В своей статье «Критический обзор статей Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому же предмету»¹ Д. К. Чернов, говоря об открытых им критических температурах, пишет: «Не имея возможности измерять эти температуры при помощи физических приборов, я по необходимости ограничился обозначением их по цвету каления, все оттенки которого может различить только опытный глаз».

Это было в семидесятых годах прошлого столетия. С появлением более совершенных приборов термический анализ получал все большее распространение и главное — большую точность. Хотя наш глаз и очень точный прибор, но все же различные внешние обстоятельства, как-то: освещение помещения, температура помещения и т. д. имеют чрезвычайно большое влияние и могут привести к большой ошибке при определении оттенка по цвету каления. Кроме того, для определения температуры по цвету каления необходим большой опыт.

Таблица 17

Цвета каления

Температура С°	Рапатц ²	Ваврциниок ³
600	Темнокоричневый	—
650	Коричневато-красный	—
700	Темновишневый	Темнокрасный
750	Вишневый	—
800	Светловишневый	Темновишневый
850	Красный	—
900	Светлокрасный	Светловишневый
950	Красно-желтый	—
1000	Желтый	Светлокрасный
1050	Светложелтый	—
1100	Бело-желтый	Оранжевый
1150	—	—
1200	Белый	Лимонно-желтый
1250	—	—
1300	—	Светложелтый

Насколько своеобразны определения температуры по цвету каления, можно судить по прилагаемой табл. 17, где собраны цвета каления стали, данные двумя видными авторами для различных температур. Легко видеть, что одна и та же температура весьма опытными металлургами определяется не одинаковым цветом каления.

В данное время температура определяется исключительно термо-

¹ Изд. «Зап. Русск. Техн. О-ва», июль, стр. 399—440, 1868.

² F. Rapatz. Die Edelmstähe, 1925.

³ O. Wawrziniok, Handbuch des Materialprüfungswesens, 1923.

метрами и пирометрами, и лишь в редких случаях, когда нет под рукой такого прибора, прибегают к помощи невооруженного глаза.

Термометры применяют, главным образом, для измерения температур, не превышающих $250-300^{\circ}$. Хотя эти приборы изготавливаются и для измерения более высоких температур: стеклянные со ртутью — до 400° , кварцевые со ртутью — до 700° и кварцевые с оловом — даже до 1000° , но широкого практического применения они все же не получили вследствие своей дороговизны, быстрой порчи и целого ряда неудобств в работе. Для измерения высоких температур общее распространение получили так называемые *пирометры*, которые в зависимости от метода работы разбивают на две группы: 1) *пирометры оптические* и 2) *пирометры контактные*.

а. Оптические пирометры. Действие оптических пирометров основано на измерении энергии лучеиспускания; пирометры контактные измеряют температуру только при непосредственном соприкосновении с нагретой средой.

Из второй группы мы ниже рассмотрим пирометры сопротивления и термоэлектрические пирометры, которые следует отнести к числу наиболее точных приборов для измерения температуры. Сейчас же рассмотрим оптические пирометры, которые в свою очередь можно разбить на две группы: 1) *радиационные* или тепловые и 2) *световые* пирометры. Нижний предел измеряемых температур для радиационных пирометров лежит около 400° , для световых — около 600° . Верхнего же предела для этих пирометров собственно нет, так как оптические пирометры могут быть построены для каких угодно высоких температур.

Энергия лучеиспускания для световой волны длины λ определяется общим уравнением Вина:

$$J = C_1 \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}},$$

где λ — длина волны; α — коэффициент, имеющий значение между 5 и 6 для тел не абсолютно черных; e — основание натуральных логарифмов, равное 2,71828; C_1 и C_2 — постоянные, определяемые опытным путем; T — абсолютная температура.

Таким образом измерение температуры сводится к измерению силы света, но это справедливо лишь по отношению к так называемым абсолютно черным телам, которые при всякой температуре полностью поглощают все падающие на них лучи. К такому телу больше всего приближается обыкновенная сажа. По Кирхгофу, под это понятие подходит и всякое пространство, окруженное со всех сторон стенками, мало проводящими тепло и способными отражать все падающие на них лучи. Этим требованиям более или менее удовлетворяют различные металлургические печи, рабочее пространство которых представляет собой, таким образом, почти абсолютно черное тело. Если сделать в стенке печи небольшое наблюдательное отверстие, то лучеиспускание изменится лишь на неизмеримо малую величину, и внутреннее пространство попрежнему можно считать абсолютно черным телом.

Ввиду того что не существует абсолютных единиц для непосредственного измерения интенсивности света, практически пользуются методом сравнения интенсивности света, испускаемого измеряемым телом, и нормальным источником, который играет роль эталона.

В отличие от световых пирометров пирометры *радиационные* воспринимают тепловую энергию, развиваемую раскаленными телами. Зависимость между количеством тепловой энергии E , излучаемой

раскаленным телом, и температурами раскаленного тела T_1 и восприимчивника T_2 выражается законом Стефана и Больцмана:

$$E = K(T_1^4 - T_2^4),$$

где K — некоторый коэффициент, определяемый опытным путем.

Ввиду того что тепловые лучи испускаются нагретым телом при более низких температурах, нежели лучи световые, нижний предел измеряемых температур для тепловых пирометров лежит несколько ниже, чем для световых пирометров.

Пирометр Фери. Из радиационных пирометров наиболее распространенным типом является пирометр Фери, который изготовляется в нескольких конструкциях. На рис. 162 и 163 представлено устройство наиболее распространенной конструкции этого пирометра.

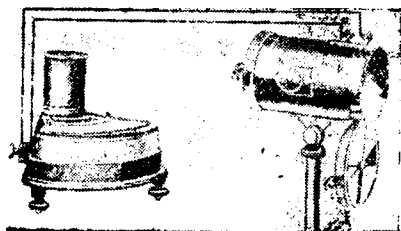


Рис. 162. Пирометр Фери

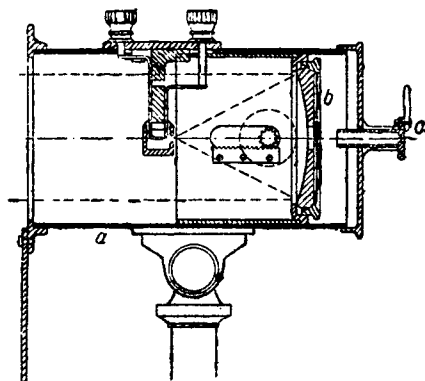


Рис. 163. Пирометр Фери

Пирометр состоит из трубки a , внутри которой помещено позолоченное зеркало b , имеющее отверстие для наблюдения через окуляр c . Тепловые лучи, отражаясь от этого зеркала, собираются в фокусе и нагревают железо-константановую термопару¹, электродвижущая сила которой будет тем больше, чем больше нагреется спай термопары. Эта электродвижущая сила измеряется специальным гальванометром.

При измерении температуры, например рабочего пространства печи, пирометр наводится на измеряемый объект и при этом стремятся, чтобы изображение светящейся трубки покрывало равномерно весь спай термопары. Расстояние трубки пирометра от измеряемого объекта хотя и оказывает некоторое влияние на точность измерения, но столь незначительное, что практически это не имеет значения. Например нельзя уловить разницу при измерении температуры в 1000° , изменяя расстояние трубки пирометра от печи в пределах от 1 до 20 м.

Тепловым пирометром Фери возможно измерять очень большой интервал температур — от 600 до 2000° . При этом при измерении высоких температур пользуются ослабляющими приспособлениями, чтобы не повышать слишком сильно температуру спая термопары. Обычно эти пирометры снабжаются двумя шкалами, из которых одна дает отсчет от 600 до 1400° , а другая — от 1000 до 2000° . Точность измерения температур пирометром Фери довольно высока и погрешность обычно не превышает 1%.

¹ См. отдел о термоэлектрических пирометрах.

На правильность измерения температур пирометром Фери большое влияние оказывает состояние поверхности отражения вогнутого зеркала *b*. Для того чтобы нагревание спая термопары было пропорционально четвертой степени абсолютной температуры излучающего объекта, необходимо, чтобы зеркало одинаково отражало лучи различной длины волны или поглощало их в равной степени. В этом отношении золото является наиболее подходящим материалом, так как коэффициент отражения его одинаков для лучей с длиной волны, большей $0,8 \mu$ (рис. 164).

Из этой схемы видно, что серебро явилось бы еще более подходящим материалом, но зеркало, покрытое серебром, — менее долговечно. Платина, как легко видеть, совершенно не подходит для этой цели.

Зеркало, покрытое золотом, необходимо оберегать от пыли и прочих химических и механических воздействий. Трубку пирометра надо держать закрытой, открывая ее лишь в момент измерения.

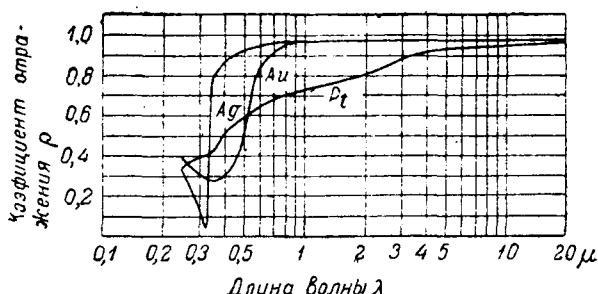


Рис. 164. Изменение коэффициента отражения в зависимости от λ

Ардометр. Слабым местом в пирометре Фери является зеркало, покрытое золотом. Поэтому вполне понятны стремления целого ряда конструкторов заменить это зеркало какой-либо более прочной деталью. Одним из решений этой задачи было применение вместо зеркала стеклянной линзы. Линза менее подвержена всяким механическим и химическим воздействиям и, кроме того, служит как бы крышкой на втором конце трубки пирометра, предохраняя от пыли спай термопары.

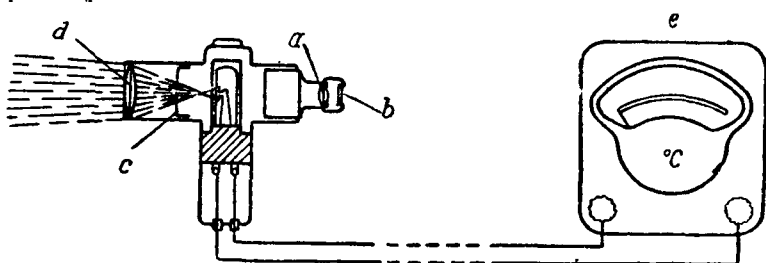


Рис. 165. Ардометр (Сименс-Гальске)

a — окуляр; b — красное стекло; c — диафрагма; d — объектив; e — гальванометр

На рис. 165 изображен такой прибор фирмы Сименс и Гальске, названный ардометром. Действие этого прибора понятно из чертежа.

Но если пирометр Фери не вполне удовлетворял закону Стефана и Больцмана, то ардометр в этом отношении грешит еще больше, так как его стеклянная линза пропускает не одинаково лучи с различной длиной волны. Например ультракрасные лучи с длиной волны $\lambda = 10 \mu$ поглощаются почти все, более же короткие волны поглощаются меньше. Это обстоятельство вносит некоторую погрешность в этот прибор при измерении температур различных тел.

Пирометр Ваннера¹. Пирометр Ваннера принадлежит к числу наиболее распространенных типов световых пирометров.

На рис. 166 дана схема оптики пирометра Ваннера. Одна из щелей *a* освещается измеряемым объектом *L*, а другая *b* — нормальным эталоном, в качестве которого здесь служит шестивольтная электрическая лампочка накаливания с осмиевой нитью. Лампочка помещается в трубке вблизи щели *b*. Обе щели *a* и *b* расположены в фокусе линзы *O*₁, которая превращает расходящийся пучок лучей в параллельный. В спектроскопической призме *K* пучки разлагаются на составные части, а по выходе поступают в поляризатор *W*, изготовленный из полевого шпата, где вторично разлагаются на обыкновенные и поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях.

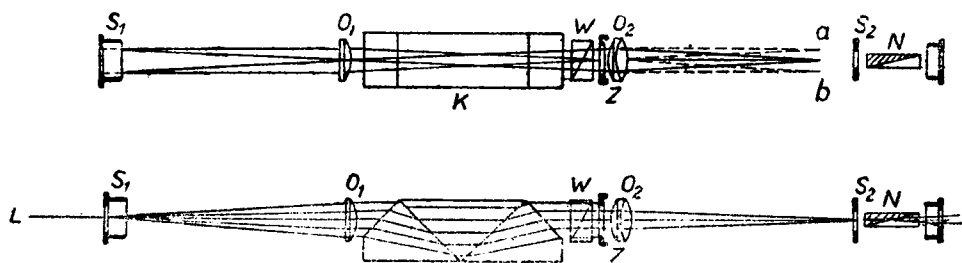


Рис. 166. Оптика пирометра Ваннера

При помощи двойной призмы *Z* два из четырех получившихся пучков лучей приближаются к геометрической оси прибора, тогда как вторая пара отодвигается от этой оси. Пройдя затем через собирающую линзу *O*₂, обе пары дают по два изображения щелей *a* и *b* в плоскости окулярной щели *S*₂. Одна пара изображений заслоняется небольшими ширмочками, а другая пара попадает в поле зрения анализатора *N*, представляющего собой николеву призму, при повороте которой происходит уравнивание видимой освещенности обеих щелей. При этом размер щели *S*₂ подобран так, что через окуляр прибора видна лишь одна красная часть спектра сравниваемых источников света.

Измерение температуры с помощью пирометра Ваннера производится следующим образом; трубу направляют на светящийся предмет и наблюдают круглое красное пятно, состоящее из двух половин, не одинаково ярко освещенных (рис. 167). Поворачивая окуляр на определенное число градусов, легко привести яркость обеих половин круга к полному совпадению. По углу поворота окуляра определяется соответствующая температура.



Рис. 167

Пирометр Ваннера, являясь в высшей степени удобным прибором для измерения температур, дает большую точность в показаниях: при измерении температур до 1400° погрешность составляет не более 1%; при температурах более высоких она несколько возрастает, доходя до 3% при 2000°. Конечно, при пользовании этим пирометром от наблюдателя требуется хороший навык.

Область измерения температур этим пирометром простирается от 650 до 2000°; если же перед объективом проложить дымчатое стекло, то возможно измерять и более высокие температуры — до 4000°.

Точность измерения температур пирометром Ваннера в большой степени зависит от правильности накала нити эталонной электрической лампочки. Обычно нить накаливается до 1000 и 1800° в зависимости от интервала измеряемых температур. Для контроля накала нити к пирометру придается миллиамперметр с регулировочным реостатом, который позволяет регулировать силу тока, пропускаемого через лампочку, до требуемой величины, указанной на пирометре.

Рекомендуется также проверять показания пирометра при помощи лампочки Гефнер-Альтенека. Лампочка эта весьма простой конструкции со сплошным фитилем; в ней горит уксусно-амиловый эфир (амилацетат). Пламя свободное, без стекла, высота 40 — 50 мм при ширине 8 мм. Пирометр наводится на такое пламя, и наблюдаемые в трубу полукруги должны слиться в круг одинаковой яркости при вполне определенном угле поворота указателя. Этот угол для каждого прибора указывается заводом, изготовляющим пирометры.

Пирометр Гольборна и Курльбаума. К числу столь же распространенных пирометров, как пирометр Ваннера, следует отнести и пирометр Гольборна и Курльбаума¹. Он состоит (рис. 168) из зрительной трубки, внутри которой помещена лампочка накаливания a , так что волосок ее лежит как раз посреди поля зрения. Перед трубкой помещается стекло, окрашенное окисью меди и пропускающее исключительно красные лучи.

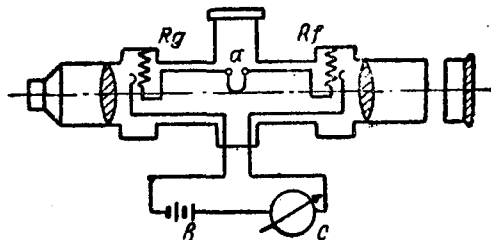


Рис. 168. Пирометр Гольборна и Курльбаума

Направив трубку на источник света, увидим красное поле и на нем черный волосок лампы накаливания (рис. 169, а). Пропуская через лампу электрический ток от аккумулятора b и регулируя его силу при помощи реостата Rg (грубо) и Rf (точно), будем накаливать волосок лампы до тех пор, пока не получим полного совпадения свечения поля и нити (рис. 169, б). Если сила тока будет больше требуемой, то накал нити будет также больше, и она будет нам казаться светлее общего фона (рис. 169, с).

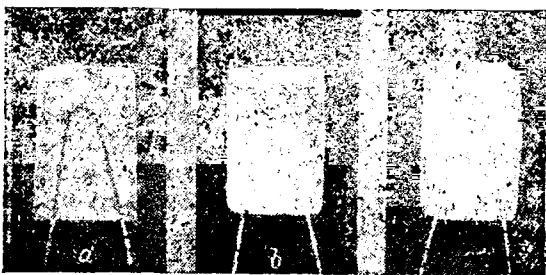


Рис. 169. Измерение температуры пирометром Гольборна и Курльбаума

Сила тока, необходимая для накала нити, измеряется миллиамперметром с (рис. 168), и по ней судят о величине измеряемой температуры. Обычно шкала миллиамперметра проградуирована в градусы.

Пирометр Тинсли. В пирометрах Гольборна и Курльбаума вся аппаратура, как-то: пирометрическая трубка, регулировочный реостат, амперметр и аккумулятор, состоит из отдельных частей. Фирма Тинсли в Лондоне выпустила пирометр (рис. 170), в котором ре-

¹ Annalen der Phys., 10, 225—241, 1903.

гулировочный реостат и амперметр прикреплены непосредственно к пирометрической трубке.

Кроме того пирометр имеет интересную схему соединения. Эта схема изображена на рис. 171 и представляет собой мостик, одну ветвь которого составляет лампочка накаливания. Гальванометр G будет отклоняться от нулевого положения в зависимости от изменения сопротивления лампочки накаливания C . Сопротивление же этой лампочки зависит от температуры накала нити, которая, в свою очередь, зависит от силы пропускаемого тока.

Измерение этим пирометром производится способом, обычным для световых пирометров. Шкала же этого пирометра проградуирована не по силе тока, а по величине сопротивления нити лампочки накаливания. Это обстоятельство позволяет получить шкалу с более равномерными и крупными делениями. Но, с другой стороны, этот спо-

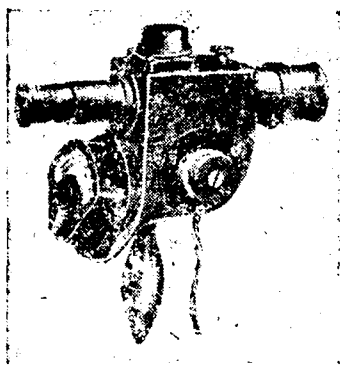


Рис. 170. Пирометр Тинсли

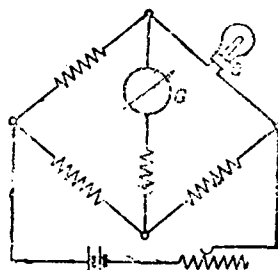


Рис. 171. Электрическая схема пирометра Тинсли

соб имеет и большой недостаток: благодаря тому, что измерение сопротивления лампочки накаливания незначительно, на показание гальванометра G весьма влияют величины сопротивления контактов. Дабы уменьшить их влияние, все контакты в этом пирометре впаяны; также припаивается и лампочка. Но это вызывает целый ряд неудобств.

Пирометр Селиванова. В 1925 г. Б. П. Селиванов¹ описал свой пирометр для измерения высоких температур, названный им *пироскопом*. Прибор основан на определении точки погасания световых лучей, испускаемых раскаленным объектом.

На рис. 172 представлен пироскоп Селиванова. Две стеклянные пластинки, прикрепленные к металлической оправе эмалевым лаком, образуют призму. По одной стороне призмы передвигается щиток a с круглым диаметром около 5 мм и окулярной вычерченной внутри трубочкой b , не имеющей никаких чечевиц и служащей лишь для удобства визирования. Отверстие щитка закрыто цветной или зеленой пластинкой c . На оправе призмы нанесены деления, а на щитке поставлен индекс в виде черточки, указывающий его положение относительно делений оправы.

В прибор наливается какая-нибудь темная жидкость, для чего предварительно отвинчивают ручку d . Жидкость необходимо подобрать соответствующей густоты и после заполнения прибора ручку винтить обратно так, чтобы не оставить воздушных пузырьков. Из

¹ Техника и производство, 1925, № 4—5, стр. 101—107.

жидкостей для наполнения прибора пригодны те, которые не изменяют своей окраски и не дают осадка.

Водные растворы туши, чернил и т. п. мало пригодны, так как через 2—3 дня они уже изменяют окраску. Более постоянны окисленные на воздухе щелочные растворы гидрохинона или пирогаллола. Наиболее удобен водный раствор нигрозина. Эти вещества дают жидкость любой концентрации, почти не изменяющуюся в течение долгого времени, и требует только однократной градуировки.

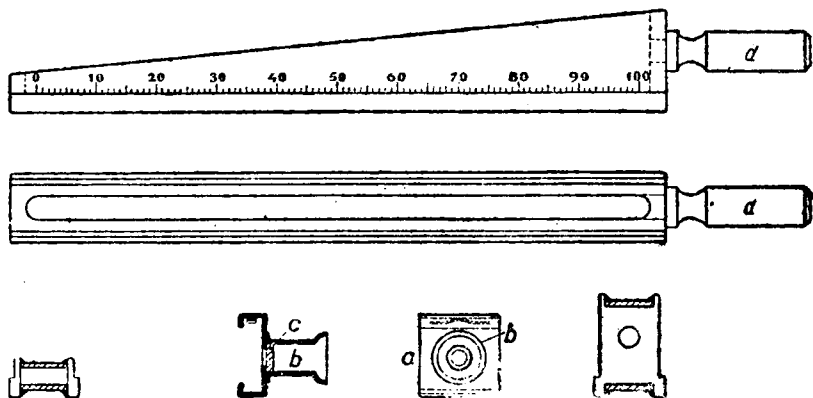


Рис. 172. Пироскоп Б. П. Селиванова

Измерение температур производится в следующем порядке. Визирный щиток передвигают на тонкий конец призмы и через окулярную трубку рассматривают измеряемый светящийся объект. Приучив глаз, начинают медленно передвигать призму к толстому концу. При этом яркость объекта начинает постепенно ослабевать в поле зрения прибора, и в определенной точке шкалы объект внезапно перестает быть различимым, если только жидкость была выбрана надлежащей густо-

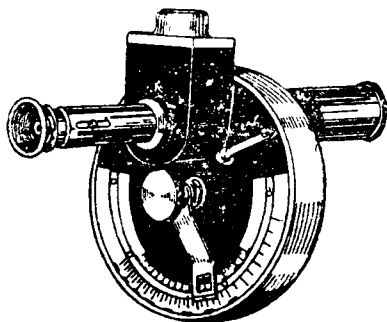


Рис. 173. Пирометр Фута и Фишера

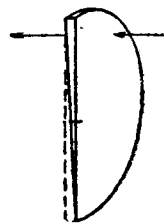


Рис. 174. Клин пирометра Фута и Фишера

ты. Соответствующее положение индекса характеризует температуру объекта. Подбором густоты жидкости можно измерять и маленькие и большие интервалы температур.

Градуируется прибор по двум точкам, так как на основании третьего закона Вина легко показать, что градуировочная линия в монохроматическом цвете для призматического пироскопа есть прямая.

Пирометр Фута и Фишера. В этом пирометре, как и в пирометре Ваннера, накал нити лампочки остается неизменным. Между

объективной линзой и лампочкой накаливания (рис. 173) установлен клинообразный диск (рис. 174), роль которого заключается в поглощении световых лучей. Пирометр устанавливается на измеряемый светящийся объект, и поворотом клинообразного диска уравнивается интенсивность свечения нити и лампы и измеряемого объекта. Наблюдаемая картина при этом та же, что и в пирометрах Гольборна и Курльбаума. Угол поворота диска укажет значение измеряемой температуры.

6. Электрические пирометры сопротивления. Действие электрических пирометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления металлов в зависимости от температуры.

По данным Гольборна,¹ наибольшие температурные коэффициенты некоторых металлов имеют следующие значения:

Ni	0,675	Rh	0,443	Ir	0,411
Co	0,658	Mo	0,435	Ag	0,410
Fe	0,657	Cu	0,433	Au	0,400
W	0,465	Cd	0,424	Pt	0,397
Bi	0,446	Pb	0,422	Pd	0,377
Al	0,445	Zn	0,415	Hg	0,099

При выборе материалов для изготовления пирометров сопротивления необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) материал не должен изменять свои физические и химические свойства в пределах измеряемых температур;
- 2) температурный коэффициент должен быть по возможности высоким;
- 3) сопротивление, соответствующее определенным температурам, не должно изменяться со временем;
- 4) изменение сопротивления в зависимости от температуры должно происходить плавно, без скачков и т. д.

Из всех материалов наибольшее практическое применение при изготовлении электрических пирометров сопротивления получила платина. Попытки применения железа не увенчались успехом даже и в пирометрах, предназначенных для измерения температур порядка комнатных, так как железо быстро образует окалину при высоких температурах и ржавеет при комнатных, изменяя этим свое сопротивление.

Фирмой Сименс и Гальске строятся никелевые пирометры сопротивления, предназначенные для измерения температур меди и железа в генераторах и трансформаторах. Эти пирометры имеют узкое назначение и во всяком случае пригодны для измерения температур не выше 300° (критическая температура никеля).

Область применения платиновых пирометров сопротивления распространяется на интервал температур от — 200° до + 900°. При более высоких температурах эти пирометры быстро изнашиваются, а после многократного нагрева платиновой проволоки выше 900° ее электрическое сопротивление сильно меняется.

Самый пирометр сопротивления, или, как его часто называют, термометр, состоит (рис. 175) из тонкой (диаметром около 0,3 мм) платиновой проволоки, намотанной на слюду или на трубку из кварцевого стекла. Такая обмотка вставляется для защиты от действия вредных паров и газов в запаянную с одного конца кварцевую трубку, которая для защиты от механических повреждений вставляется в металлический футляр.

Длина кварцевого термометра колеблется около 200 мм, а метал-

¹ Annalen der Physik, 4, 59, стр. 145—169, 1919.

лической арматуры — около 500 мм. Для соединения платиновой спирали пирометра с наружными зажимами в его оправе имеются тоненькие серебряные или золотые проволоки.

Для измерения температуры такой пирометр вводят в рабочее пространство печи или же в тигель, а зажимы пирометра присоединяют медными проводами к зажимам прибора, измеряющего сопротивление пирометра. Измерение можно производить или по нулевому методу или же по методу непосредственного отсчета. Одна из возможных схем измерения температуры пирометром сопротивления по нулевому методу изображена на рис. 176.



Рис. 175. Пирометр сопротивления

Пирометр r_4 составляет одну из ветвей мостика Уитстона. Ток получается от батареи E . Гальванометр G приводится на нуль изменением сопротивления r_3 . Искомое сопротивление пирометра r_4 определяется из уравнения:

$$r_4 = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}.$$

Обычно на сопротивление r_3 со скользящим контактом наносится и температурная шкала.

Оставляя сопротивление r_3 неизменным, можно измерить сопротивление пирометра по отклонению гальванометра, шкала которого снабжается и температурными делениями. Этот способ непосредственного отсчета менее точен, но более удобен, нежели первый способ. Полагая здесь $r_1 = r_2 = r_3$, сила тока i , проходящего через гальванометр и вызывающего отклонение стрелки, определится из выражения:

$$i = \frac{e(r_4 - r_1)}{2(r_4 + r_1)(r + r_1)},$$

где e — электродвижущая сила батареи, r — сопротивление гальванометра.

При таком способе измерения на показание гальванометра имеет влияние напряжение e батареи. Поэтому здесь необходимо постоянное контролирование точным вольтметром, на шкале которого проводится обычно красная черта, указывающая, на каком напряжении проградуирован весь прибор. Если же по каким-либо причинам стрелка вольтметра отклонилась от красной черты, то при помощи добавочного реостата изменяют напряжение и приводят этим стрелку вольтметра в нормальное положение.

Платиновые термометры необходимо время от времени проверять. Для проверки их лучше всего погружать в тающий лед (0°), в пары кипящей воды (100°) и серы (445°).

в. Термоэлектрические пирометры. Действие термоэлектрического пирометра основано на следующем явлении: если взять две проволоочки a_1 и a_2 (рис. 177) из различных металлов или сплавов и соединить (сварить, скрутить) с одной стороны концы их (b), то при погружении этого спаянного конца b в среду высокой температуры на других концах c_1 и c_2 появится разность потенциалов, измеряемая в тысячных долях вольта (mV), причем эта разность потенциалов будет тем больше, чем больше разность температур спаянных и неспаянных

концов. Помощью медных проводов d_1 и d_2 концы c_1 и c_2 соединяются с зажимами l_1 и l_2 милливольтметра или гальванометра, стрелка которого будет отклоняться от нулевого положения на тот или иной угол в зависимости от величины разности потенциалов на концах c_1 и c_2 .

При выборе материала проволок для изготовления такого пирометра, или, как его называют, термопары, необходимо руководствоваться следующими требованиями — термопара должна давать: 1) возможно большую электродвижущую силу; 2) плавное изменение электродвижущей силы в зависимости от изменения температуры спая; 3) долговечность работы.

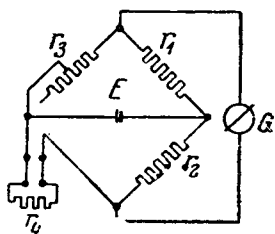


Рис. 176. Электрическая схема пирометра сопротивления

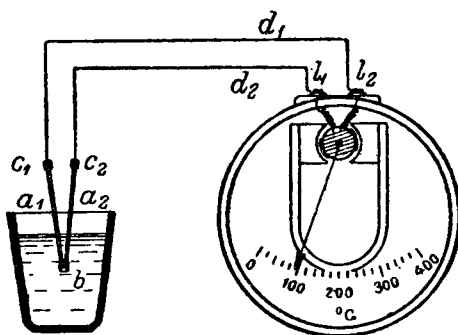


Рис. 177. Термоэлектрический пирометр

Выполнение первого требования необходимо для измерения температур с достаточной степенью точности.

Второму требованию удовлетворяют материалы, которые в интервале измеряемых температур не претерпевают превращений, сопровождаемых критической температурой. Для примера укажем, что, по данным Даннекера¹, пара никель-кобальт имеет остановку при -26° и $+813^\circ$, а пара кобальт-никелин — при температуре -79° и $+450^\circ$.

Третье требование — долговечность службы термопары — является наиболее важным. При высоких температурах материал термопары окисляется, и она приходит в негодность. Температура до 400° на применяемые в технике металлы в этом отношении почти не действует. Но уже при более высоких температурах — например при 450° — заметно начинает окисляться медь, при 500° — железо, при 600° — константан, при 800° — более или менее все неблагородные металлы. Платина, не изменяясь, выдерживает температуру до 1200° . Выше этой температуры она становится хрупкой и ломкой.

Ниже приводятся значения электродвижущей силы в mV, развиваемой на каждые 100° некоторыми металлами в паре с платиной:

	mV		mV		mV
Висмут	$-7,3$	Алюминий	$+0,4$	Медь	$+0,76$
Константан	$-3,4$	Свинец	$+0,4$	Вольфрам	$+0,81$
Никель	$-1,5$	Платинородий	$+0,64$	Молибден	$+1,26$
Палладий	$-0,6$	Манганин	$+0,72$	Железо	$+1,80$
Платина	± 0	Серебро	$+0,72$	Нихром	$+2,20$
Уголь	$+0,3$	Золото	$+0,75$	Сурьма	$+4,70$

¹ Ann. der Phys., 42, стр. 1504, 1913.

Значения эти, конечно приблизительны. Направление тока — от сурьмы к висмуту через гальванометр.

Рассмотрим теперь некоторые ходовые термопары.

Медь-константан. Электродвижущая сила равна, примерно, 4 mV для интервала 0—100°. Термопара изготавливается из проволок диаметром 0,5—3,0 мм. Верхний предел измеряемой температуры считается 400°, так как выше начинается сильное окисление меди. Нижний предел измеряемой температуры считают до —250°.

Серебро-константан. Эта пара развивает, примерно, такую же электродвижущую силу, как и медноконстантановая. Но ввиду того что здесь легко окисляемая медь заменена серебром, верхний предел измеряемых температур выше и равен около 650°.

Железо-константан. Железоконстантановая термопара развивает весьма большую электродвижущую силу — около 5,2 mV на каждые 100°, причем для более высоких температур ЭДС повышается до 6,0—6,5 mV на 100°. По сообщению Гофмана и Шульце¹, такая термопара с диаметром проволок 0,5 мм, работая в течение года при 600°, продолжала показывать температуру с точностью +1°. Для более высоких температур применяют проволоки более толстые — диаметром 2—4 мм. Следует отметить, что при применении железа с большим содержанием углерода кривая зависимости температуры претерпевает некоторый перегиб при 700—750° — температуре превращения перлит-аустенит.

Никель-нихром. Никельнихромовые термопары применяются для измерения температур и свыше 900°. Фирмой Сименс и Гальске выработана нормальная термопара этого типа, и для нее дается следующая зависимость между температурой и электродвижущей силой:

°C	mV	°C	mV
0	0	600	19,5
100	3,1	700	23,2
200	6,2	800	27,0
300	9,3	900	30,9
400	12,5	1000	34,7
500	15,9	1100	38,6

Легко видеть, что ЭДС равна, примерно, 3,1—3,5 mV на каждые 100°.

Госкинс предложил изготавливать термопары с большей ЭДС, состоящие из сплавов хромель и алюмель, которые в своем составе содержат:

Хромель (%)		Алюмель (%)	
Никель	89,0	Никель	94,0
Хром	9,8	Алюминий	2,0
Железо	1,0	Кремний	1,0
Марганец	0,2	Железо	0,5
		Марганец	2,5

С такими термопарами работают до 1000—1100°.

Нихром-константан. Нихромконстантановая термопара применяется в тех случаях, когда необходимо получить возможно большую электродвижущую силу. Эта термопара развивает в среднем около 7,5 mV на каждые 100° в интервале температур 0—900°.

Платина-платиноиридий. Эта термопара в настоящее время совершенно вытеснена никельнихромовой ввиду ее многих недостатков: малой электродвижущей силы (при 1000° всего 12,6 mV), расплавления иридия при температурах выше 1000° и т. д. Следует

¹ Е. Т. З., стр. 427, 1920.

отметить, что она имеет за собой много заслуг в изучении состояний железоуглеродистых и других сплавов, так как является первым типом термопары, предложенным Ле Шателье.

Платина-платинородий. Платина-платинородиевая термопара является одной из наиболее употребительных термопар и предложена впервые Ле Шателье (1887 г.). Этой термопарой возможно измерять чрезвычайно большой интервал температур — от 0 до 1600°, хотя при продолжительной работе не следует превышать температуру в 1200°. Следует отметить, что ЭДС и продолжительность службы чрезвычайно чувствительны к чистоте металлов термопары. Гереус дает для своих термопар (платина, платина +10% родия) следующую зависимость:

°C	mV	°C	mV
0	0	900	8,43
100	0,64	1000	9,56
200	1,42	1100	10,72
300	2,29	1200	11,89
400	3,21	1300	13,07
500	4,17	1400	14,26
600	5,18	1500	15,45
700	6,23	1600	16,23
800	7,31	1700	17,81

Эти термопары изготавливаются обычно из проволочек диаметром 0,5 мм, концы которых с одной стороны завариваются в пламени вольтовой дуги. Изготовление более толстых термопар обходится очень дорого; более же тонкие непрочны в механическом отношении, а, кроме того, будут обладать большим электрическим сопротивлением.

Сопротивление платина-платинородиевой термопары длиной 1 м и при диаметре проволок 0,5 мм при комнатной температуре достигает:

Платина	0,55 ом
Платинородий	0,90 "

На рис. 178 указаны примерные зависимости ЭДС от температуры для различных термопар.

Градуировка термопар. Гальванометры и милливольтметры служат обычно значительно дольше, нежели градуированные к ним термопары. Термопара заменяется новой, и ее следует опять проградуировать к какому-либо из имеющихся гальванометров. Кроме того, и работающие пирометры должны быть периодически проверяемы. Техника проверки и градуировка пирометров весьма просты, но для получения точных результатов необходимо провести их с надлежащей аккуратностью и вниманием.

Существуют два весьма употребительных метода градуировки термопар. Первый метод — градуировка по критическим точкам и второй — градуировка сравнением с эталонным пирометром.

Градуировка по критическим точкам производится следующим образом. В графитном или фарфоровом тигле расплавляется какой-либо чистый металл, сплав или химическое соединение, точка плавления которого известна. В расплавленный и несколько перегретый металл вставляется термопара и ведется охлаждение, причем наблюдают за показанием гальванометра через определенные промежутки времени. В результате получают кривую $[f(mV, Z) = 0]$ зависимости: изменение электродвижущей силы термопары — время. Эта кривая будет иметь перегиб (см. методы определения критических температур), причем значение mV, при котором произошел перегиб кривой.

будет соответствовать температуре превращения — в данном случае известной температуре плавления металла. Подбирая различные металлы и определяя соответствующие значения mV для их температур плавления, можно построить кривую зависимости T и mV , как это показано на рис. 178.

Более точные результаты такой градуировки получают при определении температур плавления нагреванием и охлаждением, выводя из них среднее, а кроме того при достаточно медленном ведении нагрева и охлаждения, дабы предотвратить явления переохлаждения. Конечно, точность градуировки зависит от чистоты применяемых металлов, которые в расплавленном состоянии должны быть покрыты слоем вещества, предохраняющего их от окисления. В маленьких тиглях, при расплавлении небольшого количества металла результаты получаются менее точные, поэтому лучше применять тигли вместимостью 100 см³ и более. Ниже перечислены металлы и их температуры плавления, которые применяются для градуировки термопар:

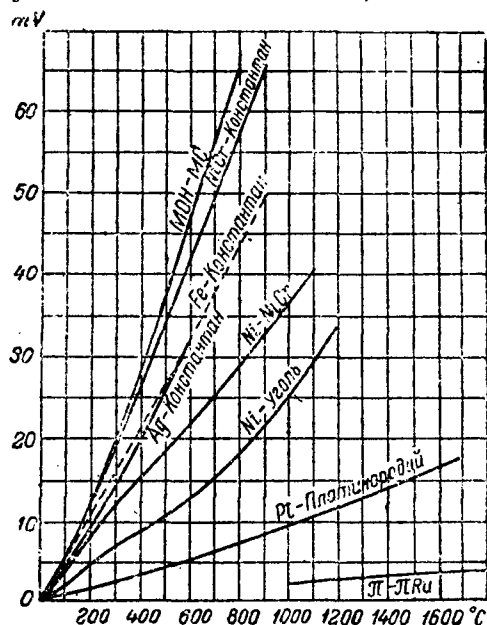


Рис. 178. Зависимость ЭДС от температуры для различных термопар

	°C
Ртуть	— 38,89
Олово	+31,84
Висмут	+271,0
Кадмий	+320,9

	°C
Свинец	+327,4
Цинк	+419,4
Сурьма	+630,0
Серебро	+960,5

	°C
Золото	+1063
Медь	+1083
Палладий	+1557
Платина	+1764

При градуировке пирометра методом сравнения его с эталонным пирометром необходимо стремиться получить пространство с равномерной температурой, в которое вводятся оба пирометра. Для этого пользуются водяной, масляной, соляной или металлической ваннами или же, наконец, электрической печью, рабочее пространство которой имеет равномерную температуру. Точность градуировки этим методом всецело зависит от температурного режима проверяемой и эталонной термопары.

Причины, вызывающие ошибки в измерении температур. При пользовании термоэлектрическими пирометрами целый ряд обстоятельств может изменить разность потенциалов свободных концов, что вызовет ошибки в измерении температур. Рассмотрим здесь некоторые из этих причин.

Неравномерность в материале проволоки может послужить причиной получения добавочных электродвижущих сил, которые бывают трудно учитываемы. Для проверки равномерности оба конца проволоки присоединяют к зажимам чувствительного гальванометра и ведут местный нагрев проволоки вдоль всей ее длины. При равномерном строении материала гальванометр не будет давать никаких отклонений. В случае же неравномерности, которая может занимать

весьма небольшое протяжение, это место можно рассматривать как спай термопары. При нагреве этого спаи на концах проволоки образуется некоторая электродвижущая сила, которая вызовет отклонение стрелки гальванометра. Такие дефектные места обычно вырезаются.

В случае, если проволоки термопар плохо защищены от соприкосновения с газами, расплавленными металлами или солями, это вызывает изменения показаний пирометра, а часто и порчу его.

Окисление проволоки термопар вызывает уменьшение ее электрического сопротивления и при пользовании малодомными гальванометрами это отразится на показании пирометра.

Вообще пользование гальванометрами с низким внутренним сопротивлением может вызвать целый ряд ошибок при измерении температур. Для примера возьмем платина-платинородиевую термопару, сопротивление которой пусть будет равно $2,6 \Omega$. Электродвижущая сила пусть будет равна 15 mV . Если милливольтметр потребует для такого показания $0,5 \text{ mA}$, то его сопротивление будет равняться 30Ω . Для нашего случая он покажет:

$$15 \frac{30}{30 + 2,6} = 13,8 \text{ mV}.$$

Положим теперь, что термопара прогрелась или что ее заложили глубже в печи и от этого ее сопротивление изменилось с $2,6$ до $3,6 \Omega$. Тогда гальванометр покажет всего

$$15 \frac{30}{30 + 3,6} = 13,4 \text{ mV},$$

т. е. на $0,4 \text{ mV}$ меньше, что составляет 3% . Ошибка при 1500° достигает 45° .

Если же внутреннее сопротивление гальванометра было больше например 300Ω , то мы для первого случая имели бы

$$15 \frac{300}{302,6} = 14,86 \text{ mV},$$

а для второго:

$$15 \frac{300}{303,6} = 14,82 \text{ mV},$$

т. е. ошибку всего в $0,3\%$, или $4,5^\circ$ при температуре в 1500° .

Теплопроводность и теплоемкость термопары оказывают также большое влияние на точность измерения температур. Если ввести термопару в среду с высокой температурой, то термопара будет передавать тепло наружу и тем больше, чем больше ее теплопроводность. Это обстоятельство может вызвать разность температур спаи и измеряемой среды. Термопары с большой теплоемкостью могут также не успевать указывать быстрые изменения температуры измеряемой среды; поэтому для таких измерений необходимо пользоваться термопарами с возможно меньшей теплоемкостью.

Чрезвычайно большие неточности в измерение температур вносит изменение температуры свободных концов термопары. Как говорилось уже выше, электродвижущая сила термопары пропорциональна не температуре измеряемой среды, а разности температур спаи и свободных концов термопары. Обычно пирометры градуируются при температуре свободных концов 0° или 20° . В практике же при недостаточно строгом надзоре температура свободных концов достигает 100° и даже выше. Поэтому необходимо или при-

нимать какие-либо меры к поддержанию температуры свободных концов на том значении, при котором происходила градуировка, или же высчитывать поправку и ею корректировать показание пирометра.

Поправка высчитывается следующим способом. Пусть пирометр был градуирован при температуре свободных концов t° . Температуру свободных концов в данный момент примем равной t°_1 , тогда к показанию пирометра следует прибавить величину $(t^{\circ} - t^{\circ}_1) c$, где c — некоторый коэффициент, зависящий от формы кривой температура — mV .

С некоторым приближением коэффициент c может быть взят из табл. 18¹.

Таблица 18

Pt — Pt Rh		Медь-константан		Железо-константан		Хромель-алюмель Ni-NiCr	
°C	c	°C	c	°C	c	°C	c
265—450	0,65	0—50	1,00	0—100	1,00	—	—
450—650	0,60	50—80	0,95	100—600	0,95	0—800	1,00
650—1000	0,55	80—110	0,90	600—1000	0,85	800—1000	1,05
1000—1450	0,50	110—150	0,85	—	—	—	—
—	—	150—200	0,80	—	—	—	—
—	—	200—270	0,75	—	—	—	—
—	—	270—350	0,70	—	—	—	—

Кроме поправки существует весьма простой способ исправления показания пирометра в зависимости от изменения температуры свободных концов. Для этого нужно лишь определить температуру свободных концов и корректором милливольтметра переставить стрелку последнего с нулевого положения на деление шкалы, равное температуре свободных концов. После этого температуры отсчитываются по нормальной шкале, проградуированной при температуре свободных концов, равной 0° или 20° . Целый ряд фирм изготавливает гальванометры, которые корректируются таким способом автоматически в зависимости от температуры гальванометра, но следует помнить, что температура гальванометра может быть и не равна температуре свободных концов, и тогда ошибка опять будет иметь место.

Чтобы уменьшить ошибку показаний пирометра вследствие изменения температуры свободных концов, последние стараются держать при возможно низкой температуре. Для этого был предложен целый ряд конструкций головок пирометров, охлаждающихся проточной водой, льдом и т. д. Но эти головки не получили распространения, так как они создают целый ряд неудобств в эксплуатации. Взамен их была выдвинута другая идея — применять компенсационные провода, концы которых вводились в среду с более или менее постоянной температурой. Эти компенсационные провода изготавливаются из таких материалов, которые при контакте с проволоками термопары не вызывают в последней добавочного термоэлектрического тока.

Причина такого явления заключается в том, что материал для каждого компенсационного провода подбирается с таким расчетом, чтобы в местах соприкосновения их с проволоками пирометра возникли электродвижущие силы, одинаковые по величине, но разного знака, взаимно друг друга уничтожающие и поэтому не оказывающие никакого влияния на показания милливольтметра. Для дешевых

¹ Bureau of Standards. Techn. Paper, № 170, p. 65.

термопар, как, например, нихромовых, константановых и т. п., в качестве компенсационных проводов могут служить проволоки из такого же материала, как и проволоки термопары, причем проволоки компенсационного провода могут быть меньшего диаметра.

Для дорогих термопар, как, например, платина-платинородиевая, изготовление компенсационных проводов из платинородия обошлось бы весьма дорого. С этой целью применяют различные сплавы, имеющие такую же зависимость $T^{\circ}-mV$, как и платина-платинородиевая термопара.

Гереус рекомендует компенсационные провода, изготовленные из медноникелевых сплавов, причем насколько близка электродвижущая сила этих проводов к ЭДС платина-платинородиевой термопары показывают следующие данные:¹

$^{\circ}C$	$Pt = Pt Rh$ mV	Компенсацион. провод mV
0	0	0
100	0,64	0,62
200	1,42	1,39
300	2,29	2,26
400	3,21	3,18
500	4,17	4,15

На рис. 179 представлена схема установки термоэлектрического пирометра с компенсационными проводами. Здесь ab и ac — платиновые и платинородиевые проволоки пирометра, a — точка соприкосновения их (спаянный контакт). Компенсационными проводами являются bd и ce ; в точках b и c эти провода соединены с проволоками пирометра, в точках же e и d — с медными проводами df и eg , которые ведут к зажимам f и g гальванометра G .

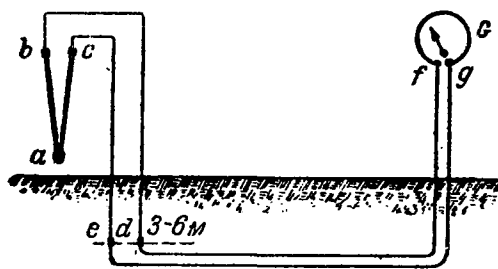


Рис. 179. Установка с компенсационными проводами

Таким образом при помощи компенсационных проводов можно отнести холодный спай термопары на далекое расстояние от горячего спая без каких-либо изменений электродвижущей силы прибора. Если, например, концы e и d зарыть в землю на глубину 3—6 м, то холодный спай термопары будет находиться в среде, где круглый год почти стоит постоянная температура, равная около 20° .

Можно конец компенсационного провода отвести в термостат, в котором постоянная температура поддерживается автоматически. Для устранения влияния температуры свободных концов на показание пирометра было предложено включать последовательно или параллельно² к термопаре сопротивление, которое автоматически менялось бы в зависимости от температуры, меняя соответствующим образом электродвижущую силу термопары. Но эти предложения распространения не получили ввиду неточности корректирования. Действительно, характер изменения добавочных сопротивлений иной, нежели изменения электродвижущей силы пирометра в зависимости

¹ G. Keinath, Elektrische Temperaturmessgeräte. S. 16, 1923.

² Bureau of Standards, Foote, Scientific Paper 292, S. 12.

от температуры свободных концов: изменение добавочных сопротивлений находится в линейной зависимости от температуры; температурный коэффициент более или менее одинаков при различных температурах, поправочный же коэффициент электродвижущей силы термопары имеет разные значения при разных температурах. Поэтому такое устройство может быть точным лишь на узком интервале температур.

Устройство термоэлектрических пирометров. Термоэлектрический пирометр состоит из двух проволонок термопары и арматуры, которая изолирует эти две проволоки от соприкосновения друг с другом и является защитной оболочкой. Кроме того, арматура должна быть так сконструирована, чтобы она не препятствовала удобному обращению с пирометром.

На рис. 180 изображены пирометры, изготавливаемые б. заводом Термоэлектроприбор. В зависимости от применения пирометры имеют ту или иную арматуру.

Легкая конструкция арматуры вполне приемлема в лабораторных условиях. Применение термопар без арматуры влечет обычно закручивание, лишние перегибы и порчу проволоки.

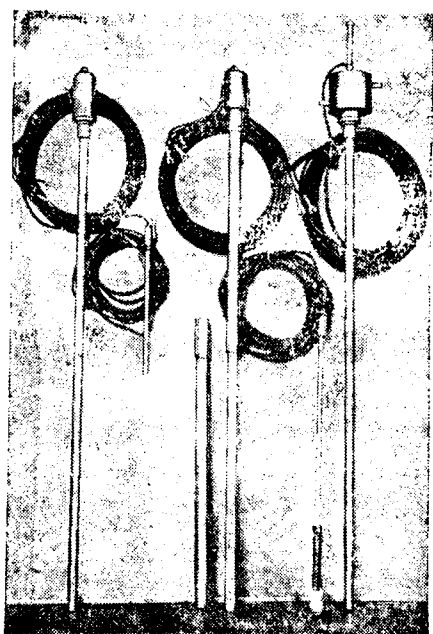


Рис. 180. Термоэлектрические пирометры

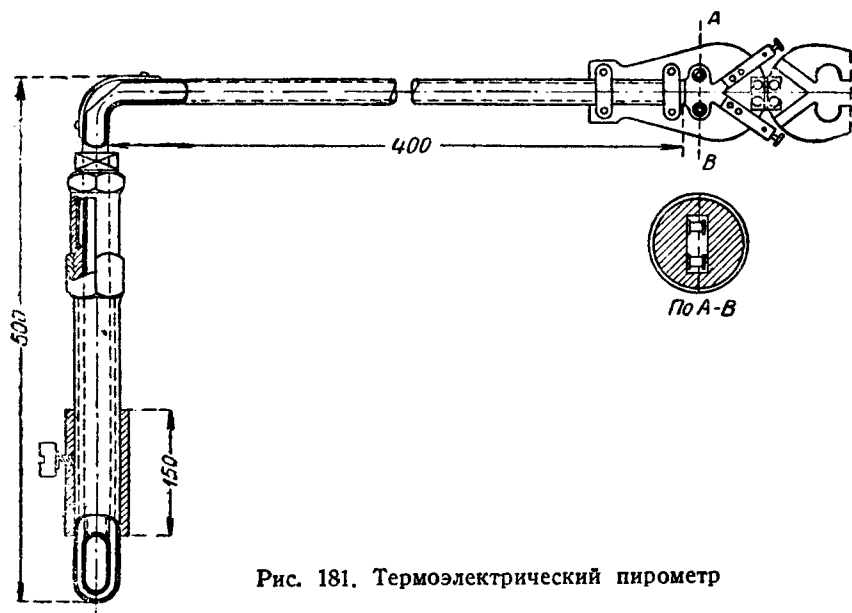


Рис. 181. Термоэлектрический пирометр

Для работы в цехах ставят более тяжелую арматуру. На рис. 181 изображен пирометр, предназначенный для измерения температуры в соляной ванне закалочной мастерской. Термопара одета в специаль-

ные фарфоровые трубочки для электрической изоляции проволочек. Поверх этого надеты два железных чехла — внутренний тонкий и наружный с более толстыми стенками. Необходимость надевать два чехла заключается в следующем: когда испортится наружный чехол, расплавленная соль проникнет в промежуток между чехлами; это приведет к тому, что нельзя будет снять наружный чехол. Тогда пирометр вновь разогревается до расплавления соли, наружный чехол снимается и заменяется новым. При этом термопара совершенно не пострадает. Если бы не было второго чехла, то расплавленная соль проникла бы до термопары и очистить последнюю без повреждения было бы трудно.

Измерение электродвижущей силы термопары.

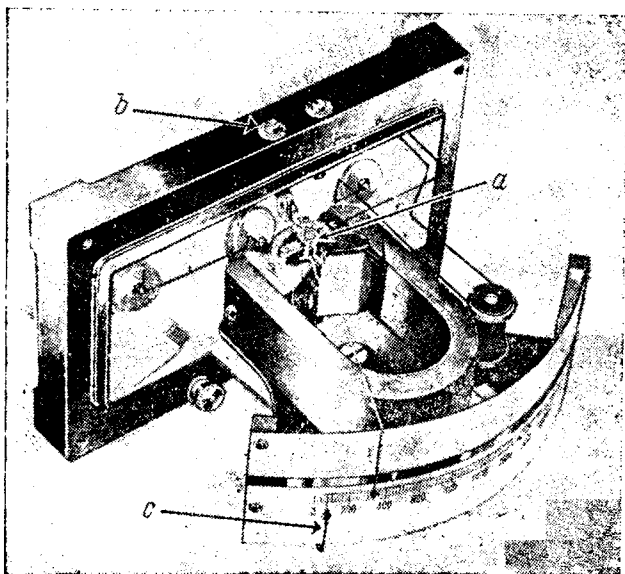


Рис. 182. Милливольтметр:

а — катушка, помещаемая между полюсными башмаками;
б — винт для установки на нуль; в — переставляемая стрелка

Измерение электродвижущей силы термопары производится двумя методами:

- 1) непосредственным отсчетом показаний гальванометра,
- 2) методом потенциометра.

1. Для непосредственного отсчета по гальванометру (милливольтметр) свободные концы термопары присоединяются непосредственно или чаще всего при помощи медных проводов к зажимам милливольтметра. Милливольтметр состоит из постоянного магнита (рис. 182) с привинченными к нему железными полюсными башмаками, между ко-

торыми для усиления магнитного поля вставляется железный сердечник. При этом образуется равномерное магнитное поле напряжением от 400 до 1500 гауссов. В промежуток между железными полюсными башмаками и сердечником вставляется катушка.

Магнит изготавливается из вольфрамовой или хромовой стали. За последнее время начали применять кобальтхромовую сталь, которая дает значительно большую коэрцитивную (задерживающую) силу. Для того чтобы магнитные свойства магнитов не изменялись со временем, их подвергают специальной обработке: варке в воде или в масле, размагничиванию на 10—20% переменным током и т. д.

Катушка гальванометра изготавливается из алюминиевой проволоки, диаметр которой доходит до 0,05 мм. Вес такой катушки колеблется в зависимости от назначения прибора от 0,8 до 3 г.

Катушка или подвешивается на тонкой проволоке, или же покоится в подшипниках, изготовляемых из сапфира, твердой стали и т. д. Ток подводится к катушке специальными пружинками.

Каждый гальванометр снабжен приспособлением, приводящим его стрелку в нулевое или вообще в желаемое начальное положение.

Если обозначить: H — напряжение магнитного поля в гауссах, i — силу тока в катушке в амперах, l — длину одного витка, r — радиус обмотки, n — число витков, то для вращательного момента M катушки гальванометра можно написать:

$$M = \frac{2 H \cdot i \cdot l \cdot r \cdot n}{9810} \text{ гсм.}$$

Этому моменту противодействует крутящий момент спиральных пружинок или подвеса. Для него мы имеем:

$$M_{кр} = \frac{J}{L} \cdot E \cdot \varphi,$$

где J — момент инерции сечения пружинок, L — длина пружинок, E — модуль упругости материала пружин, φ — угол кручения.

При равновесии, когда катушка остановится, оба момента равны, т. е.

$$M = M_{кр}$$

или

$$\frac{2 H \cdot i \cdot l \cdot r \cdot n}{9810} = \frac{J}{L} \cdot E \cdot \varphi.$$

Если обозначить электродвижущую силу термопары через e , сопротивление ее — R_t , сопротивление соединительных проводов — R_p и сопротивление гальванометра — R_g , то сила тока i выразится:

$$i = \frac{e}{R_t + R_p + R_g};$$

подставляя, получим:

$$\frac{2 l \cdot r \cdot n}{9810} \cdot \frac{H \cdot e}{R_t + R_p + R_g} = \frac{J}{L} \cdot E \cdot \varphi.$$

Для угла отклонения гальванометра:

$$\varphi = \frac{2 l \cdot r \cdot n}{9810} \cdot \frac{L}{J} \cdot \frac{H \cdot e}{E (R_t + R_p + R_g)}.$$

Это и будет общее выражение для отклонения гальванометра.

Для какого-либо данного гальванометра размеры катушек l , r , n известны, как и размеры пружинок или подвеса L и J . Поэтому для него выражение

$$\frac{2 \cdot l \cdot r \cdot n}{9810} \cdot \frac{L}{J} = \text{const} = k,$$

и тогда

$$\varphi = k \frac{H \cdot e}{E (R_t + R_p + R_g)}.$$

Из этого выражения следует, что при отсчете температур мало довольствоваться корректированием показания гальванометра на температуру свободных концов термопары.

На угол отклонения φ рамки гальванометра кроме электродвижущей силы термопары e , как видно из полученного выражения, влияет еще целый ряд других факторов. Ведь все члены кроме k вышеприведенного уравнения представляют собой далеко не постоянные величины. Все они изменяют свое значение при температурных колебаниях. В лабораторной обстановке температура помещения колеблется от 15° (зимой) до 25° (летом), а иногда в еще более широких пределах.

лах. А этого достаточно для того, чтобы считаться и с температурными коэффициентами K магнитного поля H ($K_H = 0,0001 — 0,0004$), модуля упругости E ($K_E = 0,0002 — 0,0004$), материала подводящих проводов, добавочных сопротивлений и рамки гальванометра (для меди и алюминия $K = 0,004$), а главным образом с температурным коэффициентом материала термопары.

Измерение электродвижущей силы помощью милливольтметров чрезвычайно удобно, но этот способ имеет, как уже указано, много недостатков, причем точность измерения зависит еще и от точности показания прибора. Следует принять во внимание, что в милливольтметрах нельзя получить такой точности, какую, например, получают в прецизионных приборах, предназначенных для измерения сильных токов.

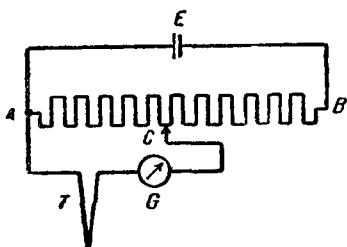


Рис. 183

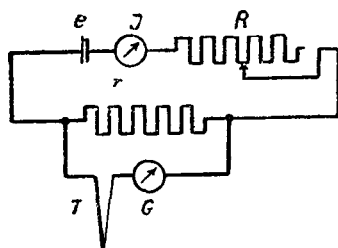


Рис. 184

Эти недостатки послужили причиной того, что в Америке начали усиленно пользоваться другим методом, а именно — методом потенциометра. Нужно отметить, что метод потенциометра является более громоздким, но несмотря на это его начали применять в Америке не только в лабораторной, но и в заводской обстановке. У нас он распространения пока не получил, и редко можно встретить лабораторию, применяющую определение электродвижущей силы термопары помощью потенциометра.

2. Измерение электродвижущей силы термопары потенциометром можно производить по нескольким схемам. Простейшая схема изображена на рис. 183. Здесь E — нормальный элемент, напряжение которого известно; AB — сопротивление, по которому скользит контакт C ; T — термопара и G — весьма чувствительный гальванометр. Измерение ЭДС (x) термопары производится в следующем порядке: передвигают контакт C до тех пор, пока гальванометр G не встанет на нуль.

Тогда:

$$x = E \frac{R_{AC}}{R_{AB}}.$$

Как видим, в этом уравнении x совершенно не зависит от сопротивления самой термопары.

Линдек¹ предложил несколько иную схему (рис. 184). Здесь G — опять чувствительный нуль-гальванометр, r — некоторое постоянное известное сопротивление, J — прецизионный амперметр. Изменяя сопротивление R , можно привести гальванометр G к нулю. Тогда ЭДС (x) термопары T будет равна:

$$x = i \cdot r,$$

где i — показание амперметра.

¹ Lindeck-Rohbe, Z. f. J. S. 244, 1899 und S. 293, 1900.

Большим недостатком этого метода является то обстоятельство, что ЭДС нельзя отсчитать непосредственно и ее приходится высчитывать. Для устранения этого недостатка предложено несколько видов изменить способ пользования схемой рис. 183. Для этого подбирались определенные сопротивления R_{ac} , которые приводили стрелку гальванометра G к нулю, когда термопара имела температуру, например, 700° , 800° , 1000° и т. д. Другими словами, при определенных сопротивлениях R_{ac} нулевому положению гальванометра соответствовало 500° , 600° и т. д. градусов. Если же температура термопары соответствовала промежуточному значению, например 550° , то стрелка гальванометра отклонялась от нулевого положения. Шкала гальванометра градуировалась на определенное число градусов.

Этим способом частично устраняются недостатки нормального метода потенциометра — температура отсчитывается, а не вычисляется, и уменьшаются неизбежные ошибки измерения милливольтметром вследствие его неточности. Действительно, положим, что точность показания гальванометра составляет $\pm 1\%$ и что нулевое положение его соответствует 1000° , тогда

при шкале	800—1200°	ошибка	$\pm 2^\circ$	т. е.	0,2%
‘ ‘	900—1100°	‘	$\pm 1^\circ$	‘	0,1%
‘ ‘	950—1050°	‘	$\pm 0,5^\circ$	‘	0,05%

от измеряемой температуры.

Регистрирующие пирометры. Для регистрации температур к милливольтметру пристраивается часовой механизм, который приводит в движение барабан с натянутой на него бумагой. Стрелка милливольтметра снабжается графитовым штифтом, который скользит по движущейся бумаге и зарисовывает кривую: температура — время. Такие самопишущие приборы строятся разнообразных конструкций, но обладая одним общим недостатком — малой чувствительностью, вследствие чего результаты таких записей весьма неточны. Дабы увеличить чувствительность приборов и избавиться от вредных сил трения штифта о бумагу, милливольтметр снабжается аппаратом, который через равные промежутки времени прижимает графитовый штифт к бумаге, в результате чего кривая записывается пунктирными линиями. В остальное время стрелка не касается бумаги. Этим приспособлением в значительной степени увеличили чувствительность прибора, но все же последняя остается еще малой, и поэтому для термического анализа такие приборы распространения не получили. Они применяются, главным образом, для контроля температур в цехах в тех случаях, когда температура долгое время должна поддерживаться на постоянном уровне или изменяться с небольшой, заранее предписанной, скоростью. Для такого контроля эти приборы чрезвычайно удобны, так как позволяют проследить колебания температуры за большой промежуток времени. Они очень облегчают работу, давая полную картину температурного режима печей, что в свою очередь позволяет сознательно отнестись к неполадкам термической обработки, для которой температура и скорости охлаждения и нагрева являются решающими факторами всей операции.

Такие приборы строятся также для одновременной записи нескольких кривых, и к ним можно предъявить следующие требования:

- 1) прибор должен плотно закрываться футляром, дабы препятствовать проникновению пыли в его сложный и тонкий механизм;
- 2) прибор должен быть возможно чувствителен и не изменять масштаба своих показаний со временем;
- 3) зарисовка кривой должна быть четкой и ясной;

4) промежуток времени между двумя прижимами графитового штифта должен быть возможно мал. Обычно этот промежуток колеблется от 0,5 до 1,0 мин.

г. Терморегуляторы. Особую группу пирометров составляют *терморегуляторы*, т. е. приборы, которые автоматически поддерживают температуру в печи на заранее заданном уровне.

Из многочисленных систем терморегуляторов рассмотрим терморегулятор Сименса, схема которого представлена на рис. 185. Термопара *a*, вставленная в печь, температуру в которой требуется поддерживать на известном уровне, соединена с гальванометром терморегулятора. Над шкалой гальванометра установлены передвижные площадки минимального *b* и максимального *c* контактов, положение ко-

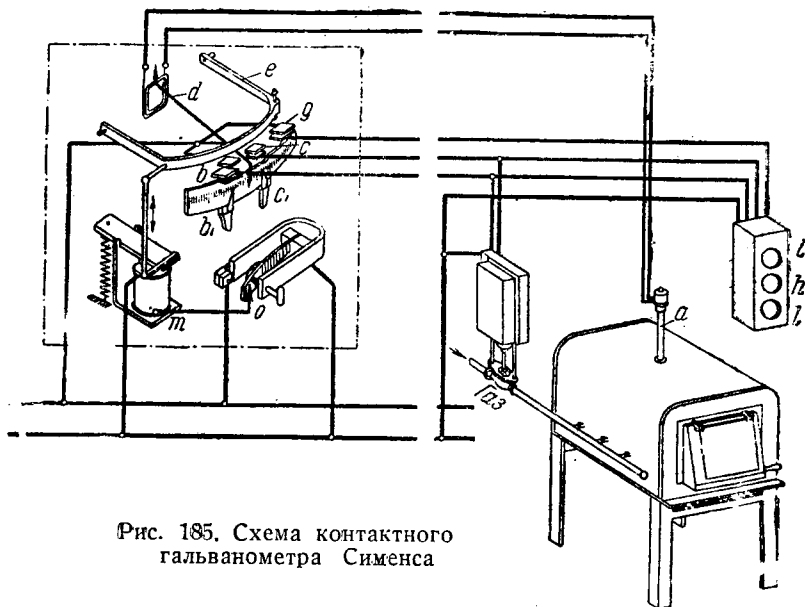


Рис. 185. Схема контактного гальванометра Сименса

торых на шкале определяется указателями b_1 и c_1 . Эти указатели устанавливаются от руки и определяют пределы, между которыми допускаются колебания температуры в печи. Представим себе, что температура в печи начинает падать и стрелка *d* гальванометра, следовательно, начинает передвигаться в направлении к минимальному контакту b_1 . Пока стрелка *d* не встанет над площадкой минимального контакта, периодически падающая дуга *e* не сможет вызвать замыкания ни минимального, ни максимального контакта, а вызовет замыкание нормального контакта *g*, в результате чего загорится белая сигнальная лампа *h*. Это укажет наблюдающему за печами, что температура в печи находится в допустимых пределах. Когда же стрелка гальванометра окажется над минимальным контактом *b*, то при очередном падении дуги происходит замыкание контакта *b* через стрелку. При этом включается синяя сигнальная лампа *i*, указывающая наблюдающему, что температура в печи достигла нижнего допустимого предела. Параллельно с лампой в ту же цепь включается либо мотор, регулирующий подачу в печь горючего (нефтяные или газовые печи), либо устройство по включению нагревательных элементов (электрические печи).

Точно то же происходит, если температура в печи поднимается и стрелка гальванометра становится над максимальным контактом *c*. В этом случае зажигается красная лампа *l* и вместе с тем прекра-

щается подача топлива в печь или выключаются нагревательные элементы.

Падение дуги происходит периодически в результате притяжения ее электромагнитом m , который включается в цепь или выключается из цепи биметаллическим разъединителем o . Действие биметаллического разъединителя основано на том, что при замкнутых им контактах происходит нагревание биметаллической пластинки, которая, стремясь распрямиться, размыкает контакты. Тогда наступает период охлаждения биметаллической пластинки, и она возвращается в первоначальное положение, снова нагревается, и т. д.

Примерно так же устроен терморегулятор Брауна.

3. Методы определения критических температур

а. Кривая: температура — время

$$f(T, z) = 0.$$

При охлаждении и нагревании металлов и их сплавов происходят различные превращения, сопровождаемые изменением их кристаллического строения, структуры, вызывающие в свою очередь изменение физических свойств, как-то: электропроводности, магнитных свойств, объемные изменения и т. д. Наипростейшим превращением можно назвать, например, плавление металла или сплава (переходящего из твердого в жидкое состояние), происходящего всегда при вполне определенной для данного металла или сплава температуре.

Температуры, при которых происходят эти превращения, называются *критическими температурами*. Зная эти температуры, можно построить диаграммы состояния сплавов, например, двух или трех компонентов при различных температурах. Эти диаграммы являются могущественным орудием для техников, работающих в области металлургии и термической обработки сплавов, так как с помощью их возможна рациональная постановка как способа приготовления металлических сплавов, так и их дальнейшая обработка.

Для определения критических температур пользуются различными методами, из которых наиболее распространенным следует считать метод *термический*. Он основан на том явлении, что превращения в сплавах сопровождаются термическим эффектом — поглощением или выделением теплоты, а собственно термический эффект улавливается приборами, измеряющими температуру.

Поясним это примерами. Возьмем какой-либо металл, например красную медь, которая в пределах температур от 0 до 1000° не испытывает никаких превращений. Нагреем эту медь до 800—900° и будем ее охлаждать в среде, температура которой остается постоянной, например на воздухе.

Охлаждение будет идти по уравнению:

$$t - t_0 = (T - t_0) \cdot e^{\frac{-c}{m \cdot s} z}, \quad (1)$$

где $t - t_0$ — разность температур между образцом и средой в данный момент, $T - t_0$ — разность температур между образцом и средой в начальный момент, z — время, s — теплоемкость образца, m — масса образца, c — коэффициент, зависящий от природы образца, среды и т. д.

Действительно за время dz и при падении температуры на dt образец теряет количество теплоты, равное $msdt$. Эта теплота пере-

дается окружающей среде, и ее можно считать пропорциональной разности температур образца и среды $(t - t_0)$ и времени dz , т. е. равной $-c(t - t_0) dz$.

Тогда:

$$msdt = -c(t - t_0) dz. \quad (2)$$

Интегрируя это уравнение и принимая во внимание, что в начальный момент при $z = 0$, $t = T$, найдем уравнение (1).

Здесь предположено, что среда достаточно велика и обладает достаточной теплопроводностью, чтобы оставаться при постоянной температуре, а теплоемкость образца постоянна при различных температурах.

Если теперь изобразить это уравнение графически, откладывая по оси ординат значения $t - t_0$, а по оси абсцисс — значения z , то в результате мы получим кривую, началом которой будет значение $T - t_0$ на оси Y , а ось X служит асимптотой (рис. 186 I, кривая $b\beta$).

Рассмотрим теперь охлаждение какого-либо образца, претерпевающего превращение. Здесь следует различать три случая: первый — превращение происходит при некотором интервале температур, второй — превращение происходит при некоторой постоянной температуре и третий — превращение сопровождается явлением переохлаждения.

1. Превращение происходит в некотором интервале температур. Кривая охлаждения для этого случая примет вид, изображенный на рис. 186 I (сплошная). По оси Y отложена температура, по оси X — время. В интервале температур bc имеет место превращение, вызывающее перелом кривой. Температуры bc будут критические температуры. Обозначим: k — количество выделяющейся новой фазы из 1 г нашего сплава, dk — количество выделившейся новой фазы за период падения температуры на dt и l — количество выделившейся теплоты при образовании новой фазы k . Тогда, подобно предыдущему, можно написать:

$$msdt = -c(t - t_0) dz + ml \frac{dk}{dt} dt. \quad (3)$$

$$\frac{dt}{dz} m \left(s - l \frac{dk}{dt} \right) = -c(t - t_0).$$

$$\frac{dt}{dz} = - \frac{c}{m} \frac{t - t_0}{s - l \frac{dk}{dt}}. \quad (4)$$

Из уравнения (2) мы имеем:

$$\frac{dt}{dz} = - \frac{c}{m} \frac{t - t_0}{s}. \quad (4')$$

Сравнивая уравнение (4') с уравнением (4), легко видеть, что расхождение обеих кривых будет тем больше, чем больше значение $\frac{dk}{dt}$.

При отсутствии превращения $\frac{dk}{dt} = 0$ и обе кривые сольются. Этот случай мы имеем на участке до b и для него можно написать:

$$\operatorname{tg} \mu_1 = \frac{dt}{dz} = - \frac{c}{m} \frac{T - t_0}{s}.$$

Для участка же ниже b :

$$\operatorname{tg} \mu_2 = \frac{dt}{dz} = -\frac{c}{m} \frac{T'' - t_0}{s - l \frac{dk}{dt}},$$

где T'' — критическая температура.

Значение $\operatorname{tg} \mu_2$ будет тем меньше, чем больше участок bc и, стало быть, чем больше значение $\frac{dk}{dt}$.

2. Превращение происходит при некоторой постоянной температуре. Кривая охлаждения для этого случая изображена на рис. 186, II. Участок bc параллелен оси X , $\operatorname{tg} \mu_2 = 0$ и $\frac{dk}{dt} = \infty$. Превращение протекает при постоянной температуре в течение промежутка времени z_0 .

Если бы теплоемкость s образца была одинаковая при различных температурах, то кривая ниже c должна была бы пойти параллельно кривой $b\beta$. Практически же теплоемкость обычно меньше при низких температурах, и поэтому кривая не будет параллельна $b\beta$.

Из уравнения (3) легко вычислить время, потребное на превращение. Действительно, для этого случая $dt = 0$, поэтому уравнение (3) напишется:

$$0 = -c(T' - t_0) dz + m l dk$$

и, интегрируя, найдем:

$$c(T' - t_0) z_0 = m l k;$$

$$z_0 = \frac{m l k}{c(T' - t_0)}.$$

Следует отметить, что практически весьма трудно получить на кривой охлаждения площадку bc , параллельную оси X . Этот участок всегда будет иметь некоторый уклон к оси X . Объясняется это тем, что затвердевание, например, жидкого сплава начинается около стенок тигля и пирометра, образуя около них твердую корку. Постоянная же температура будет поддерживаться на участке двух фаз — твердой и жидкой. Затвердевшая фаза будет отдавать тепло стенкам прибора, и температура ее будет поэтому несколько ниже. А эту температуру и указывает прибор.

3. Превращение сопровождается переохлаждением. Кривая охлаждения для этого случая примет вид, изображенный на рис. 186, III. Сплав, превращение которого (например затвердевание) должно происходить при температуре b'' , переохлаждается до температуры b' . При температуре переохлаждения появляется новая фаза, вызывающая выделение теплоты. Поэтому температура сплава начинает быстро расти до b''' , и в дальнейшем кривая принимает вид, аналогичный кривой рис. 186, II. Следует отметить, что температура b''' может и не быть равной температуре T' . Это обстоятельство зависит от скорости образования новой фазы и от количества образовавшейся при этом теплоты. Если скорость образования новой фазы значительна, то значение b''' будет близко к значению T' .

При малой скорости образования новой фазы, например при малой скорости кристаллизации, температура b''' будет ниже температуры T' (критической температуры).

6. Кривая: температура — скорость охлаждения

$$f\left(T, \frac{dt}{dz}\right) = 0.$$

В случае если нагревание или охлаждение не сопровождается превращением, мы будем иметь:

$$\frac{dT}{dz} = mT,$$

т. е. кривая b будет прямой, проходящей через начало координат (рис. 187, I).

В случае же превращения, совершающегося в каком-либо интервале температур, эта прямая примет вид кривой, изображенной на рис. 187, I (сплошная). При температуре b скорость охлаждения уменьшится и зафиксируется отклонением bb' от направления ab . В дальнейшем скорость охлаждения начнет увеличиваться, как указано на чертеже. Следует отметить, что для этого случая значение $\frac{dT}{dz}$ будет больше нуля, и поэтому точка b' должна лежать вправо от оси температуры.

В случае же, когда превращение происходит при постоянной температуре, скорость изменения температуры в течение некоторого промежутка времени будет равна нулю, т. е.:

$$\frac{dT}{dz} = 0,$$

и при этой температуре точка b' будет лежать на оси температур (рис. 187, II).

Если процесс сопровождается явлением переохлаждения, то выделение теплоты вызовет на кривой петлю, которая пойдет влево от оси Y (ось T), причем в некоторый момент скорость охлаждения будет иметь отрицательное значение, т. е. температура образца будет повышаться, а не уменьшаться. Это обстоятельство переместит точку b влево от оси T (рис. 187, III).

в. Кривая: температура—обратное значение скорости охлаждения:

$$f\left(T, \frac{dz}{dT}\right) = 0.$$

Такая кривая охлаждения была впервые построена Осмондом при изучении температуры превращения стали. Для построения ее необходимо определить время, потребное для понижения температуры на определенное число градусов.

В случае, когда охлаждение не сопровождается превращением, мы будем иметь:

$$\frac{dz}{dT} = \frac{1}{mT};$$

если

$$T = y \text{ и } x = \frac{dz}{dT},$$

то имеем:

$$x = \frac{1}{my},$$

т. е. кривая ab является гиперболой, асимптоты которой служат осями координат (рис. 188, I).

При превращении, происходящем в некотором интервале температур, кривая примет вид, изображенный на рис. 188, I (сплошная).

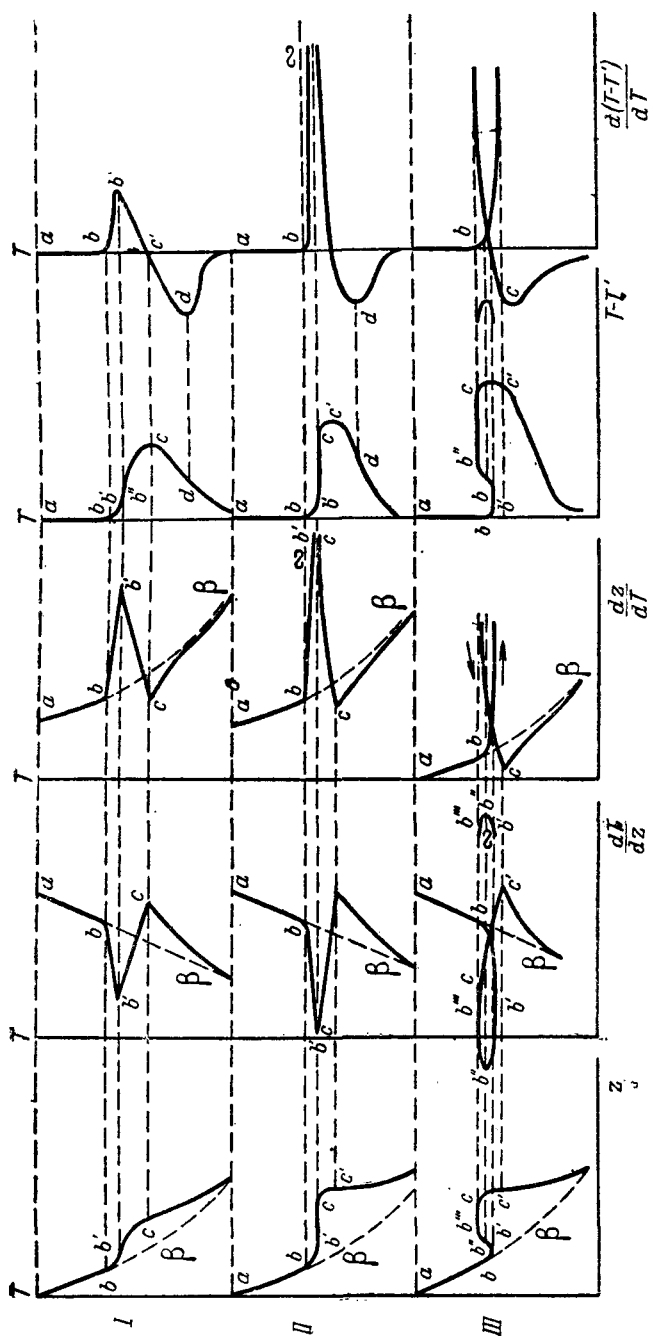


Рис. 186—190. Методы определения критических температур (Гийэ)

В случае же превращения, при котором $\frac{dT}{dz} = 0$, величина, обратная этому отношению, будет равна бесконечности, т. е.

$$\frac{dz}{dT} = \infty,$$

и кривая примет вид, изображенный на рис. 188, II.

Если же процесс превращения сопровождается явлением переохлаждения, то, как мы видели выше, скорость охлаждения $\frac{dT}{dz}$, переходя через нулевое значение, становится отрицательной. Величина же, обратная $\frac{dz}{dT}$, должна в этом случае пройти значение бесконечности.

Кривая для этого случая изображена на рис. 188, III.

г. Кривая: температура — разность температур образца и эталона.

$$f(T, T - T') = 0.$$

Исследуя критические температуры сталей, Робертс-Аустен предложил кроме температуры T испытуемого образца определять также температуры T' эталона, который охлаждался или нагревался в одинаковых условиях с испытуемым образцом. В качестве эталона служит какой-либо материал, не претерпевающий никаких превращений в интервале исследуемых температур.

Затем на основании данных опыта им устанавливалась кривая зависимости температуры образца и разности температур образца и эталона при данной температуре. Кривые, построенные этим методом, изображены на рис. 189, I, II и III.

Кривая а β (рис. 189, I) представляет собою случай, когда образец не претерпевает превращения. Для этого случая

$$T = T'$$

или

$$T - T' = 0$$

и кривая сольется с осью T .

Для случая, когда в испытуемом образце в некотором промежутке температур происходит превращение, кривая — начиная с момента начала превращения — отклонится вверх, так как в связи с превращением, сопровождаемым выделением или поглощением теплоты, скорость охлаждения (или нагревания) испытуемого образца будет иная, нежели скорость охлаждения эталона, который не претерпевал в данный момент никаких превращений. В результате этого явления образуется некоторая разность температур T и T' , и кривая пойдет, как указано на рис. 189, I (сплошная).

Если же превращение будет происходить при некоторой постоянной температуре, участок кривой bc' (рис. 189, II) будет перпендикулярен оси T .

Явление переохлаждения будет характеризоваться выгибом $bb'b''$, кривой abc (рис. 189, III).

д. Кривая: температура — производная разности температур образца и эталона по температуре

$$f\left(T, \frac{d(T - T')}{dT}\right) = 0.$$

Метод построения такой кривой впервые предложен Розенгеймом. Эта кривая строится на основании значений кривой $f(T, T - T') = 0$,

подобно тому, как кривая $f(T, \frac{dT}{dz}) = 0$ строится на основании данных кривой $f(T, z) = 0$.

В обоих случаях абсциссы кривых Розенгейна и $f(T, \frac{dT}{dz}) = 0$ являются угловыми коэффициентами касательных кривых Робертс-Аустена и $f(T, z) = 0$.

При построении кривых по методу Розенгейна по одной оси, как всегда, откладываются значения температуры T , а по другой — разности температур $d(T - T')$, приходящиеся на определенные и равные интервалы dT .

В случае, когда образец не претерпевает превращения, кривая Розенгейна ab сольется с осью T , так как $T - T' = 0$ (рис. 190, I).

Если же превращение протекает в течение некоторого интервала температур, кривая примет вид, изображенный на рис. 190, I. $\frac{d(T - T')}{dT}$ будет иметь максимум при температуре b' наиболее крутого подъема кривой Робертс-Аустена.

При максимуме же этой последней ее угловой коэффициент меняет знак, переходя через нуль, что соответствует точке c' кривой Розенгейна.

В случае если превращение происходит при постоянной температуре (рис. 190, II) или же сопровождается явлением переохлаждения (рис. 190, III), то абсциссы кривых при критической температуре bc будут равны бесконечности, так как dT будет стремиться к нулю, причем в последнем случае кривая дает петлю, указывающую на переохлаждение.

Мы рассмотрели пять способов построения кривых охлаждения. Из них первый способ дает наименее четкую картину, в особенности в тех случаях, когда превращение сопровождается небольшим термическим эффектом. Более резкую картину в этом отношении дают кривые $f(T, \frac{dT}{dz}) = 0$ и кривые, построенные по методу Осмонда. Но и эти две кривые, как и первая, имеют тот недостаток, что на них неизбежно отражаются все неправильности в нагревании и охлаждении окружающей среды, например печи. В результате те критические температуры, которые сопровождаются слабым термическим эффектом, могут быть вследствие этого совсем замаскированы.

Этот недостаток отсутствует в последних двух кривых, которые, так же как и две предыдущие, называются дифференциальными кривыми. Так как нагревание и охлаждение испытуемого образца и эталона производятся в одинаковых условиях, то и температуры их, пока не достигнуты критические точки, будут также одинаковы. Правда, за невозможностью иметь эталон с абсолютно одинаковой теплоемкостью с испытуемым телом некоторая разница температур между ними все же будет и до достижения критической точки. Но разница эта обычно весьма мала, и критические точки выявляются быстрым увеличением этой разницы. Внешняя среда оказывает здесь одинаковое влияние как на эталон, так и на испытуемый образец, а так как критические точки определяются в этом случае исключительно разницей температур между эталоном и образцом, то дифференциальные кривые лишены влияния внешней среды.

е. Определение критических температур. Выше мы рассмотрели целый ряд методов построения кривых охлаждения и нагревания. Для построения их необходимо произвести нагрев или охлаждение

испытуемого сплава и записать необходимые показания пирометра (T°) и секундомера (время — z).

На рис. 177 представлена схема установки приборов для обычной записи. Если при охлаждении или нагревании производить запись показаний пирометра и секундомера, то по данным записи можно построить обычные кривые.

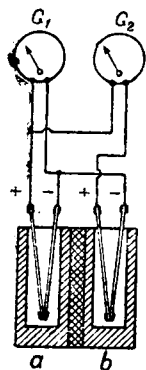


Рис. 191. Схема установки для дифференциальной записи

Для записи дифференциальной кривой кроме испытуемого образца необходимо еще иметь и эталон. В качестве эталона применяется какой-либо материал, который в интервале испытуемых температур не претерпевает никаких превращений. Схема установки для этого случая изображена на рис. 191.

Здесь a является испытуемым образцом, b — эталоном. Обе термопары соединяются с гальванометрами G_1 и G_2 , как это указано на рис. 191. Гальванометр G_1 будет указывать температуру испытуемого образца, гальванометр G_2 — разность температур испытуемого образца (T) и эталона (T').

До тех пор пока в образце не будет происходить никаких превращений, разность температур $T - T'$ будет теоретически равна нулю, практически же — ничтожна. В момент превращения разность сильно увеличивается. Определяя разность $T - T'$ для различных T , можно, пользуясь этими данными, построить кривую Робертс-Аустена или Розенгейна.

Следует отметить, что на четкость результатов сильно влияет форма образца и эталона, а также и их теплоемкость. Необходимо подобрать такой эталон, который имел бы, примерно, равную теплоемкость с испытуемым образцом. При исследовании критических температур сталей в качестве эталона применяют или красную медь или фарфор. При работе с алюминиевыми сплавами эталоном может служить чистый алюминий и т. д. Что же касается формы образца и эталона, то лучшей следует считать полуцилиндр. Плоскость разреза опиливается, дабы придать ей ровный вид, и затем оба полуцилиндра складываются, как указано на рис. 191, и между ними прокладывается слой асбеста. Снаружи образец и эталон также обкручиваются асбестовым шнуром. При нагреве или охлаждении следует следить, чтобы образец и эталон находились в одинаковых температурных условиях.

Несоблюдение этого правила повлечет за собой увеличение разности ($T - T'$), что может затемнить картину испытания.

Дифференциальный метод определения критических температур применяется, главным образом, при исследовании сплавов в твердом виде. Были предложения пользоваться этим методом при исследовании сплавов в жидком состоянии, для чего требуются специальные тигли, перегороденные на две части. Однако при этом результаты получились не вполне удовлетворительные.

К дифференциальному методу прибегают, главным образом, в тех случаях, когда превращение сопровождается небольшим термическим эффектом, так как этот метод чрезвычайно чувствительный и четко выявляет такие превращения, которые обычным методом были бы не замечены. Но будучи столь чувствительным, этот метод требует большого внимания и опыта в проведении его. Малейший недосмотр может сильно исказить характер кривой, а это может повлечь за собой неправильное заключение.

Вообще следует отметить, что термический анализ, являясь на пер-

вый взгляд весьма простой операций, скрывает в себе очень много тонкостей, с которыми необходимо считаться и которые необходимо предвидеть.

При работе, например, с жидкими сплавами необходимо подобрать тигель из соответствующего материала, который не изменял бы химического состава испытуемого сплава. Кроме того, необходимо принять меры против окисления расплавленного металла, выгорания его составных частей, и т. д.

В табл. 19¹ указаны материалы, которые применяются для изготовления тиглей, а также служат предохраняющим от окисления слоем при расплавлении различных металлов.

Как видно из табл. 19, материалами, предохраняющими испытуемый сплав от окисления, большей частью служат различные соли, которыми пользуются также при работе с соляными ваннами. Весьма часто бывает удобнее производить нагрев не в воздушном пространстве, а, например, в расплавленных солях. Для этого соль расплавляют в тигле и, поддерживая требуемую температуру, производят термическую обработку. При выборе солей необходимо, во-первых, руководствоваться ее химическим составом, который не должен изменять состав испытуемого сплава (например KCN — науглероживает железо и т. д.), и во-вторых — температурой плавления соли. В табл. 20 и 21 указана температура плавления некоторых солей и их эвтектических смесей (по Ландольт-Берштейну).

Вышеописанный метод определения критических температур наблюдением за показанием пирометра и за секундомером не отличается большой точностью, так как трудно бывает уловить небольшие колебания температур. Поэтому сейчас для определения критических температур служат специальные регистрирующие пирометры, в которых запись кривых охлаждения или нагревания производится при помощи светового луча на фотографическую бумагу. Благодаря этому кривая записывается чрезвычайно четко и наносится на бумагу без малейшего трения. В качестве измерительных приборов применяются зеркальные гальванометры большей частью системы д'Арсонваля, обладающие большой чувствительностью.

В настоящее время имеются приборы, производящие запись по одной из кривых следующих типов:

$$f(T, z) = 0, f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0, f(T, T - T') = 0.$$

Ниже мы рассмотрим некоторые наиболее совершенные приборы с автоматической записью термических кривых.

ж. Регистрирующий пирометр академика Н. С. Курнакова. Регистрирующий пирометр Курнакова², построенный в 1904 г., является и до сего времени одним из точнейших и чувствительнейших регистрирующих пирометров. Прибор помещается в темной комнате и состоит (рис. 192) из часового механизма *a*, который приводит во вращение барабан *b*. Механизм сцепления барабана *b* с часами *a* (зубчатые колеса) сконструирован таким образом, что, сцепляя при помощи передвижения рукоятки *d* ту или иную пару зубчаток, можно заставить вращаться барабан со скоростью один оборот за 0,5, 1,0, 4,0 или 24 часа.

Термопара, связанная с испытуемым образцом, присоединяется помощью медных проводов к зеркальному гальванометру *G*. Гальва-

¹ W. Guertler, Metalltechnischer Kalender, стр. 317, 1925.

² Известия СПб. Политехнического ин-та. т. 1, в. 1—2, стр. 183, 1904

Материалы, применяемые при плавлении металлов

Металл	М а т е р и а л т и г л я	Материал, предохра- няющий от окисления	Нейтральная атмо- сфера
Na	Иенское стекло до 860°	Вазелин	H ₂
K	Железо	Керосин	H ₂
Ca	Иенское стекло	—	—
Ba, Sr	Железо	—	CO ₂ , N ₂ , N ₂ , вакуум
Mg	Иенское стекло с асбестом или магнезией	—	—
	То же, что для Ca	—	—
	В качестве тигля и предохраняющего слоя смесь: 300 г BaCl ₂ , 100 г NaCl, 150 г KCl	—	—
	Графитовый тигель, выложенный внутри магнезией	KCl, NaCl только для сплавов	H ₂
	Фарфор для сплавов магния	KCl, LiCl	—
Al	Стекло для невысоких температур	—	—
B	Фарфор при Al-сплавах. Иенское стекло—хуже	KCl, NaCl	H ₂ и N ₂
C	Расплавлять в порошке В	B ₂ O ₃	H ₂
Si	Уголь или графит	2 BaCl ₂ + KCl	H ₂ и N ₂
	Марквардтова масса	—	H ₂ и N ₂
	Магнезитовая футеровка	—	—
	Уголь—при невысоких температурах	—	—
U, W	Графит с футеровкой Al ₂ O ₃	2 BaCl ₂ + KCl	H ₂ , N ₂
Mo, Cr	Магнезитовая футеровка	—	—
	Магнезитовый тигель не пористый	—	—
	При малом содержании Cr—марквардтова масса	—	—
Mn	Фарфор при быстрой работе	Только не угольный порошок	H ₂
	Лучше магнезия	—	N ₂ образует нитридовую корку
	Магнезит	BaCl ₂	—
Fe	Песочный моргановый тигель	—	—
	Фарфор	BaCl ₂	H ₂
	Магнезитовый тигель	KCN науглероживает	—
	Магнезитовый тигель	—	—
	Песочный тигель	2 BaCl ₂ + KCl	—
	Магнезитовая футеровка	Морская соль	—
		NaNO ₃ и MnO ₂	—

Металл	М а т е р и а л т и г л я	Материал, предохра- няющий от окисления	Нейтральная атмо- сфера
Co	Как и для железа; фарфор не годится	Гипс	H_2 и N_2
Ni	Как и для железа	—	H_2 и N_2
Pt	Все материалы, не содержащие углерода	Стекло	—
Cu	Уголь, графит, фарфор, окись алюминия, магнезия	$KCl + NaCl$, $BaCl_2$ Морская соль, раство- ряет окиси B_2O_3 + бура; KCN , $NaNO_3 + MnO_2$, гипс Толченый древесн. уголь	H_2 Светильный газ
Ag	Никелевые сосуды	$KCl + NaCl$	H_2
	Железные сосуды	KCN	—
	Уголь	—	CO_2
	Фарфор	—	Светильный газ
Au	Любой тигель	Как при Ag	Любая
Zn	Иенское стекло	$KCl + NaCl$	N_2
	Графит	Морская соль	Светильный газ
	Графитовый тигель	$NH_4Cl + ZnCl_2$ $NaNO_3 + MnO_2$	—
Ca, Hg	Иенское стекло	Гипс, угольный порошок	—
	Графит	$KCl + NaCl$	H_2
	Фарфор	$KCl + LiCl$	N_2
		Вазелин + бензин	CO_2
		Угольный порошок	—
Pb, Bi { Sn, Sb {	Графит	Бура	H_2
		Стекло, при высоких температурах	N_2
Pb, Bi { Sn, Sb {	Уголь	$KCl + NaCl$, $KCl + LiCl$, KCN угольный порошок	—
As, P	Магнезит	$BaCl_2$	CO_2
	Магнезиевый тигель	B_2O_3	N_2
	Графит	Бура и угольный поро- шок	H_2
Te, Se	Так же, как As и P	—	—
S	То же	—	—

Таблица 20

№ по пор.	Соль	Темпера- тура плавления, °С	№ по пор.	Соль	Темпера- тура плавления, °С	№ по пор.	Соль	Темпера- тура плавления, °С
1	LiCl	610	12	LiNO ₃	253	23	Na ₂ SiO ₃ . . .	1088
2	NaCl	801	13	NaNO ₃	310	24	NaBO ₂ . . .	966
3	KCl	780	14	KNO ₃	338	25	KVO ₂ . . .	947
4	CaCl ₂	772	15	NaNO ₂	284	26	NaOH . . .	318
5	BaCl ₂	940	16	Li ₂ SO ₄	850	27	KOH . . .	360
6	CuCl	420	17	Na ₂ SO ₄	884	28	PbO . . .	850
7	AgCl	453	18	K ₂ SO ₄	1075	29	KBr . . .	750
8	MnCl ₂	650	19	MgSO ₄	1120	30	Na ₂ CO ₃ . .	302
9	PbCl ₂	495	20	CaSO ₄	1360	31	KClO ₃ . . .	334
10	SnCl ₂	250	21	K ₂ CrO ₄	980			
11	CaF ₂	>1300	22	K ₂ Cr ₂ O ₇	395			

Таблица 21

№ по пор.	I компонент	Вес. %	Мол. %	II компонент	Вес. %	Мол. %	Температура плавления, °С
1	BaCl ₂	22,25	—	NaCl	77,75	—	635
2	Ba ₂ CO ₃	50,10	—	Na ₂ CO ₃	50,0	—	690
3	Na ₂ CO ₃	65,3	—	NaCl	34,7	—	620
4	Na ₄ P ₂ O ₇	53,4	—	NaCl	46,6	—	620
5	BaO	—	60	BiO ₃	—	40	750
6	BaCl ₂	—	35	CaCl ₂	—	65	600
7	CaCl ₂	—	56	BaCl ₂	—	44	450
8	CaCl ₂	—	80	CaF ₂	—	20	644
9	MnCl ₂	—	65	CaCl ₂	—	35	583
10	CaSiO ₃	—	52	CaF ₂	—	48	1128
11	CuCl	53,4	21	NaSiO ₃	—	79	932
12	CuCl	—	66	KCl	46,6	34	136
13	K ₂ Cl ₂ O ₇	—	73	KCl	—	27	314
14	KCl	—	72	KCl	—	28	366
15	K ₂ SO ₄	—	57	KF	—	46	305
16	KCl	—	29	KCl	—	71	690
17	KCl	—	40	LiCl	—	60	652
18	KF	—	59,5	NaF	—	40,5	732
19	KNO ₃	—	64	LiNO ₃	—	36	49,5
20	KNO ₃	—	50,5	NaNO ₃	—	60	218
21	MgSO ₄	—	40	K ₂ SO ₄	—	60	747
22	NaBO ₂	—	41,5	B ₂ O ₃	—	58,5	648
23	NaNO ₃	—	50	LiNO ₃	—	50	298
24	MnCl ₂	—	30	PbCl ₂	—	70	408
25	MnCl ₂	—	46	SrCl ₂	—	54	500
26	MoO ₃	—	75	Na ₂ MnO ₄	—	25	499
27	NaBO ₂	—	64	NaSiO ₃	—	36	800
28	NaCl	—	66	NaF	—	34	675
29	Na ₂ SO ₄	—	46	NaCl	—	54	623
30	Na ₂ SO ₄	—	70	NaF	—	30	742
31	NaNO ₃	—	52	NaNO ₂	—	48	221,5

нометр имеет два зеркала: одно — неподвижное и второе — подвижное, прикрепленное к рамке, вращающейся в зависимости от электродвижущей силы, развиваемой термопарой.

Электрическая лампочка в фонаре *e* дает пучок света, который направляется через узкую щель фонаря на оба зеркала гальванометра. Лучи света, отраженные от зеркал, направляются на барабан. Перед барабаном поставлена продолговатая чечевица *n*, которая собирает отраженные лучи, идущие от гальванометра, и концентрирует их в одной точке барабана. Таким образом на барабане будут две светящиеся точки: одна — неподвижная (собранные лучи от неподвижного зеркала) и вторая — движущаяся в плоскости чертежа (от подвижного зеркала).

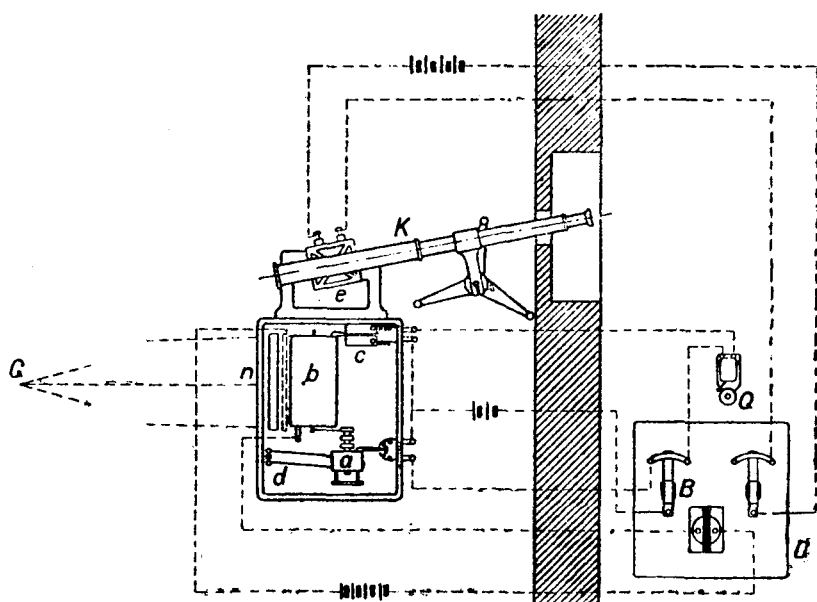


Рис. 192. Пирометр академика Н. С. Курнакова

Если теперь надеть на барабан светочувствительную фотографическую бумагу и дать барабану вращение, то светящиеся точки запишут на фотографической бумаге кривые, вид которых будет зависеть от комбинации движения световых точек и барабана. Конечно, запись будет видна лишь после проявления.

Размеры барабана таковы, что его можно обернуть бумагой размером 20×32 см.

На рис. 193 изображены кривые записи прибором Курнакова. Линия *a* получена лучами, отраженными от неподвижного зеркала. Барабан с бумагой совершал движение по направлению оси *оу*, поэтому при неподвижном зеркале лучи опишут прямую *аа'|оу*. Кривая *1* получена движением барабана и вторым зеркалом гальванометра. Критическая температура при 100 и 512° здесь ясно выражена, но критические точки при 250 — 275° можно было бы легко пропустить, так как превращение сопровождалось столь небольшим термическим эффектом, что даже такой чувствительный прибор уловил его весьма неясно.

Для улавливания превращений, сопровождаемых весьма небольшими термическими эффектами, следует прибегнуть к дифференциальному методу. Для того ко второму зеркальному гальванометру *С₂*

(рис. 191) присоединяют комбинированную термопару, которая будет записывать разность температур между испытуемым образцом и эталоном ($T-T'$). Эта разность будет также наноситься на бумагу в виде кривой $1d-1d-f(Z, T-T'')=0$. Кривая $1d-1d$ дает весьма ясные указания на превращения, сопровождаемые даже и небольшим термическим эффектом (рис. 193).

На рис. 194 дано еще несколько кривых, записанных на приборе Курнакова.

Как было сказано выше, вся записывающая аппаратура находится в темной комнате, управление же прибором совершается из соседней светлой комнаты от распределительного щита D (рис. 192). Зрительная трубка K позволяет следить за температурой испытуемого образца, не входя в темную комнату. Эта трубка направлена на подвижное зеркало гальванометра G . Зеркало же не только отражает направленные на него лучи от фонаря e , но отражает деления шкалы, помещенной под барабаном и освещаемой красным светом. Наблюдая из светлой комнаты за показаниями шкалы, легко определить температуру, так как начало шкалы и барабана лежит на одной вертикальной кривой и поэтому градуировка их общая.

Когда барабан совершит полный оборот, замыкается контакт c , и этим приводится в действие сигнальный звонок Q . Лаборант, замыкая контакт B , может остановить часовой механизм, не входя в темную комнату.

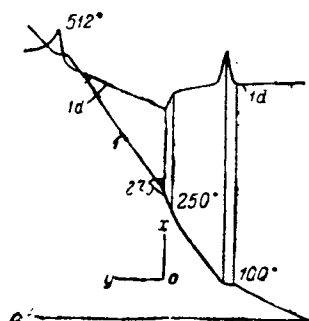


Рис. 193. Кривые записи пиометром акад. Н. С. Курнакова

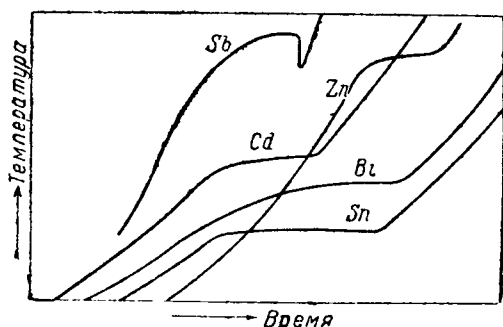


Рис. 194. Кривые записи пиометром акад. Н. С. Курнакова

Зеркальные гальванометры типа д'Арсонваля, применяемые для этого прибора, весьма чувствительны, и обычно при пользовании платина-платинородиевой термопарой записываемая кривая покрывает весь барабан при $250-270^\circ$, т. е. 1 мм на бумаге соответствует $1,0-1,2^\circ$ при расстоянии гальванометра от бумаги 1,7 м. Для работы в области более высоких температур можно или вводить между гальванометром и термопарой добавочное сопротивление, от чего уменьшится точность отсчета, или же, чтобы не понижать точности, следует применять способ компенсации, предложенный также Н. С. Курнаковым.

Способ компенсации заключается в следующем. Положим, мы работаем с платина-платинородиевой термопарой, зависимость ЭДС которой от температуры указана на стр. ... Положим далее, что мы хотим работать в области $700-900^\circ$. Для того чтобы записать на барабане прибора такую температуру, в систему термопара — гальванометр включается противоэлектродвижущая сила, равная по величине, но обратная по знаку электродвижущей силе, развиваемой

термопарой при заданной температуре, например, 700° . Тогда при 700° гальванометр покажет 0° и все дальнейшие отсчеты будут производиться в пределах $700\text{--}950^\circ$. Схема включения противоэлектродвижущей силы указана на рис. 195. Здесь A — аккумулятор с электродвижущей силой E .

Обозначим далее: e — электродвижущую силу термопары, R — общее сопротивление главной цепи, r и g — сопротивления реостата и гальванометра, J — силу тока главной цепи, i — силу тока в ответвлении, i' — силу тока в ответвлении при отсутствии аккумулятора.

Тогда можно написать:

$$J = \frac{E}{R}$$

и падение потенциала между n и m

$$v - v' = Jr,$$

но

$$i = \frac{v - v'}{r + g} = \frac{Jr}{r + g},$$

$$i' = \frac{e}{r + g}.$$

Компенсация будет полной, когда

$$i = i',$$

т. е.

$$\frac{Jr}{r + g} = \frac{e}{r + g},$$

откуда

$$Jr = e;$$

но

$$J = \frac{E}{R},$$

поэтому

$$r = \frac{eR}{E}.$$

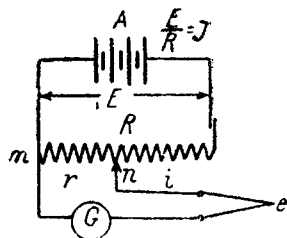


Рис. 195. Схема включения противоэлектродвижущих сил

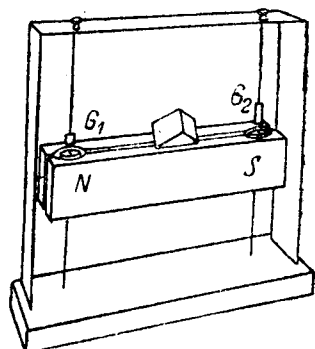


Рис. 196. Пирометр Ле Шателье—Саладена

По данным R , E и e находим величину r сопротивления реостата. Чтобы не испортить гальванометр, следует предварительно компенсацию производить при увеличенном его сопротивлении.

Этот способ, конечно, точнее способа включения добавочного сопротивления, но следует заметить, что здесь необходимо следить за значением E аккумулятора, так как изменение E повлечет за собой изменение показания гальванометра.

3. Регистрирующий пирометр Ле Шателье — Саладена. Регистрирующий пирометр Ле Шателье — Саладена¹ служит для записи кривой $(T, T - T') = 0$. Он состоит из двойного зеркального гальванометра G_1 и G_2 (рис. 196 и 197), к которому прикрепляется деревянный светонепроницаемый ящик, имеющий небольшое отверстие ($d = 1$ мм) для пропуска луча света от лампы N . Тонкий луч света, пройдя отверстие и линзы L_1 и L_2 , падает на зеркало гальванометра G_1 . Отразившись от зеркала, луч проходит призму P , затем, отра-

¹ Revue de Métallurgie, № 2, 1904; The Iron and Steel Metallurgist and Metallographist, № 3, 1904.

жаясь от зеркала гальванометра G_2 , проходит через линзу L_3 и падает на светочувствительную пластинку или бумагу M , вложенную в кассету.

Проследим теперь, как происходит запись кривой.

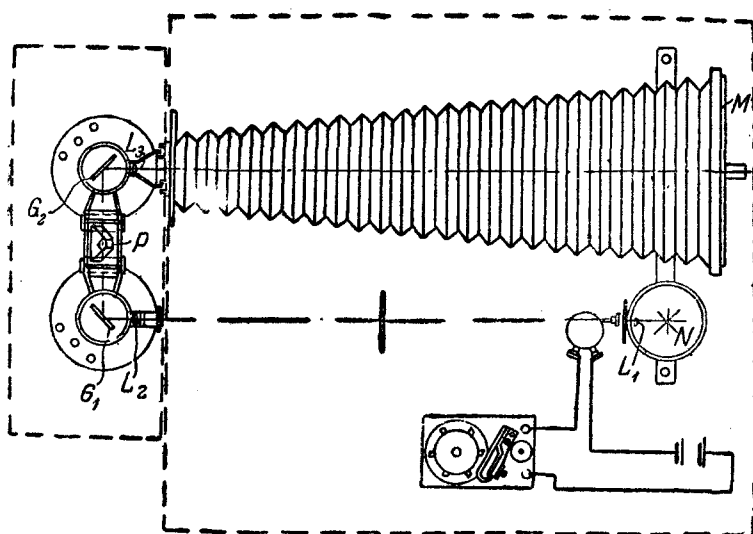


Рис. 197. Пирометр Ле Шателье—Саладена

К гальванометру G_2 присоединяется термопара, измеряющая T ; к гальванометру же G_1 присоединяется термопара, измеряющая $T-T'$, где T' — температура эталона. До тех пор пока $T-T'=0$, зеркало гальванометра G_1 не будет двигаться. С изменением T зеркало гальванометра G_2 будет менять свое положение, и луч зарисует при этом на светочувствительной бумаге участок Oa (рис. 198).

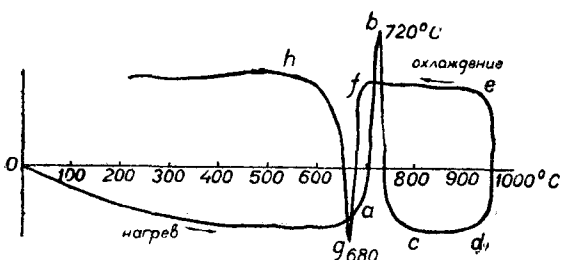


Рис. 198. Общий вид пирометра Ле Шателье — Саладена

В момент превращения скорость изменения T будет очень мала; поэтому зеркало гальванометра G_2 почти остановится на месте. Разность же температур $T-T'$ будет увеличиваться, и зеркало гальванометра G_1 будет отклоняться от своего нулевого положения. Луч света на участке ab будет двигаться в вертикальном направлении.

Когда процесс превращения закончится, разность температур $T-T'$ будет стремиться к первоначальному значению, и луч зарисует участок bc . При d выключена печь, и охлаждение пойдет аналогично предыдущему.

Регистрирующий пирометр Ле Шателье — Саладена получил очень большое распространение благодаря своей компактности. Он не требует специальной темной комнаты, его можно установить на фундаменте в любом помещении лаборатории. Установка и градуировка этого прибора чрезвычайно просты, а точность его измерения достаточно велика. К недостаткам этого прибора следует отнести то об-

стоятельство, что он позволяет снимать лишь дифференциальные кривые. Этот способ, будучи прост при работе с образцами в твердом виде, сильно усложняется при работе со сплавами в жидком состоянии. Поэтому в последних случаях описанный прибор почти не применяется.

и. Прибор Дежана. В 1905 г. Дежан¹ воспользовался пирометром Саладена для записи кривой

$$f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0.$$

В этом случае необходимость в эталоне уже отпала. Достаточно иметь испытуемый образец и две обыкновенные термопары. Следует отметить, что это обстоятельство в значительной степени упрощает и удешевляет термический анализ, так как отпадает необходимость в подгонке образца к эталону (изготовление полуцилиндра — рис. 191), что является задачей довольно сложной.

Одна термопара включалась Дежаном (рис. 199), как обычно, в гальванометр G_1 прибора Саладена. Вторая же включалась в индукционный гальванометр, рамка которого имеет две самостоятельные обмотки: одну — приключенную к термопаре и вторую — присоединенную к зажимам гальванометра G_2 прибора Саладена. Первая обмотка индукционного гальванометра приводит в движение катушку при пропускании через нее тока термопары. При движении катушки во второй обмотке индуцируется ток, который вызывает отклонения рамки гальванометра G_2 . Однако индуцированный ток второй обмотки получает значение лишь при быстрых движениях рамки, т. е. при закалке образца и т. п. скоростях охлаждения достаточной величины.

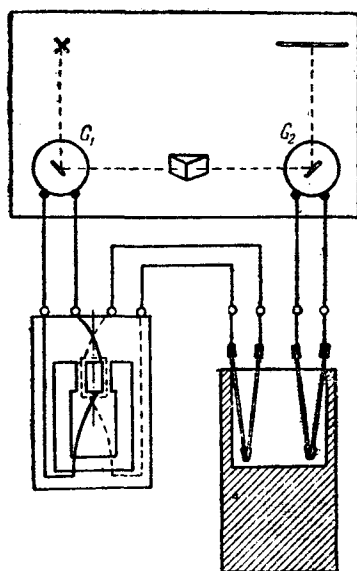


Рис. 199. Кривые записи пирометра Ле Шателье—Саладена

4. Методика построения бинарных диаграмм состояния

Для построения диаграммы состояния сплавов, состоящих из двух компонентов, поступают следующим образом. Сначала готовят несколько сплавов с различным содержанием компонентов, например таких:

Компоненты %	С п л а в						
	1	2	3	4	5	...	9
А	90	80	70	60	50	...	10
В	10	20	30	40	50	...	90

Затем одним из рассмотренных выше способов термического анализа определяют для каждого из этих сплавов его критические точки. Полученные при термическом анализе данные обрабатывают следующим

¹ Revue de Métallurgie, стр. 701, 1905.

щим образом. Берут прямоугольную систему координат и относят ось абсцисс к концентрациям, а ось ординат — к температурам. На оси абсцисс отмечают точки, соответствующие составу испытанных сплавов, и через них проводят вертикали, т. е. линии, параллельные оси ординат. На этих вертикалях (фигуративных линиях сплавов) отмечают температуры, соответствующие критическим точкам исследованных сплавов. Затем соединяют между собой критические точки, соответствующие одинаковым превращениям (например, началу кристаллизации жидких сплавов, концу затвердевания сплавов, началу выпадения второй фазы из твердых растворов и т. д.). При этом соединение между собой отдельных точек необходимо производить так, чтобы получающиеся линии диаграммы были или *плавными* кривыми или прямыми линиями, хотя бы для этого пришлось в отдельных местах эти линии проводить не через точки, а между ними. Совершенно ясно, что отдельные точки, расположенные вне проведенных кривых, свидетельствуют не о какой-либо физической закономерности, а только о неучтенных погрешностях эксперимента.

Судить о том, в какой мере данные точки относятся к одной кривой или прямой, т. е., иными словами, в какой мере эти точки соответствуют *одинаковому* физическому процессу, можно на основании многих признаков. Прежде всего большую роль здесь играет аналогия получаемой диаграммы с другими, хорошо известными ранее. В очень многих случаях такое сопоставление исследуемой диаграммы с ранее известными укажет экспериментатору характер той или иной линии. Во-вторых, в тех случаях, когда линии диаграммы относятся к области первичной кристаллизации (т. е. являются ликвидусом и солидусом), о природе этих линий можно судить по непосредственному наблюдению за сплавом; так, если на термической кривой зарегистрирована критическая точка, а сам сплав остается еще жидким, очевидно, эта точка соответствует началу кристаллизации, т. е. принадлежит линии ликвидуса. Точно так же можно непосредственно наблюдать конец кристаллизации сплава и соответствующую точку на термической кривой отнести к линии солидуса. В-третьих, если порядок соединения отдельных точек не ясен, нужно взять еще ряд промежуточных сплавов и для них произвести термический анализ. Так как кривые диаграммы состояния преимущественно являются непрерывными плавными линиями, то, руководствуясь этим, можно установить принадлежность ряда точек к одной линии диаграммы.

В сплавах с эвтектическим или эвтектоидным превращением большую трудность для экспериментатора представляет установление точного положения как самой эвтектической (эвтектоидной) точки, так и конечных точек линии эвтектики (эвтектоида). Последнее существенно потому, что от точной фиксации конечных точек эвтектики будет зависеть установление растворимости или, наоборот, нерастворимости данных двух компонентов в твердом состоянии. В самом деле, если окажется, что крайние точки эвтектической линии лежат на осях ординат, то, значит, данные компоненты не образуют твердых растворов, а сама диаграмма состояния принадлежит к первому элементарному типу. Наоборот, если крайние точки эвтектической линии лежат на некоторых расстояниях от крайних осей ординат, то это означает, очевидно, что данные компоненты образуют твердые растворы ограниченной растворимости.

Простым и достаточно точным способом установления точного положения эвтектической точки и крайних точек эвтектической линии является построение так называемого *треугольника Тамманна*.

Способ этот основывается на том, что длина горизонтального

участка c_1d_1 и c_2d_2 на кривой охлаждения (рис. 200) сплава, застывающего с образованием эвтектики; пропорциональна времени образования эвтектики. Время же образования эвтектики зависит, очевидно, от скорости охлаждения сплава и от общего весового количества эвтектики (т. е. от общего весового количества сплава и от относительного количества эвтектики в нем). Таким образом, если все сплавы — одинакового веса и охлаждаются с одинаковой скоростью, то эти длины будут пропорциональны весам эвтектик, т. е.

$$c_1d_1 : c_2d_2 = E_1 : E_2, \quad (1)$$

где c_1d_1 и c_2d_2 — длины горизонтальных участков на кривых охлаждения двух сплавов I и II, а E_1 и E_2 — соответственно весовые количества эвтектик в этих сплавах.

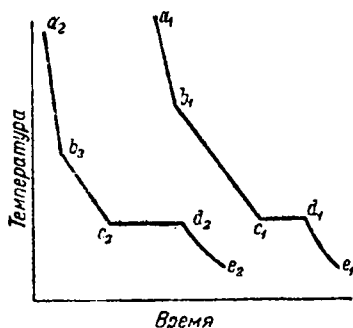


Рис. 200. Прибор Дежана. Кривая охлаждения сплава с эвтектикой

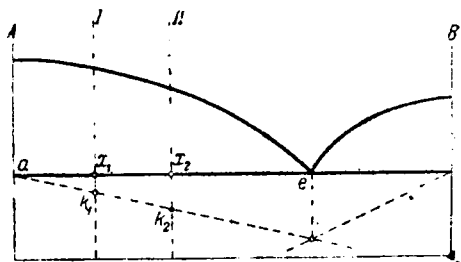


Рис. 201. Треугольник Тамманна

По правилу рычага мы имеем (рис. 201):

$$E_1 = \frac{\overline{ax_1}}{\overline{ae}} Q$$

и

$$E_2 = \frac{\overline{ax_2}}{\overline{ae}} Q,$$

откуда

$$E_1 : E_2 = \overline{ax_1} : \overline{ax_2}. \quad (2)$$

Сопоставляя равенства (1) и (2), можно написать:

$$c_1d_1 : c_2d_2 = \overline{ax_1} : \overline{ax_2}.$$

Отсюда следует, что если от линии эвтектики отложить (например вниз) на вертикалях, соответствующих отдельным сплавам, отрезки, равные или пропорциональные длинам горизонтальных участков на кривых охлаждения (отрезки x_1k_1 и x_2k_2 на рис. 201 соответственно пропорциональны отрезкам c_1d_1 и c_2d_2 на рис. 200), концы этих отрезков (т. е. точки k_1 , k_2 и т. д.) окажутся лежащими на одной прямой линии (k_1k_2).

Легко видеть, что эта прямая пересекает линию эвтектики в ее конечной точке и что наибольший отрезок эта прямая отсекает на вертикали эвтектического сплава.

При построении треугольника Тамманна следует руководствоваться следующим:

1) треугольник Тамманна нужно строить для каждой ветви линии эвтектики отдельно; абсцисса эвтектической точки определяется пересечением двух сторон треугольника Таммана (рис. 201);

2) необходимо быть уверенным, что сплавы охлаждались в совершенно одинаковых условиях;

3) следует убедиться, что исследуемые сплавы взяты в одинаковом количестве.

Если нарушено второе условие, то построение треугольника Тамманна невозможно, так как слишком сложна зависимость между длиной отрезков на кривых охлаждения и скоростью охлаждения.

Если нарушено третье условие; т. е. сплавы имеют разный вес, то предварительно необходимо все сплавы привести расчетным путем условно к одному весу и соответственно изменить длины горизонтальных участков, зная, что они будут пропорциональны весам. Надо, впрочем, иметь в виду, что приведение сплавов к одному весу допустимо лишь при сравнительно небольших отклонениях в их действительных весах, так как иначе условия охлаждения их будут неодинаковы.

ГЛАВА V

ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

1. Электропроводность

Электрическое сопротивление r проводника длиной l м и поперечным сечением s мм² при температуре t равно:

$$r_t = \rho_t \frac{l}{s} \Omega,$$

где ρ — удельное сопротивление материала, т. е. сопротивление проволоки длиной 1 м и поперечным сечением 1 мм².

Обратная величина удельного сопротивления $E = \frac{1}{\rho}$ называется удельной проводимостью материала.

Весьма часто удельное сопротивление дается не в омах на 1 мм²/м, а в омах на 1 см³ материала. Тогда

$$\rho_t \frac{\Omega}{\text{см}^3} = \rho_t \frac{\Omega \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} 10^{-4}.$$

Один ом равен 10⁹ единицам системы: сантиметр—грамм—секунда, т. е.

$$1 \Omega = 10^9 \text{ CGS.}$$

Например удельное сопротивление железа при $t = 20^\circ \text{C}$ в среднем равно:

$$\begin{aligned} \rho_{20} &= 0,10 \Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}, \\ \rho_{20} &= 0,10 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{см}^3, \\ \rho_{20} &= 0,10 \cdot 10^{-4} 10^9 = 0,10 \cdot 10^5 \text{ CGS.} \end{aligned}$$

В зависимости от температуры удельное сопротивление ρ изменяет свое значение, и если обозначить через α — температурный коэффициент, указывающий, во сколько раз изменилось сопротивление проводника при разности температур в 1^о C, то можно написать:

$$\rho_T = \rho_t [1 + \alpha (T - t)],$$

где T и t — соответствующие температуры.

В табл. 22 приведены удельные сопротивления и температурные коэффициенты некоторых металлов и сплавов.

Из наиболее распространенных способов измерения сопротивления следует считать способы мостика Уитстона и двойного моста Томсона.

Схема измерения неизвестного сопротивления x мостиком Уитстона¹ изображена на рис. 202. Для получения разности потенциалов между V' и V'' , равной нулю (тогда гальванометр не дает откло-

¹ Philos. Trans., стр. 313, 1843.

Таблица 22

М а т е р и а л	Проводи- мость 1 см ³ × 10 ⁻⁵ при 0°	Сопротив- ление 1 см ³ × 10 ⁴ при 0° С	Температурный коэффициент × 10 ³	Сопротивление проволоки длиной 1 м и поперечным сечением 1 мм ² при 20° С
Алюминий	37,0	2,69	4,26	0,0269
Висмут	0,91	110,00	4,46	0,1980
Вольфрам	18,1	5,50	4,64	0,0601
Железо чистое	11,0	9,065	6,57	0,9210
0,10% С	10,0	—	—	0,1000
0,50% С	8,0	—	4,60	0,1250
1,00% С	6,7	—	—	0,1500
Золото	45,6	2,19	3,93	0,0221
Иридий	16,4	6,10	3,93	0,0658
Кадмий	12,9	7,76	4,24	0,1080
Кобальт	10,2	9,72	3,66	0,1040
Кремний	—	—	- 0,2 + 0,06	—
Магний	23,0	4,35	3,90	0,047
Марганец	22,7	4,40	—	(0°) 0,044
Медь чистая	64,0	1,56	4,33	0,017
Молибден	22,7	4,40	4,35	0,0478
Никель	8,5	11,75	5,21	0,130
Олово	8,95	11,14	4,47	0,124
Платина	9,9	10,06	3,92	0,109
Родий	21,3	4,70	4,43	0,0512
Ртуть	1,04	95,80	0,92	0,975
Серебро	68,0	1,47	4,10	0,0159
Сурьма	2,56	39,0	4,73	0,427
Титан	0,28	357,1	—	3,571
Углерод (графит)	—	4000—10000	—	—
Хром	38,4	2,60	—	(0°) 0,026
Цинк	17,4	5,57	4,17	0,0623

нения, так как сила тока i будет равна нулю), как известно, необходимо, чтобы

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{x},$$

откуда

$$x = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}.$$

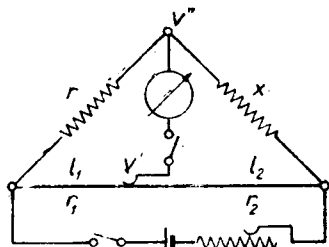


Рис. 202. Схема мостика Уитстона

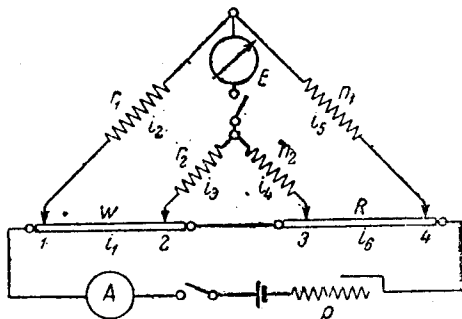


Рис. 203. Схема мостика Томсона

По такой схеме изготавливаются приборы самых разнообразных конструкций, которые применяются главным образом для измерения сравнительно больших сопротивлений — примерно от 5 до 10 000 Ω.

Для измерения малых сопротивлений пользуются двойным мостом Томсона¹, схема которого изображена на рис. 203.

Искомое сопротивление здесь W , которое последовательно соединено с сопротивлением R , амперметром A , регулировочным реостатом ρ и аккумуляторной батареей E . Контакты 1—4 — передвижные; к ним присоединяются сопротивления n и r , причем эти сопротивления подбираются так, чтобы

$$n = cr,$$

где c — коэффициент, равный 10 или 100.

Для приведения стрелок гальванометра к нулю, необходимо иметь

$$\begin{aligned} i_1 W + i_3 r_2 &= i_2 r_1, \\ i_6 R + i_4 n_2 &= i_5 n_1 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{i_1}{i_2} \cdot \frac{W}{r_1} &= 1 - \frac{i_3}{i_2} \cdot \frac{r_2}{r_1}, \\ \frac{i_6}{i_5} \cdot \frac{R}{n_1} &= 1 - \frac{i_4}{i_5} \cdot \frac{n_2}{n_1}. \end{aligned}$$

Так как

$$i_1 = i_6, i_3 = i_5, i_2 = i_4$$

и

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

то имеем

$$\frac{i_1}{i_2} \cdot \frac{W}{r_2} = \frac{i_6}{i_5} \cdot \frac{R}{n_1},$$

откуда

$$\frac{W}{R} = \frac{r_1}{n_1} = \frac{1}{c}$$

или

$$W = \frac{R}{c}.$$

Из этого выражения видно, что сопротивление соединительных проводов не имеет влияния на результаты измерения.

Методом электропроводности пользуются не только для определения электрических свойств (проводимости, сопротивления) металлов и их сплавов, но также и для определения превращения в твердых сплавах при их нагревании и охлаждении. Для этой цели, как указывалось выше, служит термический анализ, но в некоторых случаях он является недостаточным, в особенности, когда тепловой эффект превращения незначительный. Тогда прибегают к помощи других методов, позволяющих установить то, что термический анализ оставлял невыявленным. Среди таких методов кроме *дилатометрического* и метода *закалки* весьма чувствительным является и метод *электропроводности*. Сущность его заключается в том, что через определенные температурные интервалы измеряется сопротивление образца. Полученные результаты наносятся в виде кривой (сопротивление, температура). Резкие переходы и переломы этой кривой указывают, как и в термическом анализе, на превращение в сплав. Большие затруднения в получении точных результатов испытания представляла разработка прибора, в котором можно было бы изме-

¹ W. Thomson, Philosophical Magazine, стр. 149, 1862.

рять электросопротивление с достаточной точностью при высоких температурах.

Большая заслуга в разработке всего метода испытания и конструкции приборов принадлежит П. Я. Сальдау¹. На рис. 204 и 205 изображен зажимной прибор его конструкции. Здесь *a* — стержни из хромоникелевой стали для подводки тока, *b* — термопара, *c* — исследуемый образец, *d* — холодильник, *e* — вспомогательный стеклянный холодильник для стержней, *f* — резиновые рукава для соединения концов вспомогательных холодильников и *g* — подставка при смене образцов. Испытуемый образец, как это указано, закрепляется стержнями *a*, которые проводами присоединяются к двойному мостику Томсона. В таком виде зажимной прибор вставляется в электрическую печь типа печи Гергеуса. Чтобы при нагревании образец не окислялся и этим не изменял своего сопротивления, в печь вводится какой-либо нейтральный газ. Скорость нагревания образца регули-

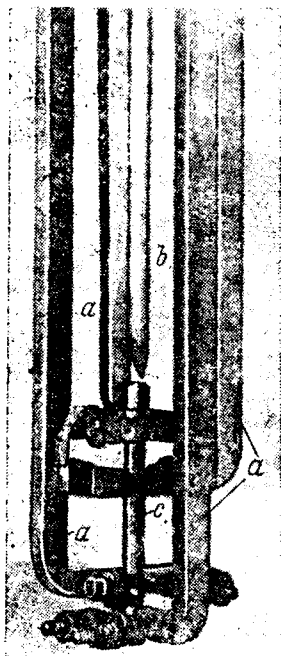


Рис. 204. Зажимной прибор
П. Я. Сальдау

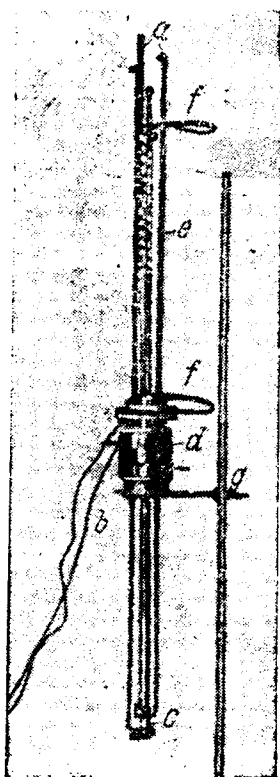


Рис. 205

руется по желанию, и отсчеты на мостике Томсона могут быть производимы через каждые 5° , если этого требует точность исследования. Для отсчета сопротивления требуется не более 15 сек., так что при не очень быстром нагреве точность измерения электросопротивления по отношению к температуре можно принять равной 1° .

На рис. 206 представлена кривая электросопротивления в зависимости от температуры для стали, содержащей 0,11% С, определенная

¹ 1) П. Я. Сальдау, Метод электропроводности при высоких температурах, 1917; 2) Ж. Р. Х. О., 46, стр. 994, 1914.

описанным выше методом. На кривой отчетливо видны переломы, соответствующие критическим температурам.

При испытании методом электропроводности серии сплавов двух компонентов результаты наносят в виде диаграммы, откладывая по оси x химический состав сплава, а по оси y — значение электропроводности. Характер кривых, получаемых при этом, зависит от фаз, составляющих сплав.

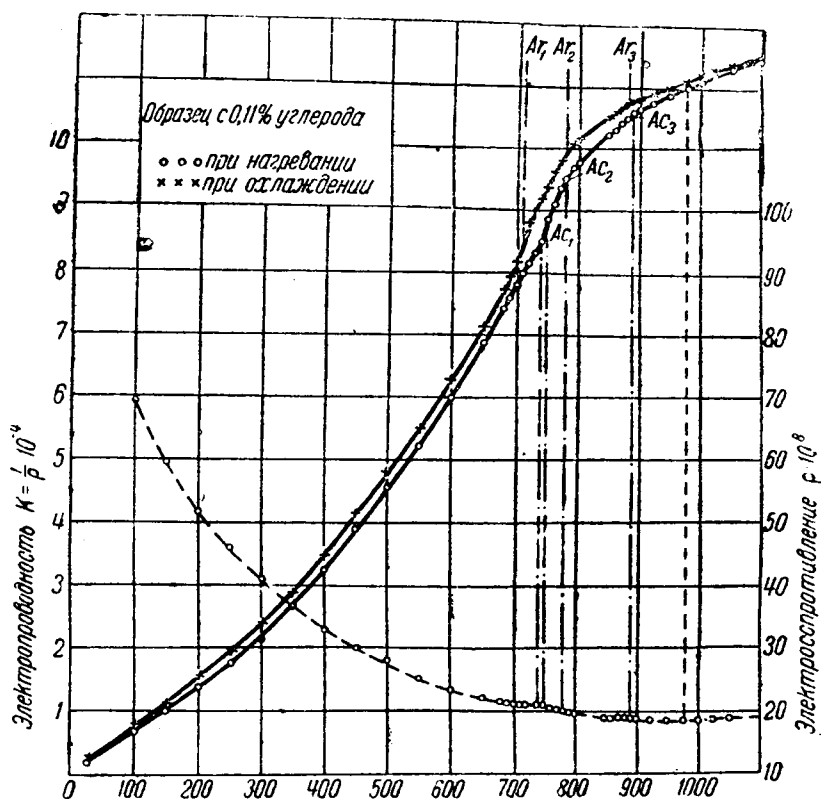


Рис. 206

В случае, если оба компонента выкристаллизовываются в чистом виде, кривая электропроводности представляет собой прямую. В случае твердых растворов получаем кривую. В случае же предельной растворимости кривая получается комбинированной.

2. Испытание магнитных свойств

а. Общие сведения. Магниты разделяются на естественные (магнитный железняк Fe_3O_4) и искусственные (стальные полосы, намагниченные или натиранием их магнитом или посредством электрического тока). Взаимодействие двух постоянных магнитов таково, что их одноименные полюса взаимно отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Сила взаимодействия двух полюсов с количеством магнетизма или магнитной массы m_1 и m_2 равна, согласно закону Кулона:

$$f = c \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где r — расстояние между полюсами, c — постоянная, зависящая от окружающей среды.

Принимая $c=1$, за единицу магнитной массы m принимают такую массу, которая на расстоянии 1 см отталкивает равную ей массу с силой 1 дин. Размерность магнитной массы тогда будет следующая:

$$\frac{mm}{r^2} = f,$$

или

$$m = r \sqrt{f}$$

или

$$m = \text{длина} \sqrt{\text{дина}} = \text{см} \sqrt{\text{см} \times \text{г} \times \text{сек.}^{-2}} = \text{г}^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ сек.}^{-1}$$

Если свободно подвешенный магнит ввести в пространство, где он принимает вполне определенное положение, то такое пространство называют *магнитным полем*.

За единицу напряженности магнитного поля принимают такое поле, которое на единицу магнитной массы действует (притягивает или отталкивает) с силой 1 дин. Таким образом магнитное поле напряженности H действует на магнитную массу m с силой $F = H \cdot m$, т. е.:

$$H = \frac{F}{m}.$$

Размерность напряженности магнитного поля будет:

$$H = \frac{\text{дина}}{\text{м. масса}} = \frac{\text{г. см. сек.}^{-2}}{\text{г}^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ сек.}^{-1}} = \text{г}^{1/2} \text{ см}^{-1/2} \text{ сек.}^{-1}$$

Единица напряженности магнитного поля называется эрстедом.

Если взять намагничивающую катушку (соленоид) длиной l см, имеющую n витков, то при прохождении через нее тока силой i ампер напряженность поля внутри катушки будет выражаться:

$$H = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{l}.$$

Обозначая через S^1 площадь сечения магнитного потока внутри катушки, можно написать, что магнитный поток равен:

$$\Phi^1 = H \cdot S^1.$$

Если в однородное магнитное поле напряженности H внести длинный стержень поперечного сечения, равного S см², и расположить его параллельно направлению поля, то магнитный поток, проходящий сквозь поперечное сечение стержня, не будет равен HS , а примет значение:

$$\Phi = \mu \cdot H \cdot S,$$

где μ — численный коэффициент, называемый *магнитной проницаемостью* вещества стержня.

Магнитный поток, проходящий через 1 см² стержня, называется *магнитной индукцией* и обозначается через B , т. е.

$$B = H \cdot \mu \text{ и } \Phi = B \cdot S$$

или

$$B = \mu \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot i}{l} \text{ и } \Phi = \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot i}{l} \cdot \mu S.$$

Величину $0,4 \pi \cdot n \cdot i$ называют магнитодвижущей силой, а выражение $\frac{i}{\mu \cdot S}$ носит название магнитного сопротивления цепи.

Для большинства веществ значение μ близко к единице. Вещества, для которых $\mu < 1$ (например висмут), называются диамагнитными, для которых $\mu > 1$ — парамагнитными. Такие же вещества, как железо, кобальт и никель, для которых μ достигает значения 3000, выделены в особую группу и называются ферромагнитными.

Магнитная индукция B связана с H числовым коэффициентом μ и измеряется в гауссах.

Следует отметить, что намагничивающая сила H весьма часто выражается числом ампервитков, приходящимся на 1 см ее длины,

$$n_1 = \frac{n}{l}.$$

Поэтому можно написать

$$H = 0,4 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot i,$$

и тогда число витков, соответствующее 1 гауссу ($H = 1$), будет равно:

$$n_1 i = \frac{1}{0,4 \pi} \approx 0,8 \text{ ампервитков}$$

или

$$1 \text{ ампервиток} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ эрстед.}$$

За единицу магнитного потока принимается поток, проходящий нормально через площадь в 1 см^2 в среде, магнитная проницаемость которой равна единице при напряжении магнитного поля или при намагничивающей силе в 1 эрстед. Эта единица носит название гаусс.

Весь же магнитный поток, проходящий внутри образца, имеющего поперечное сечение $q \text{ см}^2$, т. е.

$$\Phi = B \cdot q = \mu \cdot H \cdot q,$$

измеряется в максвеллах.

За единицу магнитного сопротивления принимается сопротивление магнитной цепи, длина которой равна 1 см, сечение 1 см^2 и магнитная проницаемость $\mu = 1$.

Обозначая через m напряженность полюса магнитного бруска и через $2l$ — расстояние между полюсами, можно написать произведение этих величин:

$$M = 2 ml,$$

которое называется магнитным моментом.

Магнитный момент, отнесенный к единице объема, называется интенсивностью намагниченности:

$$J = \frac{2 ml}{v} = \frac{2 ml}{2 l \omega} = \frac{m}{\omega}.$$

Отношение между интенсивностью намагниченности J и напряженностью поля H носит название магнитной восприимчивости.

$$\chi = \frac{J}{H}.$$

Соотношение между магнитной проницаемостью и магнитной вос-

приемчивостью можно вывести из следующих соображений. Число силовых линий, исходящих из северного полюса в воздух, равно:

$$4\pi r^2 H = 4\pi r m - 4\pi J \omega,$$

так как $H = \frac{m}{r^2}$ соответствует числу силовых линий, проходящих через единицу поверхности уровня на расстоянии r от полюса. От единицы же полярной поверхности будет отделяться $4\pi J$ силовых линий. Поэтому, если представить себе в равномерном магнитном поле длинный намагниченный стержень и если предположить, что этот стержень в каком-нибудь месте прорезан поперек, то через каждый квадратный сантиметр тонкого прореза будет проходить $4\pi J$ силовых линий + поток, обусловленный магнитным полем, имеющим напряженность H . Магнитная индукция B будет равна:

$$B = 4\pi J + H.$$

Так как

$$\frac{B}{H} = \mu, \text{ а } \frac{J}{H} = \chi,$$

то

$$\mu = 4\pi\chi + 1,$$

или

$$\chi = \frac{\mu - 1}{4\pi}.$$

Для технических целей наиболее важным фактором из магнитных свойств материалов является так называемая *кривая намагничивания*, указывающая зависимость между H и B . Для определения этой кривой находят значения магнитной индукции B для различной напряженности H магнитного поля. Найденную зависимость можно изобразить графически в виде кривой (рис. 207).

Точно так же можно найти зависимость между H и μ и изобразить ее в виде кривой (рис. 208).

Из этих кривых, относящихся к ферромагнитным материалам, легко видеть, что магнитная проницаемость при слабых полях быстро возрастает и затем, достигнув максимума, начинает уменьшаться, стремясь принять значение, равное единице. Другими словами, индукция $B = H + 4\pi J$

вначале сильно увеличивается, но затем интенсивность намагниченности J , достигнув насыщения, становится величиной постоянной и при дальнейшем увеличении H магнитная индукция будет изменяться по уравнению $B = H + \text{const.}$

Насыщение малоуглеродистого мягкого железа происходит уже при $H = 2000$ эрстед, более же углеродистая сталь требует большего напряжения магнитного поля — до $H = 10\,000$ эрстед.

Изменяя H от нуля до какого-либо значения E (рис. 207) и измеряя значение B (линия AB), мы при обратном ходе — при уменьшении H от значения E до 0 — найдем, что магнитная индукция будет изменяться не по кривой AB , а по кривой BC . При $H = 0$ магнитная индукция будет иметь некоторое значение AC , которое называет-

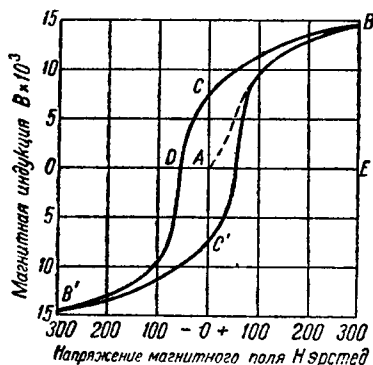


Рис. 207

ся остаточной намагниченностью и обозначается B_r . Для того чтобы получить $B=0$, необходимо приложить некоторое отрицательное значение напряженности магнитного поля, равное AD . Это значение носит название коэрцитивной силы и обозначается H_c .

При дальнейшем увеличении H величина B принимает также отрицательные значения и весь дальнейший ход кривой аналогичен описанному. Итак, в результате получается замкнутая кривая, носящая название гистерезисной петли. Форма и характер этой петли зависят от химического состава и обработки ферромагнитных материалов.

Для целого ряда сортов стали, идущих на изготовление постоянных магнитов, требуется иметь возможно большие B_r и H_c . Другие же стали — например применяющиеся для изготовления сердечников трансформаторов — должны давать возможно меньшую площадь гистерезисной петли, так как явление гистерезиса можно рассматривать как некоторое добавочное магнитное сопротивление, на преодоление которого должно расходоваться определенное количество энергии. При магнитном потоке, часто меняющем свое направление, потеря энергии на гистерезис становится значительной.

Площадь гистерезисной петли равна:

$$F = \int B dH.$$

Размерность этой площади = индукция $\times$ напряженность поля или

$$(2^{11/2} \text{ см}^{-1})^2 \cdot \text{сек.}^{-1})^2 = \text{гсм}^{-1} \text{ сек.}^{-2} = \frac{\text{гсм}^2 \cdot \text{сек.}^{-2}}{\text{см}^3} = \frac{\text{работа в эргах}}{\text{объем}}.$$

Потеря на гистерезис выразится:

$$E = \frac{1}{4\pi} F = \frac{1}{4\pi} \int_{-H}^{+H} B dH \text{ эрг/см}^3.$$

Кроме потери на гистерезис в трансформаторах и электрических машинах большую роль играют потери в железе от паразитных токов.

Таким образом при магнитных испытаниях материалов, применяемых в технике, чаще всего приходится определять: 1) потери от перемагничивания и паразитных токов, 2) зависимость между напряженностью поля H , индукцией B и проницаемостью μ и 3) значение остаточной намагниченности и коэрцитивной силы.

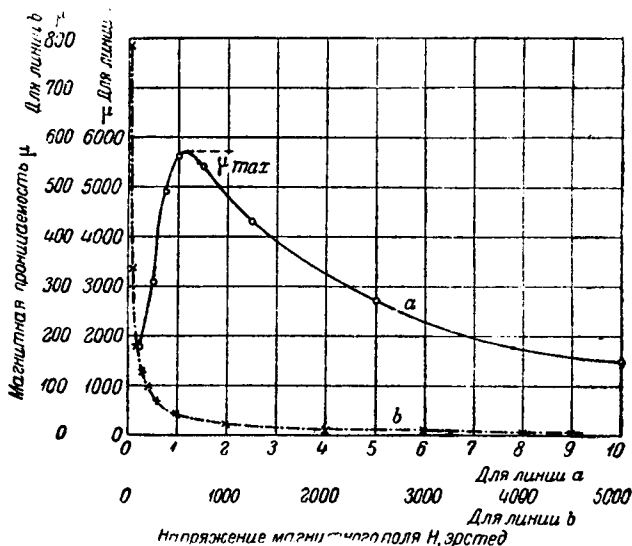


Рис. 208.

Ниже мы рассмотрим несколько методов определения этих значений.

6. Некоторые методы магнитных измерений. Магнитометрический метод. Испытуемый стержень длиной l помещается в намагничивающую катушку, в которой он располагается в одной плоскости с подвешенной на нити магнитной стрелкой ps (рис. 209). При намагничивании стержня стрелка отклонится на некоторый угол φ . Для уничтожения влияния расстояния L стержня от магнитной стрелки измерение производится два раза при различных расстояниях — L и L_1 .

Угол поворота стрелки φ и φ_1 измеряется достаточно точно помощью зеркальца, прикрепленного к стрелке, и шкалы со зрительной трубкой.

Обозначая M — магнитный момент и B_e — напряженность магнитного поля земли, имеем:

$$\frac{M}{B_e} = \frac{1}{2} \frac{L^5 \operatorname{tg} \varphi - L_1^5 \operatorname{tg} \varphi_1}{L^2 - L_1^2}.$$

Так как интенсивность намагниченности $J = \frac{M}{v}$, где v — объем стержня, то:

$$J = \frac{B_e}{v} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L^5 \operatorname{tg} \varphi - L_1^5 \operatorname{tg} \varphi_1}{L^2 - L_1^2}.$$

При малых углах φ можно принять $\operatorname{tg} \varphi$ равным дуге.

Если B_e известно, то из выражения $B = H + 4\pi J$ легко найти B , так как

$$H = \frac{0,4\pi \cdot n \cdot i}{l},$$

где l — длина намагничивающей катушки.

Определяя для различных H значение B , легко построить кривую $f(B, H)$, а также и полную гистерезисную петлю.

Однако приведенный расчет не вполне точен и вот по каким соображениям. Полюса железного испытуемого стержня, помещенного в намагничивающую катушку, создают добавочное магнитное поле, направленное против магнитного поля катушки. Вследствие этого напряженность магнитного поля катушки будет несколько ослаблена и фактически равна не рассчитанному H , а некоторому меньшему значению H_1 . Чем длиннее испытуемый стержень, тем меньше его влияние на напряженность магнитного поля.

Действительно, принимая:

$$H_1 = H - cJ,$$

где J попрежнему интенсивность намагниченности, Линкер¹ дает для c следующие значения для эллипсоидных образцов с главными осями a и b .

a/b	50	100	200	300	400	500
c	0,01817	0,00540	0,00157	0,00075	0,00045	0,00030

Из этих значений видно, что при отношении длины к диаметру, превышающем 200—300, влиянием испытуемого стержня на напряженность магнитного поля можно пренебречь ввиду его незначительности.

¹ А. Линкер, Elektrotechnische Messkunde, стр. 178, 1920.

Метод баллистического гальванометра. В этом методе испытуемый образец вставляется в намагничивающую катушку, имеющую две обмотки; первая, намагничивающая, которая присоединяется к источнику тока, и вторая, измерительная, присоединяющаяся к баллистическому гальванометру. При замыкании или размыкании тока первичной обмотки появляющийся или исчезающий магнитный поток возбуждает ток во вторичной обмотке. Для получения точных результатов испытуемый образец вставляется в катушку, длина которой превосходит в 200—300 раз ее диаметр, с целью получения в средней части этой катушки равномерного потока. Ввиду необходимости применения слишком длинных образцов этим способом пользуются крайне редко.

Исследуемому образцу может быть придана форма кольца, на которое наматывают требуемое число витков. Обмотка кольца должна быть равномерно распределена; тогда магнитное поле получается равномерным даже при кольцах сравнительно небольших диаметров (рис. 210).

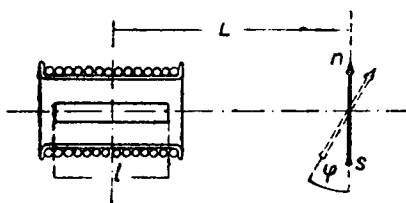


Рис. 209

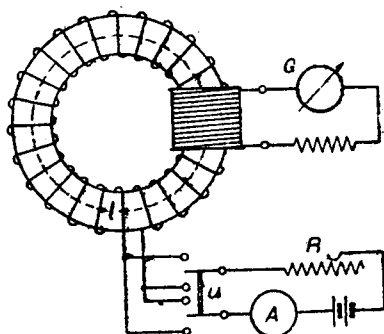


Рис. 210

Напряженность поля вычисляется из выражения:

$$H = \frac{i \cdot n}{l} \text{ ампервитков/см,}$$

где i — сила тока в амперах, n — число всех витков, l — длина кольца, считая по среднему диаметру кольца.

Испытание производят в следующем порядке: измерив кольцо и намотав обе обмотки, присоединяют первичную к переключателю U , а вторичную — к баллистическому гальванометру. Установив теперь при помощи реостата R и амперметра A требуемую силу тока (т. е. получив этим определенное число ампервитков на 1 см), переключают его в обратном направлении, благодаря чему во вторичной обмотке индуцируется ток.

О градуировке гальванометра будет сообщено ниже, сейчас же следует заметить, что благодаря трудности приготовления кольцообразных образцов и устройства намагничивающей обмотки, которую приходится наматывать на каждый из исследуемых образцов, подобный способ испытания не получил широкого распространения в технических магнитных измерениях и применяется крайне редко.

Широкое распространение получил способ магнитной рамы, схема установки которой изображена на рис. 211. Испытуемый образец ab , в виде стержня прямоугольного или круглого сечения, вставляется в раму M из мягкого железа, которая обычно состоит из двух частей. Поперечное сечение этой рамы берется в 30—50 раз больше сечения

F стержня. Длина образца для этого способа берется в 25—50 раз больше его диаметра.

На испытуемый стержень надевается намагничивающая катушка, первичная обмотка которой имеет n_1 витков, а вторичная обмотка — n_2 витков. Весьма часто делают две вторичные обмотки, помещая одну в середине катушки, а другую — на конце. Две катушки, расположенные таким образом, дают возможность проверять равномерность магнитного потока по всей длине стержня.

Магнитодвижущая сила катушки будет равна:

$$H = 0,4 \pi \cdot n_1 i,$$

магнитный же поток Φ будет зависеть от полного магнитного сопротивления цепи. Итак, мы имеем:

$$0,4 \pi \cdot n_1 i = \Phi \left[\frac{l_1}{F} + \frac{l'}{F' \mu'} + \frac{\delta}{F''} \right],$$

где l_1 и F — длина и сечение испытуемого стержня, l' и F' — длина и сечение магнитной рамы, δ и F'' — длина и сечение воздушного пути магнитного потока, μ и μ' — магнитная проницаемость испытуемого материала и магнитной рамы.

Рис. 211. Способ магнитной рамы

Величину Φ определяют отклонением рамки баллистического гальванометра.

Значение магнитного сопротивления $\frac{l'}{F' \mu'}$ рамы при достаточно большом сечении F' весьма мало, и его тогда можно отбросить.

Значение магнитного сопротивления $\frac{\delta}{F''}$ воздушного пути зависит главным образом от плотности прилегания испытуемого образца к раме. Легко получить δ очень малой, и тогда величиной $\frac{\delta}{F''}$ можно пренебречь.

В результате этих допущений получаем:

$$\Phi = \frac{0,4 \pi n_1 i}{\frac{l}{F \mu}}.$$

Сила тока устанавливается регулировкой реостатами R_1 , R_2 и R_3 и отсчитывается по шкале амперметра A .

Установив переключатель ρ в положение o и пропуская через намагничивающую катушку ток силой i , мы создадим в приборе определенный магнитный поток Φ , величина которого пока неизвестна, так как неизвестно значение μ испытуемого материала. Если же проходящий по намагничивающей обмотке ток будет прерван, то созданный им в испытуемом образце поток Φ исчезнет вполне или же отчасти и будет индуцировать при этом во вторичной катушке прибора электродвижущую силу, вследствие чего в замкнутой цепи, образованной вторичной катушкой и баллистическим гальванометром G , возникнет весьма кратковременный ток, который и вызовет отклонение подвижной части гальванометра на некоторый угол α .

Для того чтобы по отклонению α судить о величине исчезнувшей части потока Φ , необходимо предварительно градуировать гальванометр G на магнитный поток, т. е. предварительными измерениями узнать, какой магнитный поток соответствует углу отклонения α . Для этой цели служит так называемый эталон, представляющий собой длинный (1,5—2,0 м) деревянный стержень, на котором расположена в один или два слоя обмотка mn . Поверх надевают катушку k известного числа витков и последовательно с ней включаются: баллистический гальванометр G , контактная кнопка f для замыкания гальванометра на короткое (для успокоения вращающейся рамки) и вторичная обмотка прибора. Установив переключатель p в положение e и пропуская через обмотку mn ток силой i ампер, найдем напряжение магнитного поля, созданного обмоткой:

$$H = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{l},$$

где l — длина обмотки, n — число витков.

Магнитный же поток обмотки mn , проходящий, следовательно, сквозь катушку k , будет:

$$\Phi = H \cdot S = \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot i}{l} S,$$

где S — площадь поперечного сечения обмотки.

Если кнопка f будет замкнута на контакт h и затем цепь обмотки mn разомкнута, то поток Φ , проходящий через катушку k , вполне исчезнет, и гальванометр G даст отклонение α .

Давая силе тока в обмотке mn значения $i_1, i_2, i_3 \dots$ и т. д., получают отклонения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$, соответствующие потоками $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots$ и т. д. Так как катушка k обычно состоит не из одного витка, а из N витков, то отклонения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ и т. д. будут соответствовать фиктивным потокам $N\Phi_1, N\Phi_2, N\Phi_3 \dots$.

Для того чтобы этой градуировкой было возможно пользоваться для определения магнитного потока в исследуемом образце, сопротивление цепи — обмотка — гальванометр — должно оставаться неизменным, почему вторичная обмотка прибора и включается в цепь заранее.

Подсчет магнитного потока при испытании образца производится следующим образом. Положим, мы имеем отклонение α_1 , которому соответствует согласно градуировке фиктивный поток $N\Phi_1$. Если вторичная катушка прибора имеет n_2 витков, то магнитный поток Φ , прошедший сквозь катушку, будет равен:

$$\Phi = \Phi_1 \frac{N}{n_2},$$

ибо

$$\alpha_1 = N\Phi_1 \text{ и } \alpha_1 = \Phi n_2.$$

При работе с баллистическим гальванометром приходится уделять много времени на ожидание, пока его подвижная часть придет в равновесие после полученного отклонения. Для ускорения работы можно воспользоваться способом короткого замыкания гальванометра, для чего от гальванометра к верхнему контакту l кнопки f проложен провод w . Самая кнопка устраивается так, что ее рычаг всегда прижат к контакту l , т. е. гальванометр всегда коротко замкнут.

Когда нужно получить отклонение гальванометра, то кнопку f замыкают на контакт h , и тогда гальванометр может получить ток, проиндуктированный в катушках. Для приведения гальванометра к нулю рычаг кнопки f держится между l и h ; тогда, вследствие

того что цепь разомкнута, рамка гальванометра быстро движется под влиянием кручения подвеса. В момент, когда указатель отклонения гальванометра проходит через нуль шкалы, рычаг кнопки f следует опустить, гальванометр замыкается при этом накоротко, и его подвижная часть немедленно останавливается, так как в его обмотке индуцируется ток, противодействующий ее движению в магнитном поле. При нахождении кривой намагничивания $f(B, H)$ реостатами R устанавливается требуемая сила тока, а переключателем P производится переключение тока.

При определении же гистерезисной петли, или так называемой кривой циклического намагничивания, ток прерывается выключателями x и y . Для этого переключатель p ставится в положение o , переключатель же P — в правое положение. Для получения кривой намагничивания реостат R_2 устанавливают на все увеличивающееся сопротивление и выключателем x уменьшают силу тока с i_1 , с i_1 до i_2 и т. д. Отклонение гальванометра будет соответствовать:

$$a_1 \dots 0,4 \pi n_1 (i - i_1)$$

$$a_2 \dots 0,4 \pi n_1 (i - i_2)$$

и т. д.

Отсюда могут быть вычислены значения изменений $\Phi_1, \Phi_2 \dots$ магнитного потока, проходящего через катушку n_2 .

Для получения точек от C до B' выключатель x замыкается, выключатель y размыкается и реостат R_2 устанавливается на все уменьшающееся сопротивление. Перекидывая переключатель P с правого положения в левое, мы определим кривую BCB' , исходя каждый раз из точки B , отвечающей начальной намагничивающей силе (рис. 207).

Во избежание ошибок рекомендуется при определении циклической кривой отмечать на эскизе положение определяемой точки.

Кривая $B'C'B$ определяется подобно предыдущему.

Для получения более точных результатов лучше пользоваться так называемым нулевым методом, схема которого изображена на рис. 212. Баллистический гальванометр помещен здесь в мостике. Сила тока, проходящего по ab , равна:

$$i = \frac{E}{R} = \frac{e_1 r_2 - e_2 r_1}{(r_1 + r_2) R}.$$

Но с другой стороны:

$$e_1 = m_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_2 = m_2 \frac{d\Phi_2}{dt},$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки, m_1 и m_2 — числа витков; t — время.

Но для количества электричества мы имеем:

$$dQ = idt,$$

или

$$dQ = \frac{m_1 d\Phi_1 r_2 - m_2 d\Phi_2 r_1}{(r_1 + r_2) R},$$

$$Q = \frac{m_1 \Phi_1 r_2 - m_2 \Phi_2 r_1}{(r_1 + r_2) R}.$$

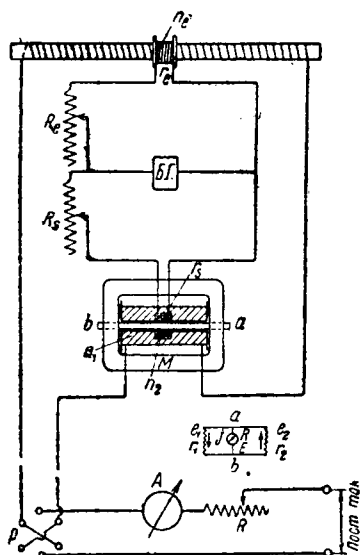


Рис. 212. Схема нулевого метода

Для случая, когда $Q=0$, т. е. когда баллистический гальванометр не дает отклонения, имеем:

$$m_1 \Phi_1 r_2 - m_2 \Phi_2 r_1 = 0,$$

т. е.

$$\Phi_1 = \frac{m_2}{m_1} \frac{r_1}{r_2} \Phi_2,$$

или, подставляя соответствующие значения, указанные на рис. 212, имеем:

$$\Phi_s = \frac{n_e}{n_2} \frac{r_s + R_s}{r_e + R_c} \cdot \Phi_e,$$

где Φ_e — магнитный поток в эталоне.

Значения n_e , n_2 , Φ_e , r_s и r_e известны, значения же R_s и R_c определяются из опыта, и тогда легко определить магнитный поток Φ_s стержня.

При такой схеме испытание протекает в следующем порядке: установив при помощи реостата R и амперметра A желаемой силы ток, изменяют сопротивления R_s и R_c до тех пор, пока баллистический гальванометр перестанет отклоняться при переключении коммутатора P .

Метод измерения силы притяжения электромагнитов. Стержень, вставленный в намагничивающую катушку, будучи приложен концом к железной поверхности, притягивается ею. Сила притяжения будет тем больше, чем больше магнитная индукция стержня, а отрывное усилие выразится:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{8\pi} \text{ дин.},$$

где S — площадь соприкосновения стержня с железной поверхностью в см^2 .

Так как $F_{\text{дин}} = 981 \rho \text{ г.}$, то магнитная индукция

$$B = \sqrt{\frac{8\pi \rho \cdot 981}{S}}$$

и магнитная проницаемость

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi \rho \cdot 981}{H^2 S}}.$$

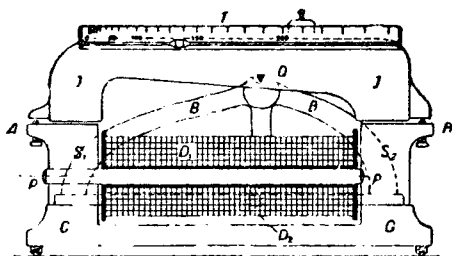


Рис. 213. Магнитные весы Дюбуа

Таким образом, измеряя отрывное усилие ρ , можно определить B и μ испытуемого материала.

На основании этого метода построен целый ряд приборов и из них наиболее распространенным следует считать магнитные весы Дюбуа¹.

Схема этого прибора изображена на рис. 213. Прибор состоит из латунной подставки G с укрепленными на ней частями S_1 и S_2 из мягкого железа, в которые вставляется испытуемый образец pp с надетой намагничивающей катушкой D_1D_2 .

Магнитная цепь стержня и частей S_1 и S_2 замыкается железным коромыслом JJ весом около 8 кг, опирающимся посредством стальной закаленной призмы Q на агатовые опоры, укрепленные на латунных частях BB . Бронзовые выступы и регулировочные винты R и A

¹ Zeitschrift für Instrumentenkunde, стр. 113, 129, 1900.

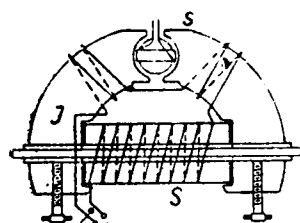
ограничивают качание коромысла. Винты R и A регулируются так, чтобы расстояние между плоско отполированными нижними поверхностями коромысла и также отполированными верхними поверхностями частей S_1 и S_2 было равно 0,25 мм, когда соответственные винт и выступ соприкасаются. Опора Q расположена не посередине коромысла, а несколько вправо от середины, и равновесие получается лишь потому, что правая часть коромысла тяжелее левой. Наверху вдоль коромысла расположена линейка T с двумя шкалами — верхней для тяжелого груза и нижней для легкого груза, перемещающихся вдоль линейки. Для компенсации вертикальной составляющей земного поля или иных магнитных полей служит стальной магнит, располагаемый в северном полушарии южным полюсом вверх.

Работа с весами Дюбуа протекает в следующем порядке: арретиром опускают коромысло на опору и проверяют уравнированность его. Затем устанавливается образец и через намагничивающую катушку пропускают ток. Благодаря возбужденному магнитному потоку части J и J коромысла будут притягиваться к частям S_1 и S_2 с равной силой:

$$\frac{B^2 S}{8\pi}.$$

Однако коромысло выйдет из равновесия, так как плечи его l_1 и l_2 не равны и для восстановления равновесия необходимо переместить грузы L .

Для равновесия необходимо, чтобы сумма моментов, приложенных к коромыслу, была равна нулю, т. е.:



откуда

$$\frac{B^2 S}{8\pi} l_1 - \frac{B^2 S}{8\pi} l_2 - Pl_3 = 0,$$

$$B = \sqrt{\frac{8\pi Pl_3}{S(l_1 - l_2)}} = K \sqrt{l_3},$$

Рис. 214. Прибор Кепселя

обозначив известное: $\sqrt{\frac{8\pi P}{S(l_1 - l_2)}} = K.$

Магнитный поток в частях S_1 и S_2 выразится

$$\Phi = B S = B_1 S_1,$$

где B_1 — индукция в испытуемом стержне и S — сечение последнего. Потому:

$$B_1 = B \cdot \frac{S}{S_1} = \frac{S}{S_1} K \sqrt{l_3} = c \sqrt{l_3},$$

т. е. шкала весов будет квадратная и по ней непосредственно отсчитывается значение индукции.

Прибор Кепселя. Отклонение рамки гальванометра можно представить выражением

$$\alpha = c \cdot i \cdot H,$$

где i — сила тока и H — напряжение магнитного поля. При постоянном i отклонение рамки выразится $\alpha = c_1 H$, т. е. пропорционально напряжению магнитного поля. На этом принципе построен прибор

Кепселя¹, который измеряет напряжение магнитного поля по отклонению гальванометра.

Схема такого прибора дана на рис. 214. Пробный брусок вставляется в намагничивающую катушку S и прикрепляется к железному ярму J , в которое еще вставлена подвижная рамка s с навитой тонкой проволокой. На железном ярме имеются две компенсационные катушки, создающие магнитный поток, встречного направления и имеющие назначение компенсировать поток, создаваемый главной катушкой S , когда исследуемый стержень P вынут. В этом случае стрелка прибора должна стоять на нуле. Пропуская через подвижную катушку s ток постоянной силы i и возбуждая катушку S током силы J , получаем отклонение катушки s на угол α , и это отклонение будет пропорционально магнитной индукции испытуемого стержня.

Прибор Кепселя является одним из наиболее простых аппаратов, применяемых для технических магнитных измерений.

Висмутовая спираль. Измерение напряженности магнитного поля висмутовой спиралью основано на изменении электрического сопротивления висмута при действии на него магнитного поля. Сопротивление висмутовой проволоки при увеличении индукции на каждую 1000 возрастает приблизительно на 5%. Для большей точности измерения проволока должна быть достаточной длины и не занимать много места, поэтому лучше всего свертывать ее в плоскую бифилярную спираль и помещать между двумя слюдяными пластинками.

Градуирование такой спирали производят погружением ее в магнитный поток, плотность которого известна. Плоскость спирали должна быть перпендикулярна силовым линиям магнитного потока. Измерение электрического сопротивления спирали в магнитных полях различных известных напряжений производится обычно мостиком Уитстона. Имея кривую зависимости электрического сопротивления спирали от напряженности магнитного поля, легко таким же способом определять напряженность исследуемых магнитных полей.

В тех случаях, когда температура, при которой производятся измерения, отличается от температуры, при которой спираль проградирована, необходимо ввести поправку, так как температурный коэффициент висмута очень большой.

Аппарат Эпштейна. При намагничивании железа переменным током, как уже говорилось выше, потери на гистерезис становятся весьма чувствительными. Кроме них часть энергии затрачивается еще и на токи Фуко. Все эти потери зависят, с одной стороны, от частоты переменного тока, значения магнитной индукции и т. д., а кроме того — от химического состава, термической обработки и формы железа. Для характеристики материала в отношении этих свойств производят соответствующие испытания. Одним из наиболее распространенных приборов для определения этих потерь является аппарат Эпштейна².

Аппарат Эпштейна состоит (рис. 215) из деревянной доски a , на которой при помощи четырех губок b прикрепляются четыре пакета из испытуемого листового железа. Железо режется на листы размером 500×30 мм и собирается в пакет весом 2,5 кг, причем между листами прокладывается тонкая бумага. Четыре таких пакета складывают, как видно из чертежа, так, чтобы они служили сторонами квадрата, причем в местах стыка прокладывается прессшпан толщиной 0,15 мм. На каждый пакет надевается намагничивающая катушка внутренним сечением 30×38 мм и длиной 435 мм. Катушка изго-

¹ Е. Т. З., стр. 214, 411, 1898

² Е. Т. З., стр. 303 и 684, 1900.

товлена из прессшпана и на нее наматывается 150 витков медной проволоки. Катушки соединены последовательно.

Схема включения намагничивающих обмоток и измерительных приборов представлена на рис. 216. Вольтметр V служит для измерения напряжения переменного тока, вырабатываемого генератором G . Амперметр A измеряет силу намагничивающего тока в обмотках аппарата; ваттметром L измеряется вся затраченная в приборе энергия. Эта энергия затрачивается на намагничивание железа, на нагревание намагничивающих обмоток и тонкой обмотки ваттметра. Поэтому если сопротивление намагничивающих обмоток есть r , а сопротивление тонкой обмотки ваттметра R , причем сила намагничивающего тока i , а напряжение — e , то потеря энергии в железе на гистерезис и токи Фуко определяется из выражения:

$$W = W_g + W_f = W - \left(i^2 r - \frac{e^2}{R} \right),$$

где W — показание ваттметра.

Эти потери относят к 1 кг железа и определяют при вполне определенных индукциях, чаще всего $B = 10\,000$ и $15\,000$ гауссов, вполне определенном числе n периодов переменного тока.

Выбрав значения B и n , находят ту действительную разность потенциалов e на зажимах намагничивающих обмоток, при которой в этих обмотках получится намагничивающий ток, достаточный для создания в исследуемых железных образцах магнитного потока Φ , плотность которого $\frac{\Phi}{S} = B$. Это определение производится из выражения средней электродвижущей силы E в зависимости от n и Φ :

$$E = 4\pi n \Phi \cdot 10^{-8} \text{ В},$$

где N — число витков на намагничивающих катушках, n — частота и $\Phi = BS$ — магнитный поток.

Но $e = \alpha E$, где α так называемый коэффициент формы, выражающий соотношение между действующей и средней электродвижущими силами. Для синусоидального тока

$$\alpha = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,117.$$

Таким образом имеем:

$$e = \alpha E = \alpha 4\pi n \cdot B \cdot S \cdot 10^{-8} \text{ В}.$$

Такие определения e делаются обыкновенно перед началом исследования для каждого из избранных значений B и n .

Разделение потерь на гистерезис и токи Фуко можно произвести следующим способом. При постоянной индукции, например $B = 10\,000$

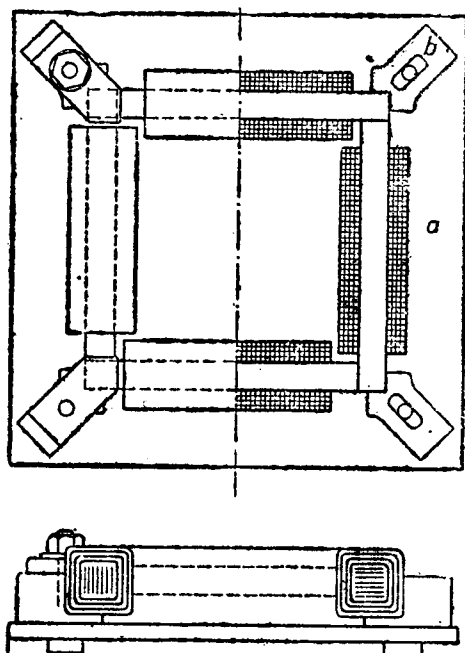


Рис. 215. Аппарат Эпштейна

сгс, и постоянной температуре t находят общие потери W_{gf} при различных числах n периодов. Затем находят значение $A = \frac{W_{gf}}{n}$ и строят кривую $f(A, n)$, которая будет прямой, если при всем ходе испытания R и t не изменялись (рис. 217). Пересечение прямой $f(A, n)$ с осью A укажет $\frac{W_{\sigma}}{n}$, т. е. потери на гистерезис, так как для точки a $n = 0$. Значение потерь на токи Фуко W_f для различных чисел n периодов определяется из графика.

в. Определение изменения магнитных свойств при нагревании и охлаждении. Техника предъявляет к материалам требования самых разнообразных магнитных свойств. С одной стороны, к стали, применяемой для изготовления постоянных магнитов, предъявляются требования большой коэрцитивной силы и остаточной намагниченно-

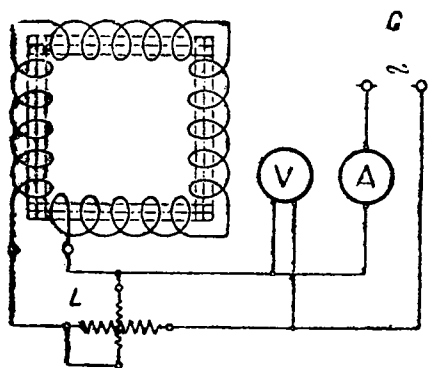


Рис. 216. Схема аппарата Эпштейна

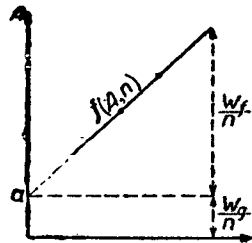


Рис. 217

сти, с другой же — для стали, идущей на постройку трансформаторов и электромашин, требуется большая проницаемость μ и малые значения коэрцитивной силы H_c и остаточного магнетизма B_r , так как они увеличивают потери и уменьшают этим коэффициент полезного действия приборов. Очень часто материалы, удовлетворяющие первому назначению, именуются «твердыми» с точки зрения магнитных свойств, а материалы второй группы с возможно большим μ и малыми B_r и H_c называются «мягкими».

На «магнитную твердость» железных сплавов, которые собственно исключительно и применяются для постройки магнитных деталей, большое влияние имеют химический состав и обработка стали. С увеличением содержания углерода магнитная твердость стали увеличивается; прибавка кремния влечет за собой уменьшение электропроводности, а стало быть и уменьшение потерь на токи Фуко. Холодная обработка и закалка стали увеличивают магнитную твердость, отжиг же уменьшает ее и т. д.

Кроме того на магнитные свойства материала чрезвычайно большое влияние оказывает температура. Достаточно вспомнить магнитные изменения феррита и цементита в зависимости от температуры, чтобы прийти к заключению, что этот фактор заслуживает весьма большого внимания как со стороны производителей, так и со стороны исследователей материалов.

Следует отметить, что в этой области сделано еще очень мало. Существующие приборы позволяют определять только качественное

изменение магнитных свойств при высоких температурах, оставляя вопрос о количественном измерении открытым

Из приборов, применяемых для испытания магнитных свойств при высоких температурах, большим распространением пользуется прибор Шевенара¹. Мы не приводим здесь описания устройства этого прибора, ибо по его идее построен прибор Обергоффера и Эссера, описание которого помещено ниже в отделе дилатометрии. Здесь мы лишь отметим, что означенные приборы довольно сложны и требуют специального устройства печи и гальванометров.

Автор этой книги спроектировал и построил более простой прибор для испытания магнитных свойств при высоких температурах, причем вся аппаратура может быть собрана из приборов, имеющихся в каждой металлографической лаборатории.

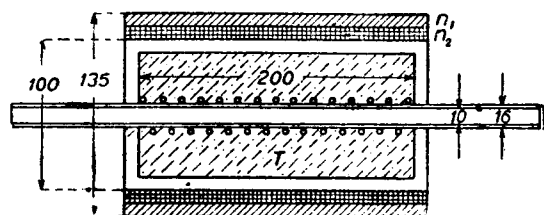


Рис. 218. Прибор для определения магнитных свойств при высоких температурах

Прибор состоит (рис. 218) из фарфоровой трубки, в один конец которой вводится испытуемый образец. Снаружи фарфоровая трубка имеет нихромовую обмотку, являющуюся нагревающей обмоткой. Обмотка питается постоянным током (110 В и 4 А). Нихром покрыт слоем T — смеси каолина и асбесто-

вой ваты (тепловая рубашка). Такая печь помещается в прессишпанный цилиндр, имеющий две обмотки: n_1 — первичная (800 витков) и n_2 — вторичная (1600 витков). Первичная обмотка питается переменным током, который создает внутри катушки магнитный поток Φ . Во вторичной обмотке n_2 индуцируется электродвижущая сила E , значение которой будет зависеть от величины магнитного потока Φ . Если внутрь фарфоровой трубки поместить магнитный образец, то Φ в этом случае будет больше, нежели в том случае, когда образец немагнитный. Таким образом при изменении магнитной проницаемости испытуемого образца будет изменяться значение магнитного потока и, как следствие, электродвижущая сила E вторичной обмотки. Для того чтобы E можно было измерять гальванометром постоянного тока, ток вторичной катушки выпрямляется при помощи катодной лампы.

3. Дилатометрия

Всевозможные превращения в металлических сплавах при их нагревании или охлаждении сопровождаются резкими изменениями различных физических свойств. Для металлургии и технологии металлов чрезвычайно важно знание температур превращений. Выше мы рассмотрели способы определения критических температур путем улавливания того термического эффекта, который обычно сопровождает различного рода превращения.

Критическую температуру можно также определить измерением какого-либо свойства при изменении температуры. За последнее время широко применяется способ измерения объемных изменений тел при нагревании. Получающиеся кривые — расширение — температура — дают весьма резко выраженную картину превращения.

Из существующих приборов, определяющих критические температуры по кривой расширения тел, наиболее совершенным следует счи-

¹ L. Guillet, Les méthodes d'étude des alliages métalliques, стр. 194, 1923.

тать так называемые дилатометры Шевенара¹, которых имеется два типа: лабораторный и производственный. Кроме того, интересен своей простотой прибор Штеблейна² и своею универсальностью дилатометр Эссера и Обергоффера³.

а. Первый тип дилатометра Шевенара. Устройство этого прибора изображено на рис. 219. В кварцевые трубки T_1 и T_2 , запаянные с одного конца, закладываются специальной формы эталон и испытуемый образец. Эта часть прибора вводится в электрическую печь, легко регулирующую и с равномерной температурой по всему рабочему пространству.

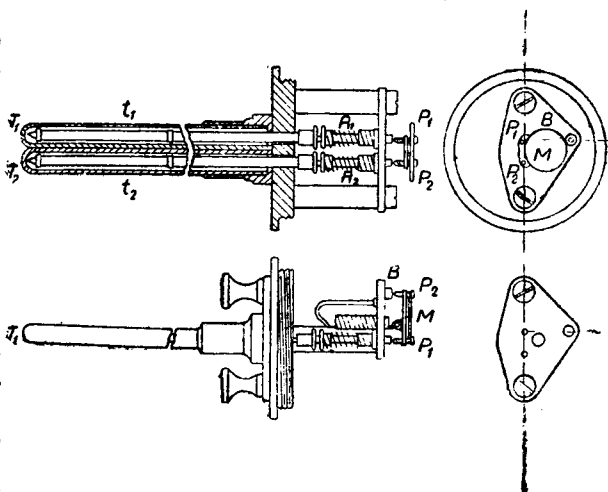


Рис. 219. Первый тип дилатометра Шевенара

Изменение длины эталона и испытуемого образца передается при помощи кварцевых стержней t_1 и t_2 и стальных стержней R_1 и R_2 на зеркало M , имеющее три опоры: P_1 и P_2 — подвижные, связанные с эталоном, и B — неподвижную. На эту часть прибора надевается камера, не пропускающая света, подобная той, какая имеется в приборе Саладена (см. выше «Регистрирующие пирометры»). Перед камерой устанавливается источник света, луч которого через небольшое отверстие в камере направляется на зеркало и, отразившись от него, падает на кассету со светочувствительной пластинкой или бумагой. Этот луч света зарисует на пластинке кривую в зависимости от движения, совершаемого зеркалом M . Движение же зеркала M будет зависеть от характера изменения длины эталона и испытуемого образца.

Эталон в этом приборе изготавливается из специального сплава, имеющего прямолинейную зависимость между расширением и температурой. Поэтому по расширению эталона определяется температура. Расширяющийся эталон отклоняет зеркало, а стало быть и луч света, в одном направлении, которое и даст нам ординату температур.

Изменение длины испытуемого образца будет также передаваться на зеркало отклонением его в другом направлении.

Совместное изменение длины эталона и испытуемого образца зарисует на светочувствительной бумаге кривую, подобно той, которая изображена на рис. 220. Испытуемым образцом здесь служила эвтек-

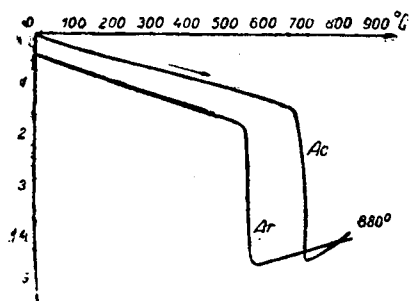


Рис. 220. Первый тип дилатометра Шевенара

¹ Revue de métallurgie. IX—X, 1917; X 1920; Stahl und Eisen, № 7, стр. 242. 1923.

² St. u. Eisen, № 4, стр. 101—104, 1926.

³ Там же, № 5, стр. 142—147, 1926.

тоидная сталь. Переломы в кривых ясно указывают на критические температуры A_g и A_c . Нагрев производился до 880° .

б. Второй тип дилатометра Шевенара. Вышеописанный тип дилатометра дает чрезвычайно точные и четкие результаты. Но установка самого прибора и его обслуживание требуют большой аккуратности и внимания. Значительно проще в обращении более поздний тип дилатометра, устройство которого показано на рис. 221.

В кварцевую трубку T заложен испытуемый образец E и эталон A . Форма их, а также и расположение здесь иное, нежели в приборе первого типа. Для создания эталону одинаковых температурных условий с испытуемым образцом, последний просверливается и в это отверстие вставляется эталон. Изменение длины эталона и испытуемо-

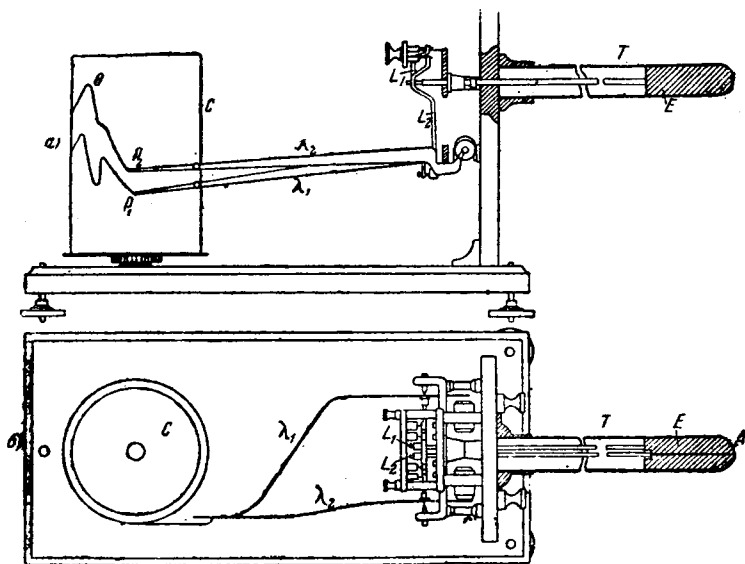


Рис. 221. Второй тип дилатометра Шевенара

го образца при помощи кварцевых стержней передается на систему рычагов, которые приводят в движение рычаги λ_1 и λ_2 , снабженные на концах P_1 и P_2 графитовыми стержнями и рисующие кривые на бумаге, надетой на вращающемся барабане C . Рычаг λ_2 , соединенный с эталоном, зарисует кривую изменения длины эталона. Ввиду того, что эталоном служит специальный сплав, коэффициент расширения которого известен, по кривой изменения длины эталона судят о температурах. Вращением цилиндра, на который надета бумага, и движением рычагов λ_1 и λ_2 , зарисует кривая θ , которая будет выражать зависимость $f(T, Z) = 0$. Так как эталон находится внутри испытуемого образца, то на кривой θ отразятся в виде перегибов и площадок температуры превращения.

Рычаг λ_1 , соединенный с испытуемым образцом, зарисует кривую изменения длины последнего. Перегибы и переломы этой кривой будут также указывать на превращение в испытуемом образце.

Таким образом в описанном приборе контроль превращений производится по двум кривым, что в значительной мере уточняет исследование. Всякие перегибы в кривых, вызванные неправильной работой печи или дефектом в механизме прибора, могут отразиться лишь на одной какой-либо кривой и, естественно, такие перегибы не будут приняты за превращения.

На рис. 222 даны дилатометрические кривые быстрорежущей стали, охлажденной в печи; на рис. 223 — кривые той же стали, охлажденной на воздухе. На рис. 224 даны кривые Ni-Cr-Si-стали, охлажденной в печи, а на рис. 225 — кривые отпуска наклепанной марганцевистой стали.

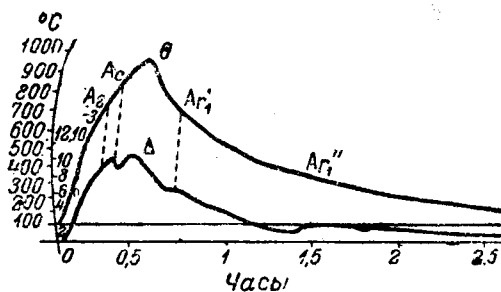


Рис. 222. Кривые нагрева и охлаждения быстрорежущей стали в печи

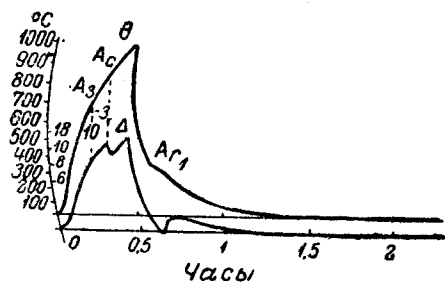


Рис. 223. Кривые нагрева и охлаждения быстрорежущей стали на воздухе

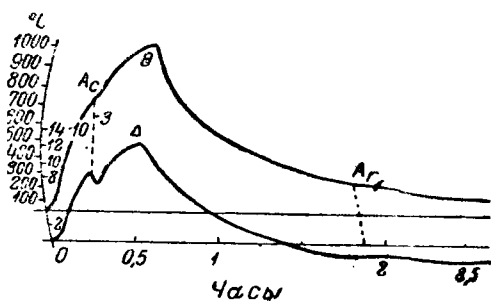


Рис. 224. Кривые нагрева и охлаждения Ni-Cr-Si-стали в печи

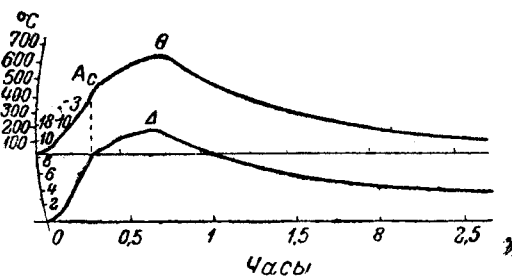


Рис. 225. Кривые отпуска наклепанной марганцевистой стали

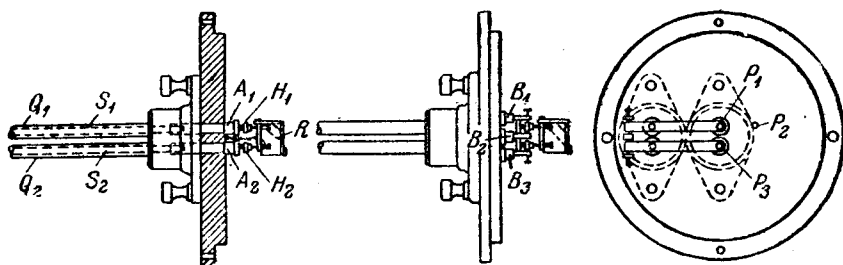


Рис. 226. Прибор Эссера и Обергоффера

в. Универсальный прибор Эссера — Обергоффера¹. Весьма интересный прибор сконструировали Эссер и Обергоффер, воспользовавшись идеей устройства дилатометра и магнитного прибора Шевенара. При помощи этого прибора возможно определять расширение, изменение электропроводности и магнитных свойств сплавов в зависимости от температуры.

Для дилатометрического анализа служит специальная головка (рис. 226), состоящая из двух кварцевых трубочек Q_1 и Q_2 , запаянных с одного конца. В эти трубочки вставляются испытуемый образец и эталон. Изменение их длины передается рычагам H_1 и H_2 при

¹ St. u. Eisen, H. S., стр. 142—47.

помощи кварцевых стержней S_1 и S_2 и металлических A_1 и A_2 . Рычаги H_1 и H_2 имеют опору в точках B_1 и B_2 . В точках P_1 и P_3 к ним прикреплена пластинка R с призмой P_2 .

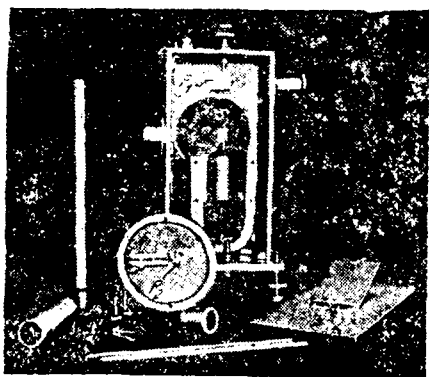


Рис. 227. Детали прибора Эссера и Обергоффера

Такая головка прикрепляется к специальному гальванометру (рис. 227) таким образом, чтобы призма P_2 находилась под призмой P_1 . Кварцевые трубочки головки дилатометра помещаются в электрическую печь.

Луч света, пройдя линзу, падает на призму P_1 (рис. 227), и, преломляясь, направляется на призму P_2 , которая направляет его на зеркало гальванометра S . Отражившись от зеркала, луч падает на светочувствительную пластинку фотографической камеры, соединенной с гальванометром.

Дилатометрический анализ на этом приборе можно провести по двум направлениям.

Первое состоит в том, что зеркало S гальванометра устанавливается под углом 45° к оси дилатометрической головки и остается неподвижным в течение всего опыта. Расширение эталонного и испытуемого стержня создает движение призмы P_2 , отраженный луч которой запишет на светочувствительной бумаге кривую $f(\lambda_o, \lambda_e)$, где λ_o — расширение испытуемого образца, а λ_e — расширение

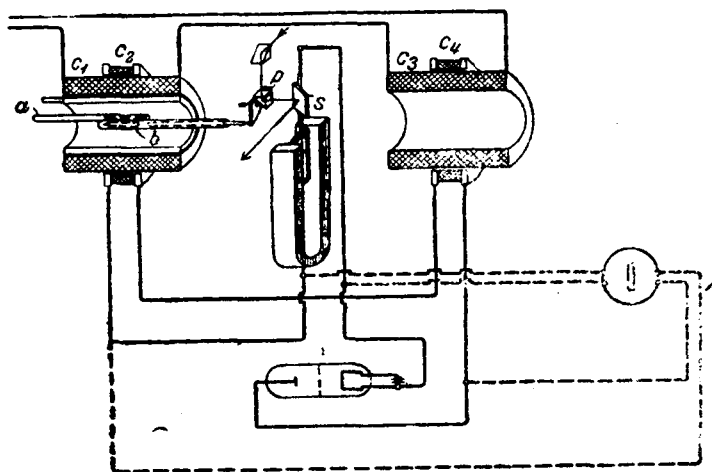


Рис. 228. Схема испытания магнитных свойств

эталона. Второй способ состоит в том, что расширение λ_o испытуемого образца попрежнему фиксируется вышеописанной головкой дилатометра; температура же t измеряется не расширением λ_e эталона, а термпарой, присоединяемой к зажимам зеркального гальванометра. Совместными движениями призмы P_2 и зеркала S луч света запишет на светочувствительной бумаге кривую $f(\lambda_o, t)$.

Испытание магнитных свойств при высоких температурах производится по схеме, изображенной на рис. 228. Здесь испытуемый

образец эллипсообразной формы вставляется в трубку *a*. Температура измеряется дилатометрическим эталоном *b*, расширение которого передается на призму *P*. Образец вставляется в электрическую печь, которая кроме нагревательной обмотки имеет еще первичную обмотку *c*₁, сквозь которую пропускают переменный ток, и вторичную обмотку *c*₂. Обмотки *c*₁ и *c*₂ соединяются с такими же обмотками *c*₃ и *c*₄ так, как это изображено на рис. 228. При прохождении тока через первичную обмотку в обмотке *c*₃ будет индуцироваться ток в зависимости от величины магнитного потока. То же самое произойдет в обмотке *c*₄. Ясно, что если испытуемый образец магнитный, то магнитный поток, создаваемый обмоткой *c*₁, будет больше магнитного потока, создаваемого обмоткой *c*₃, а стало быть ток в обмотке *c*₂

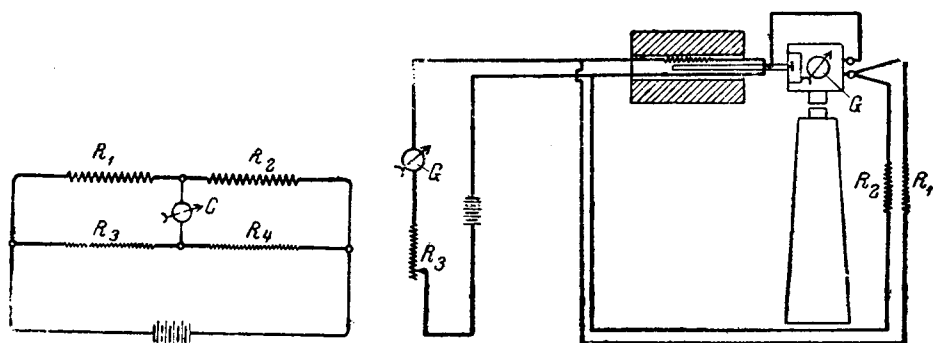


Рис. 229. Схема испытания электропроводности

будет больше, нежели в *c*₄. Но ввиду того что *c*₂ и *c*₄ приключены кало *S* отклонится на некоторый угол, величина которого характерна встречу друг другу, при неравенстве индуцированного тока зеррирует магнитную интенсивность испытуемого образца. Ввиду того что ток в обмотках *c*₃ и *c*₄ переменный, его выпрямляют катодной лампой для того, чтобы он мог быть измерен гальванометром постоянного тока (если, конечно, не имеется под рукой гальванометра переменного тока).

Испытание измерения электропроводности производится по схеме, изображенной на рис. 229. Здесь опять температура измеряется дилатометрическим методом. Гальванометр *G* включается в мостик сопротивлений *R*₁—*R*₄. Сопротивления *R*₁ и *R*₂ весьма малы по сравнению с равными сопротивлениями *R*₃ и *R*₄, и в качестве таковых служат образцы испытуемого материала, отличающиеся друг от друга на небольшую величину и помещенные в печь. При неравенстве *R*₁ и *R*₂ будем иметь:

$$i = \frac{R_1 - R_2}{R + g} \cdot J,$$

где *J* — сила тока, получаемого от батареи, *g* — сопротивление гальванометра, *i* — сила тока в мостике.

Этот способ дает весьма точные результаты.

4. Термоэлектрический метод

Принцип этого метода уже известен из главы IV, когда речь шла об измерении температуры термопарами. Испытание по этому методу сводится к измерению электродвижущей силы спая, образованного металлическим проводником какого-либо металла (эталона) и иссле-

дваемым сплавом; при этом, конечно, эталон не должен претерпевать никакого внутреннего превращения в интервале испытываемых температур.

Определение электродвижущей силы производится или при какой-либо определенной температуре для целого ряда сплавов или же для какого-либо одного сплава при различных температурах. Наиболее полную картину получают при испытании, проведенном в двух указанных направлениях.

Измерение по этому методу производится аналогично измерению электродвижущей силы термопары. Здесь также возможно применить или метод непосредственного измерения или же компенсационный (нулевой) метод.

При испытании термоэлектрическим методом серии сплавов последние изготавливаются в виде проволок или длинных стержней, к одному концу которых прикрепляется проволока — эталон. В качестве эталона здесь применяют различные сплавы и металлы. Такую термопару погружают в среду повышенной температуры и измеряют развивающуюся электродвижущую силу. Ясно, что измерение этой электродвижущей силы должно происходить при какой-либо постоянной температуре. Точность такого испытания будет зависеть от трех обстоятельств: 1) от однородности материала, применяемого в качестве эталона, 2) от точности милливольтметра, измеряющего электродвижущую силу, и 3) от постоянства температуры среды, в которую помещают испытываемую термопару.

Найдя таким образом ряд значений электродвижущей силы, обычно наносят их в виде диаграммы, откладывая по горизонтальной оси химический состав испытываемого металла (например значения A и B), а по вертикальной оси — значение электродвижущих сил для соответствующих сплавов. Характер получаемых при этом кривых зависит от фазового состояния испытываемого сплава.

В случае, когда сплав состоит из двух фаз, кривая изменения электродвижущей силы будет близка к прямой. Если же два компонента образуют одну фазу — непрерывный ряд твердых растворов, кривая изменения электродвижущей силы изобразится и виде гиперболы кривой, вогнутой или выпуклой в отношении оси X . При замене одной фазы двумя, при переходе одной фазы в другую и т. д. кривая электродвижущих сил будет представлять собой комбинированную кривую, состоящую из нескольких отдельных кривых.

При пользовании термоэлектрическим методом для исследования состояния твердого сплава при различных температурах Ле Шателье предложил следующий способ. К каждому концу исследуемого сплава прикрепляется по платиновой проволоке, свободные концы которых, подобно концам обычной термопары, присоединяются к зажимам гальванометра. Образец подвергают неравномерному нагреву так, чтобы один конец нагревался раньше другого. При таком способе ведения нагрева на свободных концах платиновых проволок будем иметь некоторую разность потенциалов термоэлектрического тока. В момент превращения разность потенциалов будет менять свое значение. Следя за показанием термометра t и показанием разности потенциалов e свободных концов платиновых проволок, легко определить искомую кривую $f(t, e)$.

5. Метод электродвижущих сил растворения

В основу этого метода положено измерение разности электрических потенциалов электродов, составленных из чистого металла A и сплава его с другим металлом B , погруженным в какой-нибудь элек-

тролит. Если потенциал первого металла равен p_1 , а потенциалы каждой кристаллической фазы сплава, взятой в отдельности, равны p'_2 и p'_3 , и при этом $p'_2 > p'_3$, то потенциалом данного сплава будет p'_2 , а электродвижущая сила всего элемента определится разностью $p_1 - p'_2$. При изменении состава сплава, в частности, на границе фазы с потенциалом p'_2 , где образуется новая фаза, величина потенциала такого сложного электрода сразу изменится до величины, соответствующей новой структурной составляющей с наибольшим потенциалом.

Можно загрузить A и B в электролит и, замкнув их, измерять силу тока, проходящего в цепи. Однако такое непосредственное наблюдение электродвижущей силы элемента неудобно в том отношении, что по мере растворения более окисляемого металла в электролите, в качестве которого всегда берется раствор соли этого металла, поверхность электродов сильно меняется; это в свою очередь сильно отражается на величине электродвижущей силы — тем более, что определяемая разность потенциалов обычно невелика и измеряется единицами или же десятками милливольт. Изменение поверхности электродов выразилось бы слишком большой величиной и сильно исказило бы результаты испытания.

Поэтому лучше приключить к такому элементу какой-либо другой источник электричества и, направив ток от него обратно направлению тока в испытуемом элементе, измерять разность потенциалов у зажимов последнего. Колебания в разности потенциалов будут служить указанием на обратную электродвижущую силу (электродвижущая сила поляризации) данного элемента. При такой постановке опыта устраняется влияние как малой величины наблюдаемой электродвижущей силы, так и неравномерного разъедания поверхностей электродов. В качестве добавочного источника электричества обычно служит аккумуляторная батарея.

Результаты испытания методом электродвижущих сил растворения наносят на диаграмму, откладывая по горизонтальной оси химический состав испытуемого сплава (например процент содержания одного компонента в другом), а по вертикальной — значения электродвижущих сил растворения; характер кривых, получаемых при этом, зависит от фаз, составляющих испытуемый сплав.

В случае если оба компонента выкристаллизовываются в чистом виде, кривая электродвижущих сил растворения представит собой прямую, параллельную оси X . Для случая твердых растворов получаем кривую, вогнутую или выпуклую по отношению оси X . В случае же предельной растворимости кривая получается комбинированной.

6. Изучение плотности сплавов

Если обозначить через p_1 процентное содержание металла A в бинарном сплаве $A+B$, через d_1 — плотность этого металла; далее, если d_2 будет плотностью металла B , а d — плотностью сплава $A+B$, то мы получим уравнение, указывающее, что объем сплава равен сумме объемов металлов, его составляющих:

$$V = \frac{100}{d} = \frac{p_1}{d_1} + \frac{100 - p_1}{d_2},$$

что будет верно при отсутствии в сплаве как твердых растворов, так и химических соединений.

Теоретическая плотность сплава получится из нашего уравнения следующая:

$$d = \frac{100 d_1 d_2}{p_1 d_2 + (100 - p_1) d_1}.$$

Если мы по оси ординат будем откладывать величину плотности, а по оси абсцисс содержание в нашем сплаве одного из металлов в весовых процентах, то мы получим кривую теоретической плотности сплавов (гиперболу — рис. 230). Если построенная на основании эмпирических данных кривая не будет совпадать с теоретической, то, следовательно, сплав представляет собой не механическую смесь компонентов, а либо твердые растворы их, либо одно или несколько химических соединений.

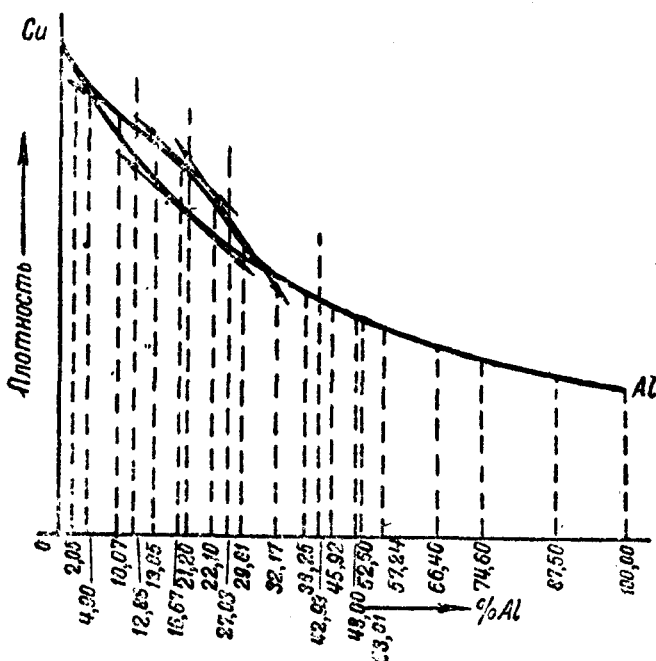


Рис. 230. Схема испытания электропроводности

Если по оси ординат откладывать не плотность, а величину, ей обратную, т. е. удельный объем $V = \frac{1}{d}$, то при изменении по оси абсцисс процентного (весового) содержания в сплаве его компонентов мы получим теоретическую кривую, уравнение которой будет:

$$V = \frac{p_1}{d_1} + \frac{100 - p_1}{d_2}$$

и которая будет прямою (рис. 231). Если же по оси абсцисс отложим состав, выраженный не в весовых, а в объемных процентах, а по оси ординат — плотность, то получим кривую (прямую), уравнение которой будет:

$$d = d_2 + \frac{p' V}{100} (d_1 - d_2).$$

где d — плотность сплавов, $p'V$ — объемное содержание в сплаве металла плотности d , d_2 — плотность второго компонента.

В самом деле, вес 100 объемов сплава металлов A и B равен весу $p'V$ объемов металла A плюс $(100 - p'V)$ объемов металла B , т. е.

$$100d = p'Vd_1 + (100 - p'V)d_2,$$

откуда и получим вышеприведенное уравнение для кривой, выражающей изменение плотности в зависимости от состава сплава в объемных (атомных) процентах.

Переходя к описанию определения плотности при обычной температуре, мы дадим здесь описание двух способов, а именно — метода определения при посредстве гидростатических весов и путем определения объема образца, имеющего некоторый известный вес.

Первый способ, особенно рекомендуемый Гийе¹, может быть осуществлен при посредстве любых достаточно точных весов. описа-

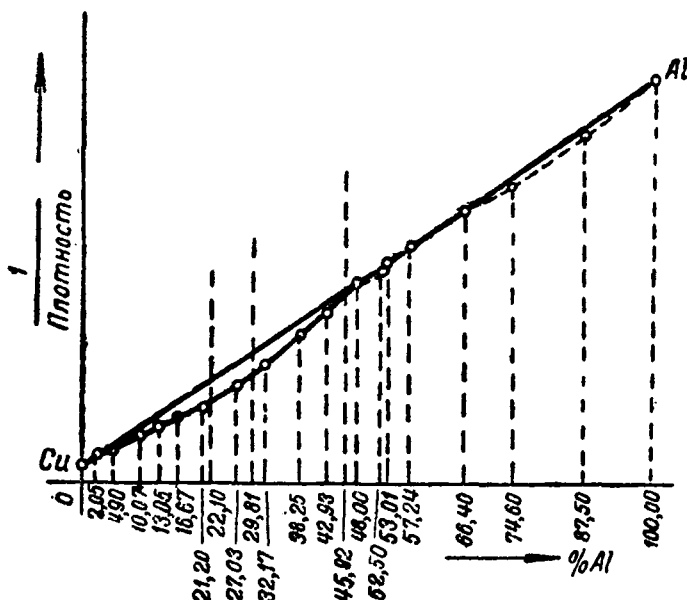


Рис. 231. Схема испытания электропроводности

ние этого способа может быть найдено в любом учебнике физики, и здесь мы ограничимся лишь некоторыми указаниями, которые могут быть полезны для случаев определения плотности сплавов. Образец подвешивается при помощи нити, причем можно или вводить при вычислении плотности поправку на погруженную в жидкость часть нити или же пользоваться очень прочной нитью, имеющей чрезвычайно малый диаметр, влиянием которой можно пренебречь. Так, например, на вольфрамовую нить диаметром в $20\ \mu$ можно подвешивать образцы, имеющие до 100 г веса. Вполне ясно, что при вычислении плотности поправкой на влияние сцепления между жидкостью и такой нитью можно совершенно спокойно пренебречь. Чтобы избежать присутствия в жидкости пузырьков воздуха, лучше применять не воду, а, например, алкоголь, бензин и т. п.

Второй способ, впервые введенный в практику Ле Шателье, заключается в том, что образец, имеющий некоторый заранее определенный вес, погружается в жидкую среду, хорошо смачивающую твердые тела (алкоголь, бензин), после чего измеряется приращение

¹ Léon Guillet, Méthodes d'étude des alliages métalliques, Dunod, стр. 95. Paris, 1923.

объема, создававшееся под действием этого погружения. Для суждения о точности, которой можно достигнуть при пользовании этим методом, укажем, что Ле Шателье пользовался трубкой, имевшей внутренний диаметр 6 мм. Таким образом высота столбика жидкости, отвечающего 1 см³, была равна 35 мм. На трубке через 0,1 см³ были нанесены деления, а измерения требовалось производить с точностью до 0,01 см. Для последней цели отсчеты производились через трубку, имевшую в своем поле масштаб, десять делений которого соответствовали одному делению, нанесенному на стеклянной трубке, т. е. 0,01 см³.

Для определения плотности жидких сплавов при высоких температурах можно пользоваться предложенным Эдвардс и Мурмен¹ прибором, изображенным на рис. 232. Этот прибор состоит из двойного тигля. Внутренний тигель наполняется жидким металлом, имеющим температуру несколько ниже той, для которой желают определить плотность. После наполнения внутренний тигель герметически закрывают, а наружный заполняют тем же жидким металлом для достижения однородного распределения температуры. Уровень металла, налитого в наружный тигель, ниже, нежели у находящегося во внутреннем. Затем весь прибор медленно нагревают до требуемой температуры, измерение которой осуществляется при помощи введенного в аппарат термоэлемента. Расширяясь при нагревании, налитый во внутренний тигель металл переливается в наружный. Затем прибор охлаждают, вынимают из внутреннего тигля слиток и взвешивают его. Эдвардс и Мурмен определяли таким способом плотность алюминия вплоть до 1000°.

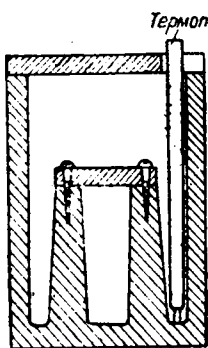


Рис. 232. Схема определения плотности

В табл. 23 приведены плотности (удельные веса) некоторых металлов (по Хютте, *Werkstoffhandbuch*).

7. Коррозионные испытания

Коррозионная стойкость металлов и сплавов может быть определена различными методами². Основными количественными методами оценки коррозионной стойкости являются:

- 1) *электрохимический метод*, состоящий в измерении электродных потенциалов испытываемых металлов и сплавов в различных средах;
- 2) *весовой метод*, состоящий в определении убыли или прибыли в весе образцов из испытываемого металла или сплава после его пребывания в определенной среде;
- 3) *метод определения изменения механических свойств в результате коррозии*;
- 4) *объемный метод*, состоящий в измерении количества газов, выделяющихся или поглощаемых при испытании на коррозию.

Опишем здесь вкратце методику испытания на коррозию по весовому методу и по методу изменения механических свойств, так как эти методы наиболее просты, применяются наиболее широко при технических испытаниях и по ним можно непосредственно судить о влиянии той или иной коррозионной среды на испытываемый металл.

При испытании по весовому способу образцы правильной геоме-

¹ Edwards and Moorman, *Met. Engg.*, XXIV, 12/1, 1921.

² Подробно о методах испытания на коррозию см. В. О. Крениг, *Коррозия металлов*, 2 изд., 1938, и статью Б. К. Вульфа, в сборнике «Лаборатория металловедения», под ред. Н. В. Гевелинга, 1939.

Таблица 23

Плотность (удельный вес) некоторых металлов

М е т а л л	Химиче- ский символ	П л о т н о с т ь	
		при + 20°	жидкого метал- ла при темпера- туре плавления
Алюминий	Al	2,70	2,46
Ванадий	V	5,50	—
Висмут	Bi	9,80	10,04
Вольфрам	W	19,10	—
Железо	Fe	7,88	6,88
Золото	Au	19,30	—
Кадмий	Cd	8,64	7,98
Кобальт	Co	8,80	—
Кремний (кристалличе- ский)	Si	2,34	—
Марганец	Mn	7,30	—
Медь	Cu	8,93	8,40
Молибден	Mo	10,20	—
Никель	Ni	8,80	—
Олово	Sn	$\alpha = 5,70$ $\beta = 7,28$	6,99
Платина	Pt	21,40	—
Свинец	Pb	11,34	10,69
Сурьма	Sb	6,62	6,55
Хром	Cr	6,70	—
Цинк	Zn	7,10	6,92

трической формы, например цилиндрические (для удобства подсчета их поверхности), взвешиваются на аналитических (если их вес не превышает 50—100 г) или технических весах и затем подвергаются испытанию в течение того или иного промежутка времени. После испытания образцы тщательно (но осторожно, чтобы не повредить основной металл) очищаются от продуктов коррозии и снова взвешиваются. Полученная разность в весе до и после испытания, отнесенная к единице поверхности образца и единице времени, называется *удельной потерей веса* и служит мерой коррозионной стойкости материала.

В настоящее время существует несколько различных норм для оценки коррозионной стойкости металлов и сплавов¹. Наиболее распространенными являются германские нормы (Круппа) (табл. 24) и классификация Финке (табл. 25).

Таблица 24

Германские нормы
(Круппа)²

Класс стойкости	Характеристика стой- кости материала	Удельная потеря веса $\frac{z}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$
I	Вполне стойкий . . .	До 0,1
II	Достаточно стойкий .	0,1—1,0
III	Относительно стойкий	1,0—3,0
IV	Малостойкий	3,0—10,0
V	Нестойкий	10,0 и выше

¹ См. статью Н. Н. Грацианского, Химическое машиностроение, 1938, 6-² Chemiker Zeitung, 1932, № 98, 972.

Таблица 25

Классификация Финке

Класс стойкости	Характеристика стойкости материала	Удельная потеря веса г/м ² · сутки	Время в сутках, потребное для растворения слоя в 1 мм
I	Практически вполне стойкий	До 1	Свыше 10000
IIa	Практически стойкий	1—5,5	10000—5500
IIb	Достаточно стойкий	5,5—10	5500—1000
IIIa	Малостойкий	10—55	1000—550
IIIb	Малостойкий (почти нестойкий)	55—100	550—100
IV	Нестойкий	100 и выше	100 и меньше

Приведем еще классификацию, предложенную Н. Н. Грацианским (табл. 26 на стр. 204).

Пересчет убыли S толщины металла или сплава в миллиметрах за год в значениях удельной потери ρ , выраженной в $\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}}$, и обратно производится по формулам:

$$S = 8,76 \frac{\rho}{\gamma} \frac{\text{мм}}{\text{год}}$$

и

$$\rho = 0,114 S \gamma \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}},$$

где γ — удельный вес металла или сплава.

После испытания на коррозию можно не счищать с поверхности образцов продуктов коррозии. В этом случае вместо удельной потери в весе о коррозионной стойкости судят по удельной прибыли в весе. Норм для оценки коррозионной стойкости по удельной прибыли в весе не существует.

Оценка коррозионной стойкости весовым методом, очень простая и наглядная, может быть применена лишь для случая равномерной коррозии. Если же металл или сплав склонен к интеркристаллической коррозии, то оценка его коррозионной стойкости по изменению веса может привести к совершенно неправильным заключениям. В таких случаях о коррозионной стойкости материала следует судить по изменению механических свойств в результате коррозии. При этом методе испытания поступают так. Изготавливают некоторое количество обычных образцов для испытания на разрыв. Часть из них испытывается на разрыв в непрокорродированном состоянии. При этом испытании определяются временное сопротивление разрыву σ_B и относительное удлинение δ . Другая часть образцов подвергается испытанию на разрыв после испытания на коррозию. При этом обычно оказывается, что и временное сопротивление разрыву σ'_B и относительное удлинение δ' уменьшились, т. е.

$$\sigma'_B < \sigma_B$$

и

$$\delta' < \delta;$$

тогда отношения

$$\frac{\sigma_B - \sigma'_B}{\sigma_B} 100\%$$

и

$$\frac{\delta - \delta'}{\delta} 100\%$$

могут служить мерой коррозионной стойкости испытывавшегося материала.

О коррозионной стойкости *литых* металлов и сплавов рекомендуется судить по потере временного сопротивления разрыву, а о коррозионной стойкости прокатанных — по потере относительного удлинения.

Помимо коррозионной стойкости испытываемого металла или сплава и химических или электрохимических свойств коррозионной среды, на результаты коррозии оказывают еще громадное влияние условия испытания.

Испытание на коррозию можно производить:

1) при постоянном погружении образцов в коррозионную жидкость;

2) при попеременном смачивании и высушивании образцов;

3) при обрызгивании образцов коррозионной жидкостью в виде тумана.

Испытание при постоянном погружении производится путем подвешивания образцов при помощи конского волоса в стаканы с налитой в них коррозионной жидкостью. При массовых испытаниях применяются шпиндельные аппараты (рис. 233). В этом аппарате (который является термостатом) испытываемые образцы (рис. 234) устанавливаются в эбонитовую стойку, а стойка помещается в стеклянный стакан с жидкостью. В стаканы вставлены стеклянные мешалки с эбонитовыми лопастями, при помощи которых производится непрерывное перемешивание жидкости.

Для испытания при попеременном смачивании и высушивании применяются различные аппараты. Один из таких аппаратов (так называемое колесо Гарднера) изображен на рис. 235. Недостаток испытания на этом приборе — смачивание всех образцов в одной и той же коррозионной жидкости — устраняется при испытании на аппарате

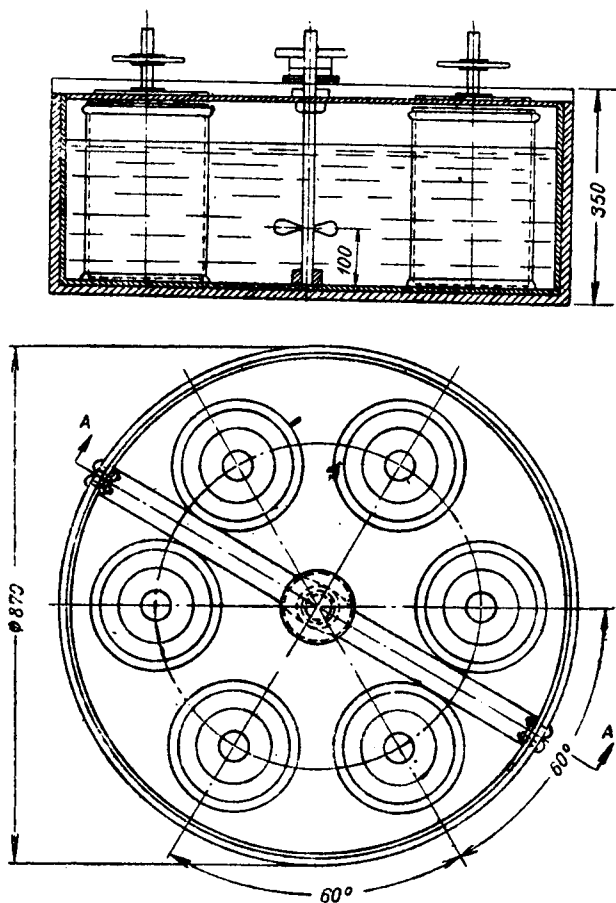


Рис. 233. Шпиндельный аппарат (Крениг).
Общий вид шпиндельного аппарата

Таблица 26

Классификация Н. Н. Грацианского

Класс стойкости	Характеристика стойкости материала	Убыль толщины металла за год, мм	Время растворения слоя толщиной 1 мм	Удельная потеря веса при удельном весе металла или сплава, $\frac{г}{м^2 \cdot час}$		
				~ 3	~ 7,5	~ 11
I	Вполне стойкий	До 0,1	10 лет	До 0,03	До 0,1	До 0,15
II	Стойкий	0,1—0,3	10 лет—3 года	0,03—0,01	0,1—0,3	0,15—0,5
III	Достаточно стойкий	0,3—1,0	3—1 год	0,1—0,3	0,3—1,0	0,5—1,5
IV	Относительно стойкий	1,0—3,0	12—4 мес.	0,3—1,0	1,0—3,0	1,5—5,0
V	Малостойкий	3,0—10,0	4—1,5 мес.	1,0—3,0	3,0—10,0	5,0—15,0
VI	Нестойкий	Больше 10,0	Меньше 1,5 мес.	Больше 3,0	Больше 10,0	Больше 15,0

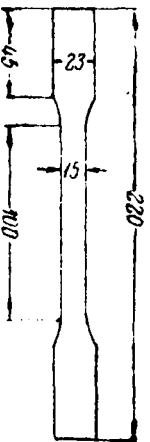


Рис. 234. Стандартные образцы для коррозионных испытаний

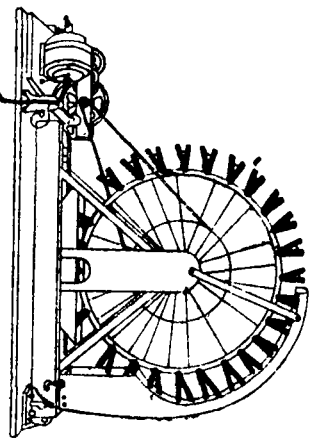
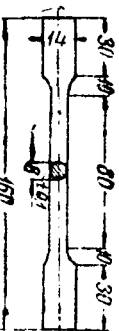


Рис. 235. Колесо Гарднера (Вульф)

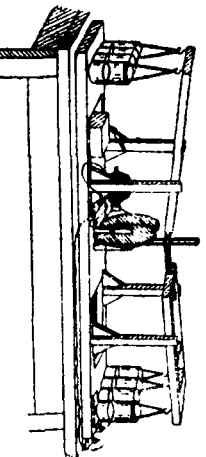


Рис. 236. Аппарат Дымонта (Вульф)

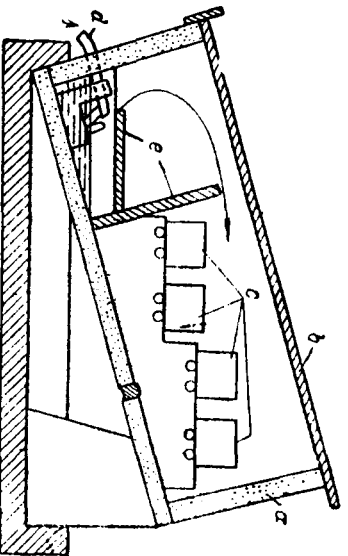


Рис. 237. Туманная камера Американского бюро стандартов (Вульф)

Дырмонта (рис. 236). В этом аппарате каждый подвешенный к качающейся раме образец погружается в отдельный сосуд.

Для испытания в условиях обрызгивания (во влажной атмосфере) служит туманная камера Американского бюро стандартов (рис. 237). В ящик *a* со стеклянной крышкой *b* укладываются или подвешиваются образцы *c*. Воздух по трубке *d* подается в распылительную установку, где происходит образование тумана. Для предохранения образцов от попадания на них брызг и капель служат стеклянные перегородки *e*.

Испытание металлов и сплавов на газовую коррозию при высоких температурах (испытание на жаростойкость) производится путем нагревания образцов в трубчатой электрической печи, через которую пропускается соответствующий газ. Образцы взвешиваются до и после испытания, причем о жаростойкости сплава судят или по прибавке в весе (если продукты коррозии не удаляются) или по убыли в весе (если с образцов тщательно удаляются все продукты коррозии).

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Для испытания качества материала изделия из последнего вырезаются пробные бруски. Однако результаты испытания этих брусков не всегда позволяют судить о качестве и в частности о прочности всего изделия в целом. Для нахождения наиболее слабых мест при-

бегают обычно к помощи *макроанализа*. Макрошлифы изготавливаются как из мелких изделий, так и из весьма крупных, весящих иногда до 100 т (слитки). Для улавливания сернистых включений в крупных валах, весящих 20—40 т, их поверхность полностью покрывается по способу Баумана бромосеребряной бумагой. Испытание образцов, вырезанных из наиболее слабых мест, указывает на те минимальные свойства изделия, на которые можно рассчитывать.

Однако эти испытания не всегда достаточны. Ряд внутренних дефектов при этом может остаться невыясненным, и для их выявления пользуются другими методами.

Методы испытания, позволяющие устанавливать наличие или отсутствие в изделии как наружных, так и внутренних пороков (трещин, раковин и т. д.) без разрушения самого изделия называются *дефектоскопическими*. Методы дефектоскопии многочисленны и разнообразны. Основными из них являются следующие: 1) визуальный метод (осмотр невооруженным глазом, осмотр при помощи оптических приборов); 2) керосиновая проба; 3) акустический и ультразвуковой; 4) рентгеновский метод и γ -лучи; 5) электрометрический; 6) магнитный; 7) индукционный; 8) метод пандермоторных индикаторов; 9) термоэлектрический метод.

Рис. 238.
Зрительная
труба для
осмотра
внутренней
поверхности
сверленных
отверстий
валов

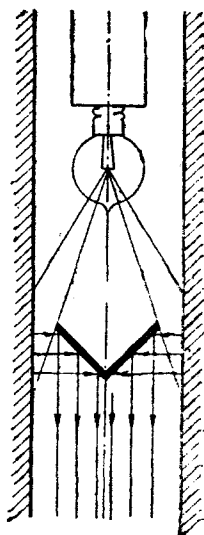


Рис. 239.
Электрическая
лампочка
и коническое
зеркало в
зрительной
трубе для
осмотра
внутренних
отверстий
сверленных
отверстий
валов

1. Визуальный метод

Простой внешний осмотр готового изделия невооруженным глазом по существу является дефектоскопическим методом испытания, так как и при таком внешнем осмотре можно наблюдать различные поверхностные пороки (трещины).

Роторные валы (например турбогенераторов) подвергаются не только осмотру со стороны внешней поверхности, но и особо тща-

тельному осмотру внутренней поверхности сквозных отверстий, идущих по оси вдоль всего вала. Это центральное отверстие делается не по конструктивным соображениям, а исключительно с целью обнаружить дефекты в середине вала, т. е. там, где эти дефекты наиболее вероятны (вследствие усадочной рыхлости слитка).

Прибор для осмотра подобных сверленных отверстий состоит из зрительной трубы и зеркала. На рис. 238 и 239 представлено устройство конического зеркала¹, позволяющего наблюдать полностью цилиндрическую поверхность.

На рис. 240 можно видеть, как производится осмотр отверстия роторного вала турбогенератора при помощи зрительной трубы на заводе «Электросила» им. Кирова.

2. Керосиновая проба

В некоторых случаях трещины столь малы, что, не прибегая к специальным способам для их обнаружения, заметить их не удастся.

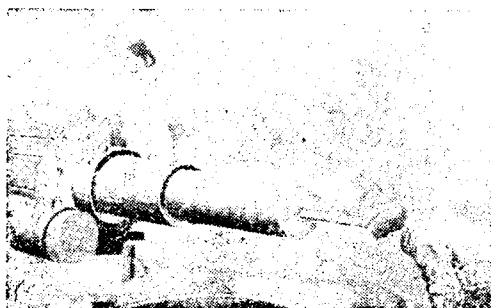


Рис. 240. Осмотр отверстия роторного вала турбогенератора зрительной трубой на заводе «Электросила» им. С. М. Кирова

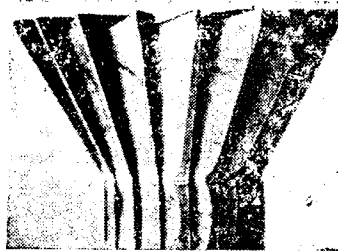


Рис. 241. Обнаружение трещин при помощи керосиновой пробы

Для обнаружения трещин поступают, например, следующим образом. Исследуемое изделие погружается на 15—30 мин. в керосин. Затем, после извлечения из керосина, изделие обдувают сильной струей песка на пескоструйном аппарате. Изделие становится с поверхности совершенно сухим. Если в нем были поверхностные трещины, то из них постепенно начинает выступать керосин, тем самым отчетливо обнаруживая трещины (рис. 241). Вместо обдувания песком можно поступить иначе: протереть насухо поверхность изделия и нанести на то место, которое почему-либо внушает подозрения, слой из меловой обмазки (консистенции сметаны). Через несколько минут меловая обмазка в том месте, где имеется трещина, начинает темнеть из-за впитывания выступающего из трещины керосина. Таким способом, например, проверяют во вкладышах подшипников плотность приставания баббита к стали.

3. Акустический способ

Этот способ очень элементарен и служит для обнаружения трещин (безразлично внутренних или наружных). Он состоит в том, что испытуемое изделие простукивают в нескольких местах. У здоровых

¹ H. Rickli, Mechanical degree of Safety in large turbogenerators. Доклад на World Power Conference Sect. Meet., Tokyo, 1929.

изделий, не имеющих трещин, при этом получается чистый ровный звук. Наоборот, изделия с трещинами дают приглушенный, часто даже дребезжащий звук.

Гораздо более чувствителен и, значит, более надежен ультразвуковой способ¹. Этот способ, предложенный проф. С. Я. Соколовым, основан на том, что ультразвуковые колебания (от 500 тысяч до 10 млн. в секунду) могут свободно без затухания проходить через плотные однородные тела, в том числе и металлы. Если в изделии на пути пучка ультразвуковых лучей окажется какой-либо дефект (инородное включение, раковина, трещина), то пучок не пойдет дальше и отразится (рис. 242).

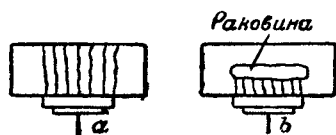


Рис. 242. Распространение ультразвуковых лучей в металлическом изделии, имеющем дефект

а — при однородном материале;
б — при наличии раковин

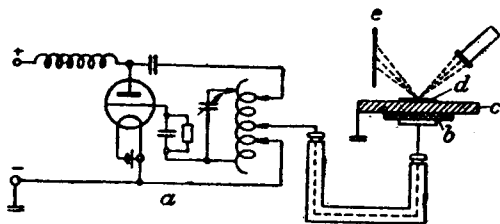


Рис. 243. Схема установки для обнаружения дефектов ультразвуковым методом

Установка для просвечивания изделий ультразвуковыми лучами представлена на рис. 243. Она состоит из лампового генератора а, создающего переменное электрическое напряжение с частотой 1 000 000 периодов в секунду. Это переменное напряжение передается к кварцевому вибратору б, представляющему собой кварцевую пластинку, зажатую между двумя электродами, к которым и подводится переменное напряжение генератора. При прохождении тока высокой частоты кварцевая пластинка колеблется и, действуя как вибратор, создает в металле с направленный пучок ультразвуковых колебаний. На поверхность изделия наливают слой масла d (например, трансформаторного) или ставят плоский сосуд, наполненный маслом. В результате колебаний, прошедших через изделие, на поверхности масла появляется рябь, которую можно наблюдать по ее отражению на экране е. В том месте, которое соответствует какому-либо внутреннему пороку, отразившемуся ультразвуковые колебания, поверхность масла будет спокойна (без ряби), что и будет свидетельствовать о наличии внутреннего дефекта.

При помощи ультразвуковых колебаний можно обнаруживать внутренние пороки в массивных изделиях (толщиной до 1 м).

4. Рентгеновский метод

Рентгеновские лучи обладают способностью проходить через различные твердые вещества. При прохождении рентгеновских лучей через эти вещества часть лучей при этом поглощается самим веществом, причем степень поглощения их различными веществами неодинакова. На этом и основано применение рентгеновских лучей в де-

¹ См. статьи С. Я. Соколова, Заводская лаборатория, 1935, 5 и 12; С. И. Рамм, Заводская лаборатория, 1934, 8; Н. Ф. Отпущенникова, Заводская лаборатория, 1937, 8; Мясникова, Вестник металлопромышленности, 1935, I. Журнал Технической физики, т. XI, в. 1—2, 1941, стр. 160.

фектоскопии. При однородном материале поглощение будет одинаковым по всему испытываемому сечению и поэтому фотографическая пластинка, на которую падают рентгеновские лучи, прошедшие через испытываемое тело, равномерно потемнеет, а если вместо фотографической пластинки поставить флуоресцирующий экран, то он будет равномерно светиться. Иначе будет, если в изделии имеется какой-либо дефект (например, раковина). В этом случае поглощение рентгеновских лучей изделием будет неодинаковым и поэтому фотографическая пластинка потемнеет неодинаково, так что на ней можно будет видеть контуры внутреннего порока в натуральную величину. При помощи рентгеновских лучей можно обнаруживать дефекты, толщина которых составляет не менее 1—2% от толщины изделия. Предельная толщина просвечиваемых изделий зависит от величины напряжения. При напряжении 200 kV можно просвечивать стальные или чугунные изделия толщиной до 50—60 мм. Сверхвысокие напряжения, которые постепенно начинают применяться в рентгеновской аппаратуре в СССР и за границей, позволяют доводить предельную толщину изделий из черных металлов до 120 мм.

При просвечивании γ -лучами (полученными от радия или эманаций радия) предельная толщина изделий из черных металлов может быть доведена до 250 мм. Но зато чувствительность при просвечивании γ -лучами значительно меньше, чем при просвечивании рентгеновскими лучами, и минимальная толщина дефекта составляет 4—6% от толщины изделия. Еще один недостаток просвечивания γ -лучами состоит в очень большой длительности экспозиции; например, при толщине объекта 100 мм экспозиция составляет 15 час., а при толщине объекта 150 мм экспозиция достигает 45 час. Преимущества просвечивания γ -лучами состоят в том, что отпадает надобность в какой бы то ни было, а тем более в столь громоздкой и достаточно капризной аппаратуре, какая нужна при просвечивании рентгеновскими лучами, а также в том, что препарат радия в силу своей портативности (размером, примерно, с горошину) может быть помещен в труднодоступных местах, в которых не может быть установлена рентгеновская трубка.

5. Электрометрический метод

Электрометрический метод обнаружения внутренних пороков основан на сравнении электрического сопротивления исследуемого объекта в здоровом месте и в месте с дефектом.

Через испытываемый образец пропускается электрический ток, лучше всего — постоянный. Затем специальной вилкой p (рис. 244), представляющей собой два изолированных друг от друга острия, расстояние между которыми постоянно, измеряют падение потенциала вдоль образца. При установившемся токе силой J А и при постоянной площади сечения образца гальванометр уловит разность потенциалов между остриями вилки, равную $v = J \cdot r$, где r — электрическое сопротивление материала на длине, равной расстоянию между остриями.

Если теперь передвигать вилку p вдоль образца и попасть в дефектную зону, то электрическое сопротивление r увеличивается, а вместе с ним увеличивается и показание гальванометра.

Несмотря на свою простоту, этот метод не получил широкого распространения прежде всего в силу трудности обеспечения надежного контакта между исследуемым объектом и остриями вилки.

6. Магнитный метод

Этот метод позволяет обнаруживать очень мелкие поверхностные дефекты, прежде всего мелкие поверхностные трещины толщиной в 0,04 мм, например в закаленных изделиях, что совершенно недоступно для рентгеновских лучей.

Этот метод, называемый по имени впервые широко применившей его американской фирмы Magnaflux Corporation методом *магнафлюкс*, состоит в том, что подвергаемое дефектоскопическому испытанию изделие намагничивается. В том месте изделия, где на поверхности имеется трещина (рис. 245), магнитные силовые линии выходят из изделия. Тогда на краях трещины образуются разноименные полюса. Если теперь испытуемое изделие посыпать магнитным порошком, например крокусом или железной пудрой (сухой метод или метод магнитных порошков), или опустить изделие в масляную или керосиновую ванну со взвешенным магнитным порошком (мокрый метод или

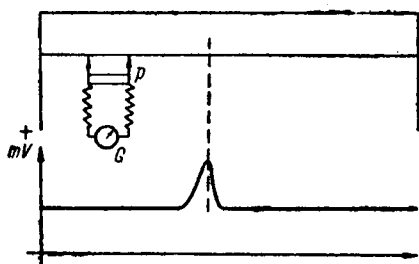


Рис. 244. Обнаружение дефекта электрометрическим методом



Рис. 245. Схема расположения магнитных силовых линий в изделии, имеющем дефект

метод магнитных суспензий), то частицы магнитного порошка будут усиленно оседать по краям трещины, так как она в силу сказанного представляет миниатюрный постоянный магнит. В результате такого оседания магнитного порошка на поверхности стального изделия обнаружатся темные линии, которые во много раз (50—100) шире самой трещины.

Этим способом чрезвычайно просто и быстро можно находить тонкие трещинки в инструментах и в мелких и крупных машинных деталях. На рис. 246 а и б и 247 представлена часть сломавшегося штампа с большим количеством мелких трещин, невидимых невооруженным глазом (рис. 246, а), но обнаруженных магнитным методом (рис. 246, б).

На рис. 248 и 249 показан пример применения метода магнафлюкс для обнаружения пороков на внутренней поверхности отверстия роторного вала турбогенератора. Магнитное ярмо а с катушками б создает магнитное поле, идущее поперек вала. Из сосуда с внутри отверстия при помощи пульверизатора подается керосин с взвешенным в нем магнитным порошком. После этого поверхность отверстия изучается при помощи зрительной трубы, как это было описано выше.

Намагничивание детали должно производиться в таком направлении, чтобы магнитные силовые линии шли перпендикулярно дефекту (трещине), иначе рассеяние магнитных силовых линий получается очень слабым — и дефект может быть не выявлен. Поэтому, в частности, при описанном изучении дефектов на внутренней поверхности отверстия вала турбогенератора операцию намагничивания и

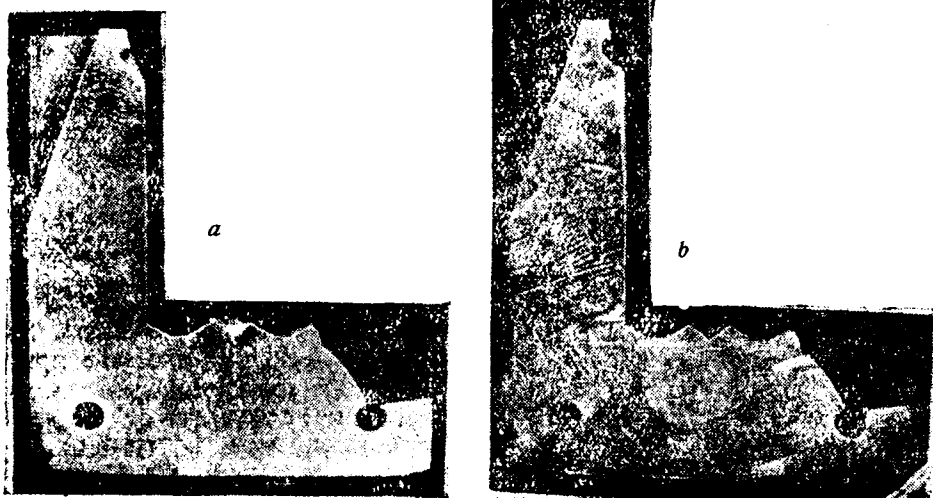


Рис. 246. Трещины в сломавшемся штампе, обнаруженные методом магнафлюкс

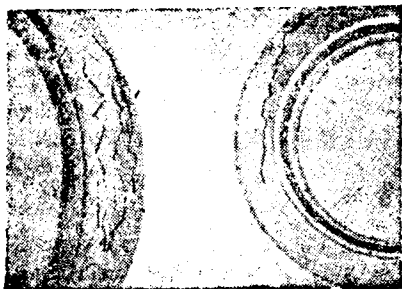


Рис. 247. Трещины на изделиях, обнаруженные методом магнафлюкс (Серпанов)

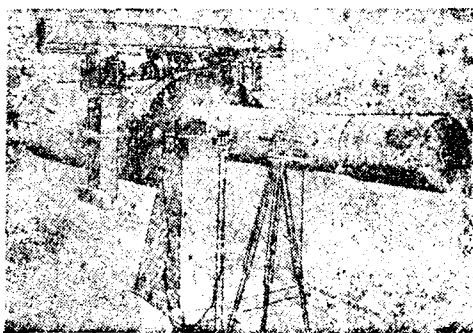


Рис. 248. Пример применения метода магнафлюкс для изучения состояния внутреннего отверстия сверленного роторного вала турбогенератора

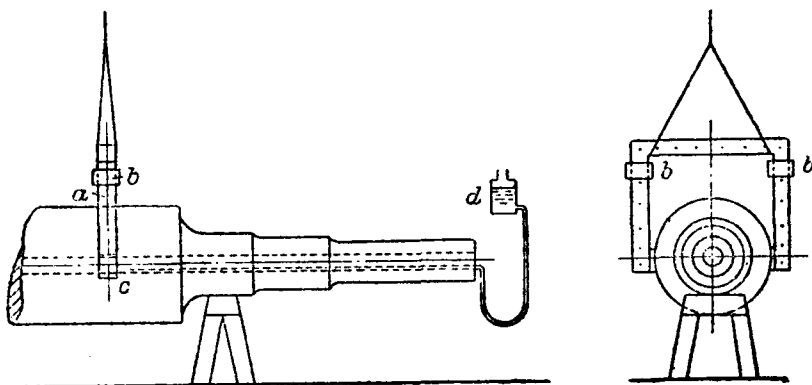


Рис. 249. Применение метода магнафлюкс для изучения состояния внутреннего отверстия сверленного роторного вала турбогенератора

осмотра следует производить несколько раз, поворачивая вал каждый раз на некоторый угол (не больше 90°). Для обнаружения поперечных дефектов способ намагничивания должен быть изменен так, чтобы магнитные силовые линии шли вдоль оси вала. Это легко осуществить, окружив вал кабелем в виде соленоида и пропуская по нему ток. Сам вал в этом случае будет играть роль сердечника. Таким образом, сложные детали, в которых трещины могут быть расположены в самых разнообразных направлениях, намагничиваются в таком порядке: намагничивание — исследование — размагничивание — повторное намагничивание и т. д.

Метод магнафлюкс нашел большое распространение¹ ввиду своей простоты, быстроты и отчетливости выявления дефектов. Кроме того, этот метод допускает его автоматизацию. В качестве приме-

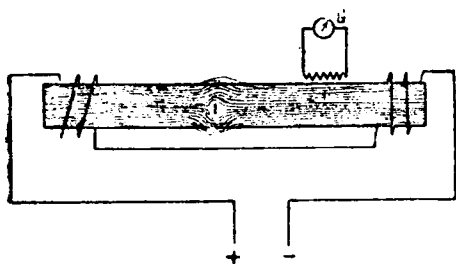


Рис. 250. Схема обнаружения дефекта индукционным методом

ра такой автоматизации можно указать на полуавтомат Нифонтова, применяемый на Подшипниковом заводе им. Л. М. Кагановича для контроля роликов. Ролики, подлежащие дефектоскопическому исследованию, намагничиваются и автоматически поступают на вращающийся диск. Ролики, лежащие на этом диске, попадают под душ, подающий эмульсию, состоящую из керосина со взмученным в нем магнитным порошком. Пере-

двигаясь дальше, ролики доходят до контролера, который осматривает их и снимает с диска те ролики, которые имеют трещины.

7. Индукционный метод

Улавливание магнитного потока рассеивания (рис. 245) может быть осуществлено также иным путем. При передвижении вдоль испытуемого намагниченного изделия катушки (рис. 250) в ней индуцируется электродвижущая сила, когда катушка пересекает магнитный поток рассеивания, вызванный наличием на поверхности изделия трещины. Если в цепь этой катушки включить гальванометр, то по отклонению его стрелки можно судить о наличии дефекта.

Индукционный метод пригоден для обнаружения дефектов в изделиях, имеющих постоянное поперечное сечение по своей длине (прутки, трубы, рельсы, канаты, листы, кольца, сварные швы и т. д.).

На индукционном методе основаны много различных дефектоскопов: электромагнит Сузуки для обнаружения дефектов в рельсах, рельсовый дефектоскоп Сибирского физико-технического института, прибор Санфорда для испытания проволочных канатов, прибор Спунера и Киннарда для контроля сварных швов, дефектоскоп фирмы Magnetic Analyses Corporation, щуп Пфаффенбергера для испытания сварных швов, прибор Уральского физико-технического института

¹ См. статьи Серпакова, Американская техника и промышленность, 1935, 12; А. В. Жигadlo и Л. Э. Певзнер, Заводская лаборатория, 1936, 2; А. Г. Спектор, Заводская лаборатория, 1937, 1 и 1938, 3; С. Т. Назарова, Заводская лаборатория, 1937, 9; И. В. Ешина, Заводская лаборатория, 1937, 10; В. И. Николина и И. Я. Левшук, Заводская лаборатория, 1938, 3; К. В. Григорова, Заводская лаборатория, 1938, 6; А. В. Жигadlo, Заводская лаборатория, 1939, 4—5; А. В. Нифонтова, Приборы для контроля магнитным методом, 1937; H. I. Noble, Metals and Alloys, 1936, 6—7; Johnson и Clement, S. A. E. Journal, 1939, февраль, и мн. др.

для контроля сварных изделий, прибор-дефектоскоп Хренова, дефектоскоп Талицкого и Погожева и др.¹

На рис. 251 показан прибор Санфорда для испытания проволочных канатов.

На рис. 252 представлена схема дефектоскопа Талицкого и Погожева. Это — обычный магнитоэлектрический электроизмерительный прибор, в котором роль постоянного магнита играет магнитный поток рассеяния, возникающий в месте расположения дефекта (трещины).

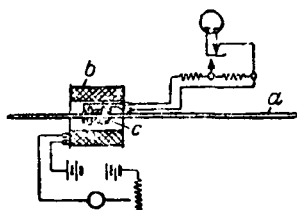


Рис. 251. Схема прибора Санфорда для испытания проволочных канатов

a — образец; b — первичная обмотка; c — вторичная обмотка

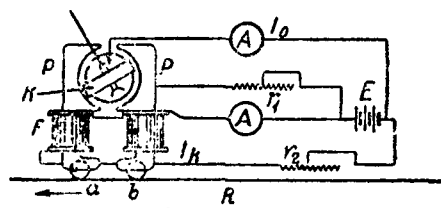


Рис. 252. Схема дефектоскопа Талицкого и Погожева

В сердечник P часть магнитного потока между точками a и b ответвляется и в том случае, когда прибор находится над здоровым местом. Этот поток действует на подвижную катушку K , помещенную между полюсами P . Через эту катушку течет постоянный ток I_0 от источника тока E . Реостатом r_1 можно изменять ток I_0 , настраивая прибор, по желанию, на ту или иную чувствительность. Катушка K при прохождении по ней постоянного тока I_0 повернется вместе со стрелкой на некоторый угол. При помощи дополнительных катушек F , в которых течет ток I_k , создающий в сердечниках P магнитный поток обратного направления, и реостата r_2 катушка K вместе со стрелкой приводится в нулевое положение. При прохождении через дефектное место величина ответвленного потока изменится, и стрелка сойдет с нуля. По величине ее отклонения можно судить о размерах дефекта.

8. Пондермоторные индикаторы

В основе действия пондермоторных дефектоскопов лежит тот же принцип улавливания магнитного потока рассеяния, образуемого дефектным местом, но в данном случае этот магнитный поток рассеяния приводит в движение ферромагнитное тело, попавшее в этот поток рассеяния. Так устроен, например, индикатор Ф. М. Карпова², схема которого представлена на рис. 253. Якорь a из трансформаторного железа укреплен на конце стрелки, вращающейся на оси o . При испытании индикатор ставится на поверхность намагниченного изделия так, чтобы стрелка была перпендикулярна оси магнитного пото-

¹ См. сообщение измерительного отдела ВЭИ, Вестник металлопромышленности, 1932, 5 и 8; П. А. Халилеев и В. С. Обухов, Заводская лаборатория, 1937, 10; М. В. Дехтяр, Заводская лаборатория, 1935, 9; В. П. Кашкин, Заводская лаборатория, 1937, 9; А. В. Талицкий и И. И. Погожев, Вестник металлопромышленности, 1933, 2—3; А. Слонов, Дефектоскопическая тележка, М., 1939, и др.

² См. В. С. Меськин, Ферромагнитные металлы, 1935; А. Слонов, Магнитные дефектоскопы изобретателя Ф. М. Карпова, 1939.

ка. Когда при передвижении индикатора по поверхности испытуемого изделия под индикатором окажется дефектное место с магнитным потоком рассеяния, то якорь a сначала будет втянут магнитным потоком рассеяния и качнется, следовательно, в сторону движения индикатора, а затем будет удерживаться этим же потоком и качнется, следовательно, в обратном направлении. В результате таких перемещений якоря a противоположный конец стрелки сначала замкнет контакт 1 , а затем разомкнет его. При этом произойдет замыкание и размыкание цепи реле, благодаря чему электромагнит k притянет пластинку n , которая, прижавшись к контакту 1 , замкнет сигнальную цепь. В эту сигнальную цепь могут быть включены световая или звуковая сигнализация, пишущий аппарат, отмечающий на движущейся ленте пики при прохождении каждого дефекта, краскоразбрызгиватель, открывающийся при каждом замыкании сигнальной цепи и поливающий место дефекта жидкой краской.

В настоящее время прибор еще более усовершенствован. В частности, индикатор превращен в трехстрелочный, причем каждая из стрелок обладает разной чувствительностью. Благодаря этому прибором можно не только обнаруживать дефекты, но и до известной степени количественно их оценивать (зажигается разное количество ламп, выбрызгивается различное количество краски и т. д.).

Особенное значение дефектоскоп имеет при обнаружении дефектов рельсов, уложенных в пути.

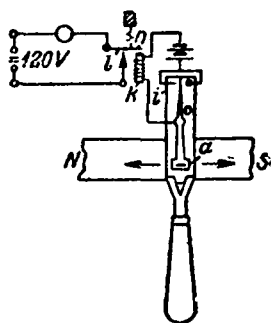


Рис. 253. Схема индикатора Карпова

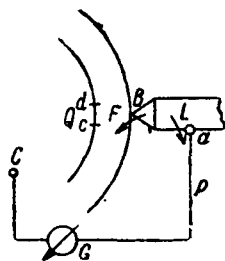


Рис. 254. Определение глубины обезуглероживленного слоя по Нифонтову

Дефектоскопная путеизмерительная станция служит не только для обнаружения дефектов, но и для производства намагничивания рельсов: оси вагона являются электромагнитами, магнитный поток которых замыкается через рельс. Приборы-индикаторы находятся между осями вагона над каждым рельсом на небольшом расстоянии от его головки. При работе на железнодорожном полотне можно, без ущерба для контроля, получить среднюю скорость 10—12 км/час.

9. Термоэлектрический метод

Термоэлектрический метод позволяет обнаруживать такие дефекты, как поверхностное обезуглероживание, отбеливание в чугунах и т. д., а также проверять однородность партии материала.

Сущность термоэлектрического метода такова же, как и принцип термоэлектрического пирометра. Испытуемое изделие, образуя пару со стержнем прибора, приключается к гальванометру. Место контакта

стержня прибора и изделия нагревается. В результате этого появляется термоэлектродвижущая сила, которая вызывает отклонение стрелки гальванометра.

На рис. 254 представлена схема измерения глубины обезуглероженного слоя термоэлектрическим методом¹. Изделие Q с поверхностным обезуглероженным слоем F присоединяется в точке C к гальванометру G , который другим железным проводом соединен с медным стержнем L . Если стержень нагревать, то в точках a (место соединения медного стержня с железным проводом p) и B (место контакта медного стержня с поверхностью изделия) и на площадке dc (место раздела обезуглероженного слоя F и сердцевины изделия Q) возникнут термотоки, причем первые два термотока будут равны по величине (так как температуру в точках a и B можно считать одинаковой в силу высокой теплопроводности меди, а обе пары одинаковы по химическому составу) и противоположны по направлению (как это и показано на рисунке стрелками). Поэтому эти два тока взаимно друг друга компенсируют. Следовательно, термоток в цепи и отклонение стрелки гальванометра G будут в основном зависеть от термоэлектродвижущей силы на участке dc . Чем больше глубина обезуглероживания, тем дальше отстоит участок dc от точки B , тем ниже температура на участке dc и тем меньше, следовательно, отклонение стрелки гальванометра.

На том же по существу принципе устроены приборы для сортировки различных материалов².

¹ См. статью А. В. Нифонтова, Заводская лаборатория, 1934, 1, см. также ст. Р. Янус и Я. Салитра, Заводская лаборатория, 1937, 4.

² См. П. И. Зимнов и П. Ф. Василевский, Заводская лаборатория, 1936, 8; Описание прибора А. С. Михельсона см. в книге И. А. Одингга, И. Ф. Дмитриева, Т. А. Лебедева и Б. П. Захарова, Пути механизации и автоматизации контроля качества металлов в машиностроении, 1940.

ГЛАВА VII

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Введение

Механические свойства металлов, несомненно, являются наиболее важными характеристиками для машиностроения, так как они являются критерием способности металла без повреждения сопротивляться воздействию сил. Понятие «механические свойства» включает в себя большое число показателей, оттеняющих ту или иную способность металла выдерживать механические усилия.

Прежде всего эти показатели подразделяются в зависимости от характера действующей на металл нагрузки. Последние бывают: 1) статическими, 2) динамическими (ударными) и 3) повторно-переменными.

Стагической нагрузкой называется однократно приложенная нагрузка, которая спокойно, плавно и относительно медленно возрастает от нуля до своей конечной величины.

Динамической (ударной) нагрузкой называется такая однократно приложенная нагрузка, которая воздействует на металл резко и с чрезвычайно большой скоростью (почти мгновенно) возрастает от нуля до своей конечной величины.

И, наконец, *повторно-переменной* нагрузкой называют такую нагрузку, которая многократно прикладывается к металлу, причем скорости возрастания и убывания нагрузки могут быть самые разнообразные.

На все эти виды нагрузки металл реагирует по-разному.

Действительно, как показывает опыт, металлы далеко не одинаково выдерживают однократно приложенные спокойную и ударную нагрузки. Металлические изделия, хорошо сопротивляющиеся спокойно приложенной нагрузке, могут в отдельных случаях разрушаться от действия сравнительно небольшой ударной нагрузки. Кроме того, металлические изделия, хорошо сопротивляющиеся однократно приложенной нагрузке, могут очень быстро разрушаться под действием повторной нагрузки, величина которой значительно меньше той однократной нагрузки, которая вызывает поломку металла.

Принимая во внимание большое значение механических свойств металлов для машиностроения, ниже будут рассмотрены различные показатели прочности и методы их определения. Мы также рассмотрим и способы определения твердости металлов и некоторые технологические пробы, играющие большую роль в оценке металла с точки зрения его обрабатываемости.

1. Испытание на растяжение

а. Диаграмма растяжения. Наиболее распространенным видом испытания механической прочности металлов в условиях действия статических нагрузжений является испытание *на растяжение*. Испыту-

емый образец начинают растягивать со все возрастающей силой и при этом следят за его деформацией. Наиболее наглядно результаты всего испытания можно представить на так называемой *диаграмме растяжения*, вид которой изображен на рис. 255.

Возьмем две взаимноперпендикулярные оси и будем по вертикальной оси в некотором масштабе наносить нагрузку P (кг), а по горизонтальной — удлинение λ (мм).

Начав растяжение и измеряя удлинение образца при все возрастающей нагрузке, мы заметим, что вначале удлинение λ будет увеличиваться пропорционально нагрузке (закон пропорциональности Гука).

Закон пропорциональности сохраняет свою силу до некоторой нагрузки P_p , которая носит название *нагрузки при пределе пропорциональности*. Напряжение, вычисленное по первоначальной площади поперечного сечения образца f_0 ,

$$\sigma_p = \frac{P_p}{f_0},$$

называется *пределом пропорциональности*.

Следовательно, пределом пропорциональности называется то наибольшее напряжение, которое может выдержать данный материал без отклонения от закона пропорциональности.

Нагружение образца до предела пропорциональности вызывает почти исключительно упругую деформацию. Если разгрузить образец с какой-либо нагрузки, не превышающей P_p , то мы отметим или полное отсутствие, или ничтожно малое остаточное удлинение, измеряемое сотыми и даже тысячными долями процента. Поэтому предел пропорциональности очень часто отождествляют с пределом упругости σ_e , считая $\sigma_e = \sigma_p$.

Однако такой взгляд является чрезвычайно ошибочным, ибо каждое из этих значений имеет вполне определенный физический смысл, а кроме того, в целом ряде металлических сплавов эти значения далеко не совпадают и отличаются друг от друга на значительную величину. Поэтому предел пропорциональности не следует смешивать с пределом упругости. Под пределом упругости следует понимать то наибольшее напряжение, которое может выдержать данный металл, обнаруживая при разгрузке остаточную деформацию заранее обусловленной величины. Обычно величину этой остаточной деформации устанавливают равной от 0,001 до 0,030 %.

Повышая нагрузку выше P_p , мы отметим, что прямолинейная зависимость между нагрузкой и удлинением нарушается. Прямая Oa переходит в кривую ab , и при некоторой нагрузке P_s на диаграммах растяжения часто наблюдается площадка bc , указывающая, что металл *растягивается без возрастания нагрузки*. Нагрузку P_s называют нагрузкой при пределе текучести, а соответственное напряжение

$$\sigma_s = \frac{P_s}{f_0}$$

пределом текучести.

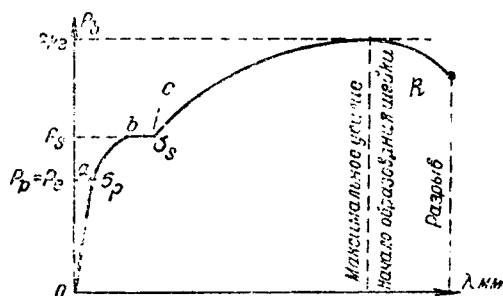


Рис. 255. Диаграмма растяжения с площадкой текучести

Таким образом, пределом текучести называют то напряжение, при котором деформация образца растет при временном постоянстве (или незначительных колебаниях) действующей силы, после чего сила, растягивающая образец, начинает снова плавно увеличиваться.

Не все металлы проявляют на диаграммах растяжения площадку текучести. У некоторых сортов стали и цветных сплавов эта площадка проявляется весьма четко. Иные же растягиваются, не обнару-

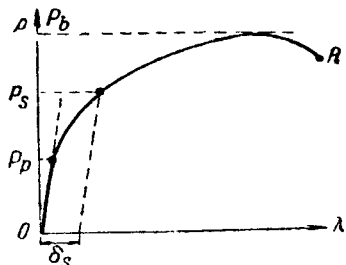


Рис. 256. Диаграмма растяжения без площадки текучести

живая на диаграммах растяжения площадку текучести, как это видно из рис. 256.

Предел текучести, благодаря простоте своего определения, получил весьма широкое распространение в машиностроении как показатель прочности и вытеснил из практики конструкторов такие характеристики, как пределы упругости и пропорциональности. Последние для своего определения требуют очень точных приборов и кропотливой работы, так как приходится измерять очень малые деформации (0,01—0,001 мм), в то время как предел текучести определяется быстро и

с помощью сравнительно простой аппаратуры, поскольку остаточная деформация при пределе текучести сравнительно велика и измеряется десятными долями процента.

Однако, если определение предела текучести по площадке на диаграммах растяжения для тех металлов, которые эту площадку проявляют, не представляет затруднений, то остается открытым вопрос, что же считать за предел текучести для тех металлов, на диаграммах растяжения которых эта площадка не проявляется (рис. 256). Обсуждение этого вопроса привело к тому, что в последнем случае согласились считать пределом текучести то напряжение, которое вызывает остаточное удлинение величиной $\delta_s = 0,2\%$. Конечно, это условность и притом условность, сводящая предел текучести к более «грубому» пределу упругости, который определяется (см. выше) как напряжение, вызывающее остаточную деформацию, величиной в сотые и даже тысячные доли процента. Но эта условность не вызвала практических затруднений и сейчас повсеместно предел текучести при растяжении определяется или по площадке текучести, или же, при отсутствии последней, по остаточной деформации, равной 0,2%.

Для дальнейшего растяжения образца за пределом текучести необходимо вновь продолжить повышение нагрузки. Зависимость между деформацией и нагрузкой и здесь будет следовать кривой линии. Диаграмма растяжения приведет нас к максимальному усилию P_b . Напряжение при этом максимальном усилии опять определяется по первоначальной площади поперечного сечения:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{f_0}$$

и носит название *временного сопротивления разрыву*.

Таким образом временным сопротивлением разрыву называется то напряжение, которое отвечает наибольшему значению усилия растяжения, какое может выдержать образец во время испытания. У некоторых металлов здесь происходит разрыв, у других же образец продолжает удлиняться с уменьшением нагрузки, и разрыв происходит в точке R.

Временное сопротивление разрыву является самым распространенным показателем прочности металлов. Цилиндрический образец растягивается до временного сопротивления разрыву равномерно по всей своей длине. Начиная с временного сопротивления разрыву, деформация сосредоточивается в одном месте. На образцах образуется местное сужение поперечного сечения, так называемая шейка, которая постепенно все более и более сужается, пока не произойдет разрыв.

На рис. 257, а изображен цилиндрический образец до растяжения. Образец, растянутый до напряжения, равного временному сопротивлению разрыву, представлен на рис. 257, б. Он растянулся равномерно по всей своей длине, сохранив цилиндрическую форму. На рис. 257, в представлен разорванный образец; разрыв произошел в участке с местным сужением площади поперечного сечения образца, в так называемой шейке. Те металлы, которые при растяжении разрываются при максимальном усилии, не образуют на образце шейки.

Нагрузка R , при которой происходит разрыв образца, называется *разрывающим усилием*. Эта величина не получила распространения в машиностроении; большее значение имеет временное сопротивление разрыву, так как оно определяет образец при растяжении; кроме того, разрывающее усилие очень сильно меняется от обстановки опыта.

Таким образом можно констатировать, что при испытаниях на растяжение определяются обычно два показателя прочности металла: 1) предел текучести и 2) временное сопротивление разрыву. Предел упругости и предел пропорциональности определяются сравнительно редко.

Но, кроме показателей прочности, при испытаниях на растяжение определяются еще и показатели *пластичности*, характеризующие способность металла деформироваться, не разрушаясь. Этими характеристиками являются: 1) относительное удлинение δ и 2) сжатие поперечного сечения ψ .

Относительное удлинение при разрыве определяется по обмеру первоначальной длины образца l_0 и его длины после разрыва l_1 . Выраженное в процентах, оно определяется равным:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 (\%).$$

Следовательно, относительным удлинением называется отношение приращения длины разорванного образца к первоначальной его длине, выраженное в процентах.

Сжатие поперечного сечения ψ определяется по данным обмера первоначальной площади поперечного сечения образца f_0 и площади поперечного сечения в самом узком месте f_1 , т. е. в шейке, после разрыва образца. В процентах оно определится равным:

$$\psi = \frac{f_0 - f_1}{f_0} \cdot 100 (\%).$$

Следовательно, относительным сжатием поперечного сечения называется отношение уменьшения поперечного сечения разорванного образца к первоначальной площади поперечного сечения, выраженное в процентах.

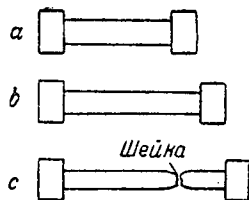


Рис. 257. Разрывной образец в различные моменты испытания

б. Определение сжатия поперечного сечения и относительного удлинения. Размеры образца оказывают весьма существенное влияние на результаты определения величины относительного удлинения. Выше было уже отмечено, что часть металлов при растяжении разрывается без образования шейки, т. е. цилиндрический образец остается цилиндрическим; уменьшается только его диаметр. Для этого случая между δ и ψ существует аналитическая зависимость. Действительно, пренебрегая малым изменением удельного объема металлов при пластической деформации (приращение удельного объема не превышает 0,2%), можно считать, что объем образца при растяжении не меняется. И тогда для случая равномерного удлинения можно написать:

$$f_0 l_0 = f_1 (l_0 + \lambda) = f_1 l_0 (1 + \delta_g),$$

где δ_g — равномерное удлинение, $\lambda = l_1 - l_0$ — приращение длины (мм).

А так как

$$\psi = \frac{f_0 - f_1}{f_0},$$

то

$$\psi = \frac{\delta_g}{1 + \delta_g} \text{ и } \delta_g = \frac{\psi}{1 - \psi}.$$

Обе характеристики пластичности δ_g и ψ для металлов, растягивающихся до разрыва равномерно, без образования шейки, не вызывают сомнения. Иначе обстоит дело при растяжении образцов, которые разрываются с образованием шейки.

Остаточное удлинение таким образом разорвавшегося образца можно рассматривать состоящим из двух слагаемых:

1) остаточного удлинения той части, которая растянута равномерно, $\lambda = \delta_g l_0$;

2) части местного удлинения λ_m .

Для всего образца можно написать:

$$\lambda = \lambda_g + \lambda_m = \delta_g l_0 + \lambda_m$$

и относительное удлинение для этого случая:

$$\delta = \frac{\lambda}{l_0} = \delta_g + \frac{\lambda_m}{l_0}.$$

Этот результат заслуживает внимания, ибо он указывает на то, что для образцов, разрывающихся с образованием шейки, величина относительного удлинения δ зависит от избранной величины расчетной длины l_0 .

Кроме того, исследованиями Баушингера¹ установлено, что величина местного абсолютного удлинения λ_m зависит от величины первоначальной площади поперечного сечения f_0 образца. Он предложил следующую зависимость, которая очень хорошо отвечает опытным данным:

$$\lambda_m = k \sqrt{f_0},$$

где k — коэффициент, характеризующий удлинение металла.

¹ J. Bauschinger, Miff. Mech. Techn. Lab. Hochschule. München, H. 21, 1892.

Подставляя это выражение в предыдущее, имеем окончательно:

$$\delta = \delta_g + \frac{k \sqrt{f_0}}{l_0}.$$

Это выражение показывает, что для получения сравнимых между собой величин δ необходимо, чтобы образцы имели определенное соотношение между расчетной длиной l_0 и площадью поперечного сечения f_0 , или (что то же самое) диаметром d_0 — для цилиндрических образцов.

В СССР распространены два типа образцов, для которых принято:

$$l_0 = 11,3 \sqrt{f_0} = 10 d - \text{нормальный образец,}$$

$$l_0 = 5,65 \sqrt{f_0} = 5 d - \text{укороченный образец.}$$

В других странах, в особенности в Англии, зависимость между длиной и диаметром (площадью поперечного сечения) образцов колеблется еще сильнее, как это легко видеть по данным табл. 27, заимствованной из работы Кунце¹.

Таблица 27

Нормы размеров образцов для испытания на растяжение, принятые в различных странах, и величина относительного удлинения δ , вычисленная при $\psi=75\%$

Страны	Италия	Англия	США Англия Япония	СССР Герма- ния	Франция Бельгия	Англия Япония	СССР Герма- ния
$l_0 : d_0 \dots$	2,5	3,55 3,58	3,96 4,0	5	7,2 7,25	8	10
$\delta\%$	32,9	29,2	27,6	24,8	20,8	19,6	16,0

Следовательно, определяемое из опыта значение относительного удлинения имеет лишь условное значение. Это обстоятельство в очень большой степени дискредитирует эту характеристику пластичности металлов. Некоторые перестали ее включать в технические условия приемки металлов, предлагая характеризовать пластичность металлов лишь сжатием поперечного сечения. Другие предлагали вычислять относительное удлинение при бесконечно малой расчетной длине, используя для этого случая уравнение:

$$\delta_{\max} = \frac{100 \psi}{100 - \psi}.$$

По существу это предложение является вполне рациональным. Во-первых, вычисляемое относительное удлинение является максимальным и, следовательно, оно характеризует максимальную пластичность материала. Характеристика же пластичности нужна машиностроителю для того, чтобы убедиться, насколько свободен металл от всевозможных пороков. Неметаллические включения, дефектность структуры, ликвация и тому подобное в очень большой степени снижают эту характеристику.

Кроме того, характеристика пластичности указывает, насколько данный материал пригоден для целого ряда технологических процессов, как то: вытяжка, штамповка, гибка и т. п. А в этом отношении,

¹ W. Kunze, Arch. Eisenhüttenw., H. 19, стр. 503, 523, 1935—1936.

конечно, наиболее существенным показателем будет максимальное относительное удлинение $\delta_{\max}$, ибо оно позволит лучшим образом установить наиболее экономичную технологию.

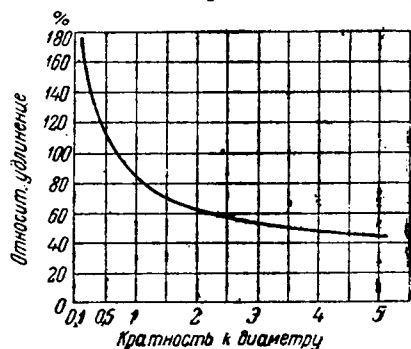


Рис. 258. Зависимость относительного удлинения от кратности образца $x = l_0 : d_0$

На этой характеристике мы еще остановимся ниже при рассмотрении истинной диаграммы растяжения. А сейчас отметим, что условное относительное удлинение еще прочно укоренилось в технических условиях на поставку металла. С этим обстоятельством приходится считаться, и тогда возникает вопрос о зависимости величины этого условного удлинения от величины отношения $l_0 : d_0 = x$, называемого кратностью образца.

На рис. 258 представлена такая зависимость для образца мягкой углеродистой стали. Для значения, например, $x = 0,1$ относительное удлинение равно $\delta_{0,1} = 180\%$, а для $x = 5$ — относительное удлинение равно всего $\delta_5 = 43\%$.

Анализируя подобные кривые, Кунце и Криш предложили следующую зависимость:

$$\delta_x = (\delta_{\max} - \delta_g) a x^{2n} + \delta_g,$$

где a и n — коэффициенты, зависящие от формы образца.

Эта зависимость позволила Кунце составить график и таблицы для практического пересчета относительного удлинения образца одной кратности на другую.

Табл. 28 содержит все необходимые данные для пересчета относительного удлинения с пятикратного образца на десятикратный и обратно. Эта таблица проста и не требует пояснений.

Диаграмма, представленная на рис. 259, позволяет определить относительное удлинение образцов, кратность которых колеблется от $x = 1$ до $x = 10$. Интересующихся способом построения такого графика я отсылаю к оригиналу, а здесь рассмотрим лишь метод пользования таким графиком.

По оси ординат отложена величина:

$$y_g = \frac{100 - \delta_g}{100 - \delta_{\max}},$$

по оси абсцисс — кратность образца x .

Каждая кривая диаграммы построена для определенного значения

$$y_x = \frac{100 + \delta_x}{100 + \delta_{\max}},$$

величина которого указана на кривых (от 0,05 до 0,95).

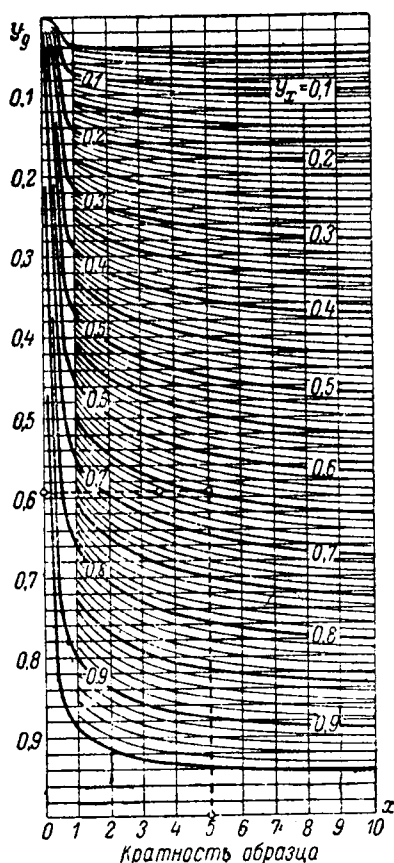


Рис. 259. График для пересчета относительного удлинения образцов различной кратности (Кунце)

Таблица 23

$\psi^{\circ}/6$	δ_s ($^{\circ}/0$) для указанных ψ ($^{\circ}/0$)											
$\delta_{10}^0/0$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	90
1	2,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	3,2	4,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	4,0	5,0	5,5	6,1	—	—	—	—	—	—	—	—
4	4,9	5,9	6,5	7,0	7,5	8,1	—	—	—	—	—	—
5	5,8	6,7	7,3	7,9	8,5	9,2	9,5	—	—	—	—	—
6	6,6	7,6	8,2	8,9	9,5	10,0	10,5	10,9	11,3	—	—	—
7	7,5	8,4	9,2	9,8	10,4	11,0	11,5	11,9	12,3	12,8	—	—
8	8,4	9,3	10,1	10,8	11,4	12,0	12,5	12,9	13,1	13,8	14,3	—
9	9,2	10,2	11,0	11,7	12,3	12,9	13,5	13,9	14,4	14,9	15,3	15,6
10	10,2	11,0	11,8	12,6	13,3	14,0	14,5	15,0	15,4	16,0	16,4	16,7
11	11,0	11,9	12,8	13,6	14,2	14,9	15,5	16,0	16,4	17,0	17,5	17,7
12	—	12,7	13,7	14,5	15,2	15,9	16,5	17,0	17,4	18,1	18,6	18,8
13	—	13,6	14,6	15,4	16,1	16,9	17,5	18,0	18,5	19,1	19,7	19,9
14	—	14,4	15,5	16,4	17,1	17,9	18,5	19,0	19,5	20,1	20,7	20,9
15	—	15,3	16,3	17,3	18,1	18,8	19,5	20,0	20,5	21,2	21,7	22,0
16	—	16,2	17,0	18,2	19,0	19,8	20,5	21,0	21,5	22,2	22,8	23,1
17	—	17,1	18,1	19,1	19,9	20,7	21,5	22,0	22,5	23,3	23,9	24,1
18	—	—	19,0	20,0	20,9	21,7	22,5	23,0	23,5	24,3	24,9	25,2
19	—	—	19,9	20,9	21,8	22,7	23,4	24,0	24,5	25,4	26,0	26,3
20	—	—	20,7	21,8	22,7	23,6	24,3	24,9	25,5	26,4	27,0	27,3
21	—	—	21,6	22,7	23,6	24,5	25,3	25,9	26,5	27,4	28,1	28,4
22	—	—	22,5	23,6	24,5	25,5	26,3	26,9	27,5	28,5	29,1	29,5
23	—	—	23,3	24,5	25,5	26,3	27,3	27,9	28,5	29,5	30,2	30,5
24	—	—	24,2	25,4	26,3	27,3	28,2	28,9	29,5	30,5	31,2	31,6
25	—	—	25,0	26,2	27,2	28,2	29,1	29,9	30,5	31,5	32,2	32,6
26	—	—	—	27,1	28,1	29,1	30,1	30,9	31,5	32,5	33,3	33,7
27	—	—	—	27,9	29,1	30,1	31,1	31,9	32,5	33,5	34,3	34,8
28	—	—	—	28,8	30,0	31,0	32,0	32,8	33,5	34,6	35,4	35,8
29	—	—	—	29,7	30,9	31,9	33,0	33,8	34,5	35,6	36,4	36,9
30	—	—	—	30,5	31,7	32,8	33,8	34,7	35,5	36,6	37,4	37,9
31	—	—	—	31,3	32,7	33,8	34,8	35,7	36,5	37,7	38,5	39,0
32	—	—	—	32,2	33,5	34,7	35,7	36,7	37,5	38,7	39,5	40,1
33	—	—	—	33,0	34,4	35,5	36,7	37,6	38,5	39,7	40,5	41,1
34	—	—	—	—	35,3	36,5	37,6	38,5	39,5	40,7	41,6	42,2
35	—	—	—	—	36,1	37,3	38,5	39,5	40,4	41,7	42,6	43,3
36	—	—	—	—	37,0	38,2	39,4	40,4	41,4	42,7	43,6	44,4
37	—	—	—	—	37,9	39,1	40,3	41,4	42,4	43,7	44,6	45,4
38	—	—	—	—	38,7	40,1	41,3	42,3	43,4	44,7	45,7	46,4
39	—	—	—	—	39,6	40,9	42,2	43,3	44,4	45,7	46,8	47,5
40	—	—	—	—	40,5	41,9	43,1	44,3	45,3	46,8	47,8	48,5
41	—	—	—	—	41,3	42,7	44,1	45,2	46,3	47,8	48,9	49,6
42	—	—	—	—	42,2	43,6	45,0	46,1	47,3	48,8	49,9	50,7
43	—	—	—	—	—	44,5	45,9	47,1	48,2	49,8	50,9	51,7
44	—	—	—	—	—	45,4	46,8	48,0	49,2	50,8	51,9	52,8
45	—	—	—	—	—	46,3	47,7	49,0	50,2	51,8	53,0	53,8
46	—	—	—	—	—	47,2	48,5	49,9	51,1	52,8	54,0	54,9
47	—	—	—	—	—	48,0	49,4	50,8	52,0	53,8	55,0	55,9
48	—	—	—	—	—	48,9	50,4	51,7	53,0	54,8	56,1	57,0
49	—	—	—	—	—	49,7	51,3	52,7	53,9	55,8	57,1	58,1
50	—	—	—	—	—	50,6	52,1	53,6	54,9	56,9	58,2	59,1

Допустим, что дано относительное удлинение $\delta_5 = 26,6\%$ при сжатии поперечного сечения $\psi = 49\%$. Требуется определить $\delta_{3,55}$, т. е. при $x = 3,55$.

Вычисляем максимальное относительное удлинение

$$\delta_{\max} = \frac{100 \psi}{100 - \psi} = \frac{100 \cdot 49}{100 - 49} \cong 96\%.$$

Определяем величину

$$y_5 = \frac{100 + \delta_5}{100 + \delta_{\max}} = \frac{100 + 26,6}{100 + 96} = 0,643.$$

Отметив теперь на абсциссе данные $x = 5$, находим на вертикали точку, лежащую на кривой, для которой $y_x = 0,643$. От этой точки

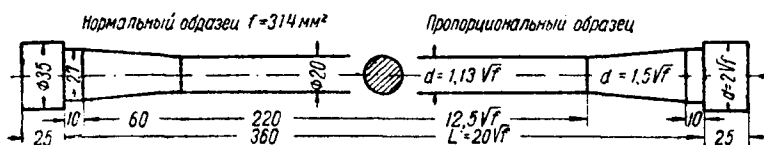


Рис. 260

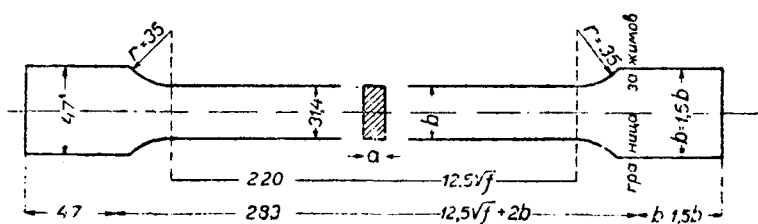


Рис. 261

направляемся по горизонтали влево до значения искомого $x = 3,55$. Теперь остается прочесть величину y_x этой найденной точки, которая для нашего случая равна $y_x = 0,663$. По этой величине определяется искомое относительное удлинение:

$$\delta_x = y_x (100 + \delta_{\max}) - 100 = 0,663 (100 + 96) - 100 \cong 30\%.$$

На рис. 260 и 261 представлены так называемые нормальный (слева) и пропорциональный (справа) образцы. Нормальным цилиндрическим образцом называют образец диаметром $d = 20$ мм и площадью поперечного сечения $f \frac{\pi d^2}{4} = 314$ мм². Такую же площадь имеет и нормальный плоский образец, причем отношение сторон $a:b$ поперечного сечения образца может колебаться от 1:1 до 1:6. Расчетная длина l нормального образца принимается $l = 10 d = 200$ мм. Остальные размеры указаны на чертежах.

Однако не всегда имеется возможность применять при испытании образцы нормального типа. Очень часто от изделия нельзя вырезать столь массивный образец и тогда пользуются пропорциональным образцом (рис. 260, справа), размеры которого определяются в зависимости от расчетной площади поперечного сечения.

Сечение пробного образца может быть круглым, квадратным, призматическим или в исключительных случаях другой формы; не-

большие профильные прутки, трубы и т. п. могут испытываться в целом виде.

Типы образцов для испытаний приводятся в табл. 29.

Таблица 29

Наименование образца	Испытуемая длина l_0	Расчетная длина l , мм	Диаметр d , мм	Сечение образца $мм^2$	Обозначение относительного удлинения после разрыва
Нормальный:					
С головкой { 1) длинный . . . 2) короткий . . .		$10d = 200$ $5d = 100$	20	314 (100π)	δ_{10} δ_5
Пропорциональный:					
С головкой { 3) длинный . . . 4) короткий . . .	$l + d$	$10d = 11,3\sqrt{F_0}$ $5d = 5,63\sqrt{F_0}$	Произвольный	Произвольный	δ_{10} δ_5
Без головки { 5) длинный . . . 6) короткий . . .		200 100	Произвольный	Произвольный	δ_e δ_k

Часть образца — переходная к головкам — в этих нормах не устанавливается, так как форма ее зависит от конструкции испытательной машины.

Пробный брусок с первоначальной расчетной длиной l после разрыва будит иметь расстояние между кернами l_1 . Величина $\delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100$ называется *относительным удлинением*.

При определении удлинения бруска после разрыва путем измерения расстояния между кернами могут получаться ошибки, так как даже при вполне однотипных образцах, изготовленных из одного и

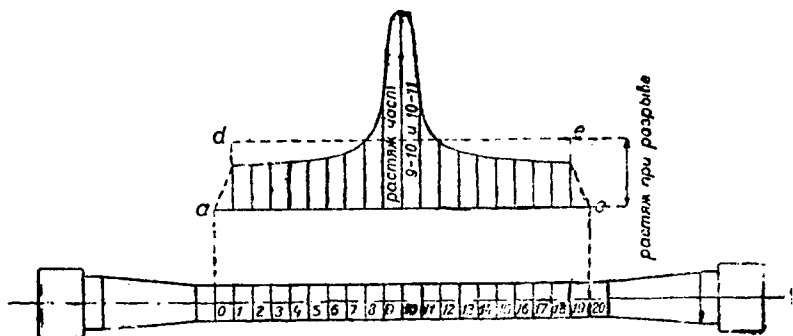


Рис. 262

того же материала, удлинение, определенное таким способом, зависит от того, в каком месте бруска произошел разрыв. Дело в том, что удлинение образца не будет равномерным по всей длине: та часть, в которой образовалась шейка при разрыве, будет вытянута больше, и, начиная с этого места, удлинение отдельных частей образца будет падать по направлению к головкам.

На рис. 262 изображен нормальный круглый образец, на котором нанесены штрихи через каждые 10 мм. Таким образом его расчетная длина разделена на 20 частей. Выше изображена кривая, характери-

зующая удлинение отдельных частей, причем предположено, что разрыв произошел по сечению 10, т. е. в середине образца. Среднее удлинение можно рассматривать как высоту площади $adcc$, равной площади abc .

Легко видеть, что это среднее удлинение зависит от места расположения максимума удлинения, т. е. от места разрыва. Если это место будет смещено вправо или влево, то среднее удлинение уменьшится. В практике же испытания такие случаи встречаются весьма часто, и поставщику материала, конечно, невыгодно измерение удлинения таким способом. Кроме того, такое удлинение не может характеризовать материал, так как значение его случайное и зависит от места разрыва. Поэтому предложен способ определения удлинения материала, учитывающий влияние места разрыва, который основан на том практически допустимом предположении, что деформация происходит симметрично по отношению к месту разрыва.

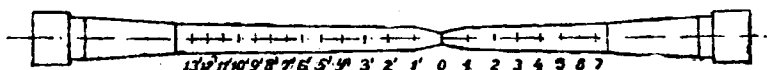


Рис. 263

Предположим, что разрыв произошел в средней трети образца (рис. 263). Деформация частей 0—7 и 0—7' симметрична; часть же 7'—13' получила удлинение меньшее, чем это было бы при разрыве в середине образца, так как удлинение частей 10'—12' меньше удлинения частей 7'—10'. Поэтому удлинение высчитывается следующим образом: измеряют длины 0—10', 0—7' и 7'—10', находят их сумму l ; разность $l' - l$ (где l — первоначальная расчетная длина) даст иско- мое удлинение.

При разрыве широких плоских образцов наблюдается такое явление: волокна начинают разрушаться в середине, а крайние продолжают растягиваться.

В результате, если прижать такой разорванный образец, то средние волокна соприкоснуться не будут, и удлинения, определенные измерением расстояния между кернами и по длине прямой, нанесенной посередине вдоль образца, будут иметь различные значения. В первом случае удлинение будет больше и его собственно следует предпочесть, так как оно характеризует удлинение вполне разорванного образца. Общего взгляда на этот вопрос, однако, еще не установлено.

Как уже упоминалось выше, в месте разрыва в образцах образуется шейка. Степень сжатия поперечного сечения характеризует собой пластичность материала и выражается в процентах относительно первоначальной площади. Обозначив через f первоначальную площадь, через f' — получившуюся площадь в месте разрыва, мы величину сжатия поперечного сечения можем выразить:

$$\psi = \frac{f - f'}{f} \cdot 100.$$

Для круглых стержней величина ψ может быть выражена в зависимости от диаметра:

$$\psi = \frac{\frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4}}{\frac{\pi d^2}{4}} \cdot 100 = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right] 100.$$

в. Временное сопротивление разрыву. Напряжение, соответствующее временному сопротивлению разрыву, высчитывают из наивысшей достигнутой нагрузки B , отнеся ее к единице первоначальной площади, т. е.

$$\sigma_B = \frac{B}{f} \text{ кг/мм}^2 \text{ или } \text{кг/см}^2.$$

г. Определение пределов текучести, упругости и пропорциональности. Предел текучести обычно определяется из диаграммы, ибо все металлические сплавы при растяжении дают более или менее четкий перегиб на кривой при достижении предела текучести. Кроме того, остановка возрастания нагрузки при достижении предела текучести часто может быть определена простым наблюдением за движением стрелки динамометра. Простота определения предела текучести и служит причиной того, что предел текучести в практике определяется чаще, чем предел упругости и пропорциональности. В некоторых случаях определять предел текучести указанными выше способами не удастся, и тогда приходится прибегать к способу остаточного удлинения.

Для этого образец нагружают некоторой нагрузкой, затем нагрузка снимается и определяется удлинение. Для железа и стали нагрузка, давшая 0,2% остаточного удлинения, считается пределом текучести¹.

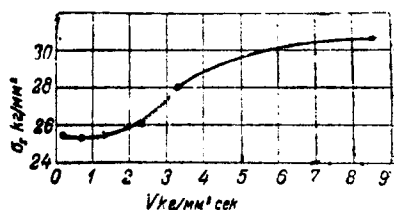


Рис. 264. Влияние скорости растяжения на предел текучести (сталь 30)

Отметим одну особенность предела текучести, которая часто приводит к недоразумениям между поставщиком материала и его потребителем. Эта особенность заключается в том, что предел текучести некоторых материалов довольно чутко реагирует на скорость испытания (растяжения). С увеличением скорости растяжения предел текучести имеет тенденцию к повышению. Иллюстрацией этого явления может служить рис. 264. Предел текучести, определенный в этом случае со скоростью нарастания напряжения, не превышавшей 1,5 кг/мм²/сек, определялся равным 25,5 кг/мм². Более высокие скорости растяжения приводили уже к значительному повышению предела текучести. Так, при скорости растяжения в 8,5 кг/мм²/сек предел текучести определился равным 30,5 кг/мм², т. е. предел текучести повысился, примерно, на 20% по сравнению со скоростью в 1—1,5 кг/мм²/сек. Встречаются металлы, предел текучести которых в еще большей мере изменяется со скоростью растяжения. Причина этого явления до сих пор еще не выяснена. Однако эти опытные данные сигнализируют, что при определении предела текучести необходимо соблюдать некоторое постоянство в условиях испытания. В противном случае машиностроитель, приняв для своих расчетов значение предела текучести, искусственно завышенное на 20—30%, может встретиться с неожиданными авариями своей конструкции.

Сейчас в технические условия на приемку материала все чаще и чаще вносят условие, предложенное Кербером²: определять предел текучести со скоростью возрастания напряжения, не превышающей 1 кг/мм²/сек. К этому следовало бы добавить запрещение устанавли-

¹ В некоторых условиях требуется остаточное удлинение 0,5%.

² F. Körber, Int. Kongress f. Mater., Amsterdam, стр. 38—58, 1927.

вать нагрузку предела текучести по замедлению движения стрелки силомера испытательной машины. Это часто практикуется при работе с такими испытательными машинами, которые не имеют приспособления для автоматической записи диаграммы растяжения. Материалы, обнаруживающие на диаграммах растяжения площадку текучести, вызовут полную остановку стрелки манометра в момент достижения нагрузки, равной пределу текучести. Против такого способа установления предела текучести возражать не приходится. На тех материалах, которые не дают на диаграмме растяжения площадки текучести, момент перехода при растяжении от упругой к пластической деформации определяется замедлением движения стрелки манометра. Совершенно очевидно, что нельзя при этом точно установить

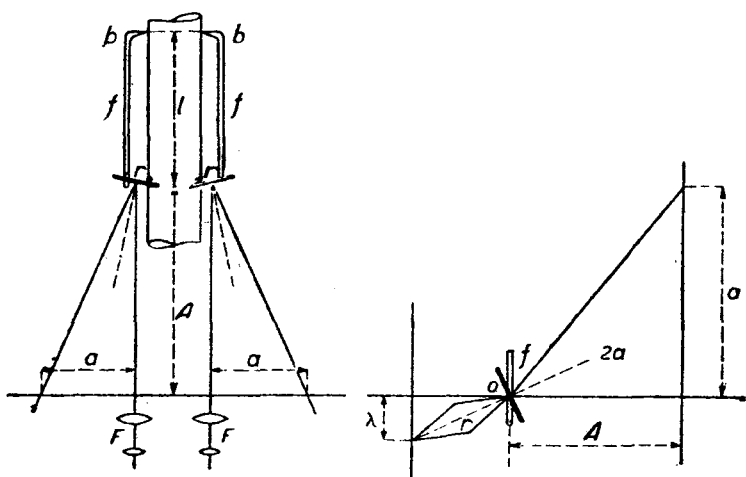


Рис. 265

ту нагрузку, которая обусловит предел текучести. Поэтому рекомендуется в технические условия ввести еще и такое требование: предел текучести устанавливается или по площадке на диаграмме растяжения, или по *полной* остановке стрелки манометра, или, наконец, при отсутствии площадки текучести, как напряжение, вызывающее 0,2% остаточной деформации.

Предел упругости определяется по остаточному удлинению, которое принимается обычно равным в различных технических условиях от 0,03 до 0,001% от первоначальной расчетной длины. Если принять расчетную длину равной 50 мм, то это остаточное удлинение выразится от 0,015 до 0,005 мм. Отсюда видно, что для определения упругих свойств необходимы весьма точные приборы, которые могли бы измерять с достаточной точностью тысячные доли миллиметра. Из таких приборов мы здесь опишем два наиболее распространенных типа — зеркальный прибор Мартенса и экстенсометр Кэмбридж.

Прибор Мартенса (рис. 265) состоит из двух пластин f , которые прикрепляются к испытуемому стержню l . С одного конца пластины f устанавливаются своими заостренными краями в керны стержня l , на другом же конце пластины имеют по стальному ножу шириною r с ромбическим поперечным сечением. К каждому ножу прикреплено зеркальце. Удлинение образца вызывает поворот этих зеркал на некоторый угол α , который измеряется при помощи зрительных тру-

бок F и шкалы, установленных на расстоянии A от оси вращения O зеркал.

Когда нож с зеркалами опишет около точки O угол α , то луч света пробежит угол 2α . Таким образом удлинение λ равно:

$$\lambda = r \sin \alpha$$

и отклонение по шкале:

$$a = A \operatorname{tg} 2\alpha.$$

Отношение этих величин равно:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r \sin \alpha}{A \operatorname{tg} 2\alpha}$$

или, считая при малых углах α

$$\frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} 2\alpha} = \frac{1}{2},$$

имеем:

$$n = \frac{\lambda}{a} = \frac{r}{2A}.$$

Так как работа производится одновременно двумя аппаратами, то из суммы обоих отсчетов a и a_1 получаем среднее:

$$\lambda = \frac{a + a_1}{2} n = (a + a_1) \cdot \frac{r}{4A}.$$

Степень точности, с которой действует зеркальный прибор, зависит преимущественно от двух главных факторов, а именно — необходимо, чтобы величины r и A были измерены с достаточной точностью и чтобы деления масштаба были правильны.

Длину A легко измерить с точностью до 0,05 см. Точность доходит тогда до $\pm \frac{0,05}{A}$ или при $A = 100$ см степень точности $\frac{0,05}{100} = \frac{1}{2000}$.

Дабы получить такую точность и для r , этот радиус необходимо измерить с точностью до $\frac{r}{2000}$ или при $r = 0,4$ см с точностью $0,4 \frac{1}{2000} = \frac{1}{5000}$ см.

Прибор Мартенса, работая с большой точностью, все же несколько громоздок. Более компакты приборы с микрометрическим винтом. Одним из наиболее распространенных типов этого прибора является экстенсометр Кэмбриджа. Схема этого прибора изображена на рис. 266, а общий вид его — на рис. 267.

Прибор состоит из двух частей A и B , которые прикрепляются к испытываемому стержню. Расчетная длина строго определенная. Обе части сочленяются опорами O . На конце части B имеется микрометрический винт, головка которого имеет 100 делений. При растяжении образца на величину λ другие концы частей A и B перемещаются на величину l , которая измеряется микрометрическим винтом.

Если шаг нарезки винта равен 1 мм и головка винта снабжена 100 делениями, то при отношении $\frac{\lambda}{l} = \frac{a}{b} = \frac{1}{10}$ каждое деление го-

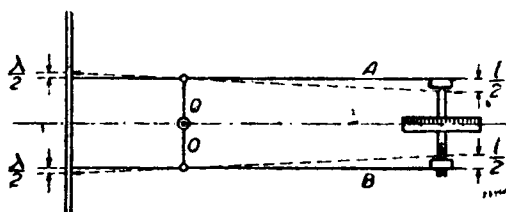


Рис. 266. Схема экстенсометра Кэмбридж

ловки будет соответствовать $\frac{1}{1000}$ мм. С достаточной точностью можно отсчитать $\frac{1}{2}$ деления, т. е. $\frac{5}{10000}$ мм. Если принять расчетную длину $l_0 = 50$ мм, то легко видеть, что этим прибором можно отсчитать удлинение $\frac{100 \cdot 50}{50 \cdot 10000} = 0,001\%$ первоначальной длины.

Для точного измерения l часть снабжена пружинящей пластинкой. Вибрируя этой пластинкой и приподымая или опуская острие винта, легко производить измерения этим прибором.

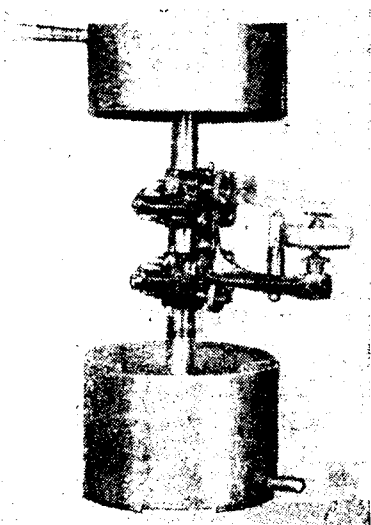


Рис. 267. Общий вид экстенсометра Кэмбридж

Используя эти приборы, определяют предел упругости в следующем порядке. Прежде всего устанавливают величину начального нагружения. С этой величины и начинают отсчет деформации. Казалось, что величина начального нагружения должна бы равняться нулю. Но дело в том, что испытательные машины для нагрузки вблизи нуля обычно не обладают требуемой чувствительностью и точностью показаний. Поэтому испытание по определению предела упругости начинают с начального нагружения, обычно соответствующего напряжению 3—5 кг/мм² для стали и 2—3 кг/мм² для цветных металлов.

Далее устанавливают величину ступени нагружения, т. е. ту величину, на которую последующее нагружение будет больше предыдущего. Величина этой ступени при первоначальных нагружениях должна выбираться так, чтобы она соответствовала повышению напряжения в образце на величину 1—2 кг/мм². При напряжениях, приближающихся к пределу упругости, величину ступени нужно уменьшить. Обычно ее устанавливают равной повышению напряжения на 0,5—1,0 кг/мм².

Опыт ведется в таком порядке: с начального нагружения P_0 доводят нагрузку до $P_1 = P_0 + \Delta P$, где ΔP — ступень нагружения. Выдержав образец при этой нагрузке 10—15 сек., нагрузку уменьшают до P_0 и измеряют остаточную деформацию λ_1 . Далее нагрузку плавно повышают до $P_2 = P_0 + 2\Delta P$ и опять после выдержки в течение 10—15 сек. разгружают образец до P_0 и определяют остаточную деформацию λ_2 . Таким образом поступают до тех пор, пока остаточная деформация λ_n не будет соответствовать (или будет больше) установленной для данной характеристики относительной остаточной деформации, т. е.

$$\frac{\lambda_n}{l_0} \cdot 100 \geq (\text{от } 0,001 \text{ до } 0,030\%) = \delta_e,$$

где l_0 — расчетная длина образца.

Если $\frac{\lambda_n}{l_0} \cdot 100 = \delta_e$, тогда предел упругости равен:

$$\sigma_e = \frac{P_n}{f_0},$$

где f_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца.

Если же

$$\frac{\lambda_{n-1}}{l_0} \cdot 100 < \delta_e \text{ и } \frac{\lambda_n}{l_0} \cdot 100 > \delta_e,$$

то предел упругости лежит в пределах

$$\frac{P_{n-1}}{f_0} < \delta_e < \frac{P_n}{f_0}.$$

Правила для точного установления величины предела упругости в этом случае нет.

Предел пропорциональности определяется аналогично пределу упругости, с той, однако, разницей, что в этом случае нагрузка в течение всего опыта увеличивается на одинаковую величину ступени, и что разгрузка образца с каждой ступени не производится. Приложив к образцу аналогично указанному выше начальную нагрузку, дальнейшее нагружение ведут ступенчато, повышая последова-

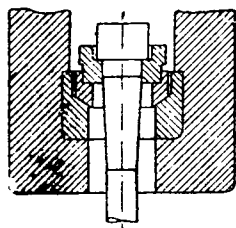


Рис. 268

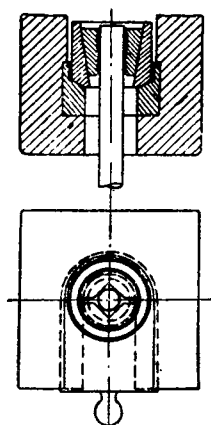


Рис. 269

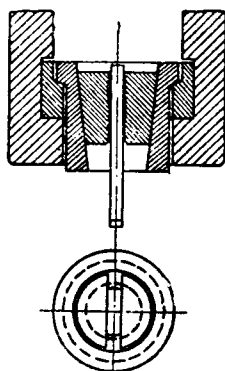


Рис. 270

тельно нагрузку на одну и ту же величину ΔP . При этом измеряется приращение удлинения Δl каждой ступени нагрузки. До тех пор пока не будет превзойден предел пропорциональности, отношение $\Delta P : \Delta l$ будет оставаться постоянным и соответствовать модулю нормальной упругости:

$$\frac{\Delta P : f_0}{\Delta l : l_0} = \text{const} = E.$$

Предел пропорциональности считается достигнутым тогда, когда вышеуказанное отношение, или, что то же самое, модуль упругости E , уменьшится и достигнет заранее установленной величины. Относительное уменьшение модуля нормальной упругости, обуславливающее величину предела пропорциональности, по различным нормам устанавливается в пределах от 10 до 33%.

д. Зажимы. Круглые образцы нормального и пропорционального типа закрепляются так, как это указано на рис. 268. Зажимы должны иметь шаровую поверхность, дабы избежать перекосов в образце при растяжении.

Круглые образцы, не имеющие головки, зажимаются в губки с насечкой (рис. 269).

Плоские образцы или зажимаются в губки, имеющие насечки (рис. 270), или же укрепляются так, как это изображено на рис. 271.

При проектировании зажимов необходимо руководствоваться стремлением избежать перекосов в образцах при их растяжении. Как легко видеть, это требование удовлетворяется тем, что опоре зажима придается шаровая поверхность.

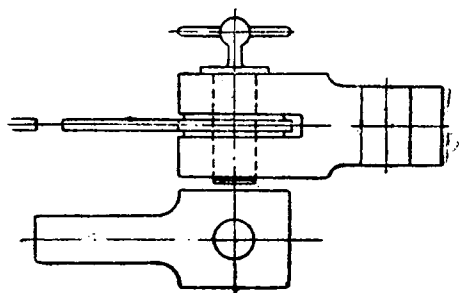


Рис. 271

е. Машины для испытания на растяжение. Испытание металлов на растяжение является одним из наиболее распространенных способов испытания материалов. В связи с этим имеется и целый ряд весьма разнообразных конструкций, служащих для этих испытаний. Мы опишем здесь лишь две конструкции из многочисленного ряда

их: одну — рычажную, системы фирмы Мор и Федергафф (Маннгейм) и другую — гидравлическую, системы фирмы Амслер (Шаффгаузен).

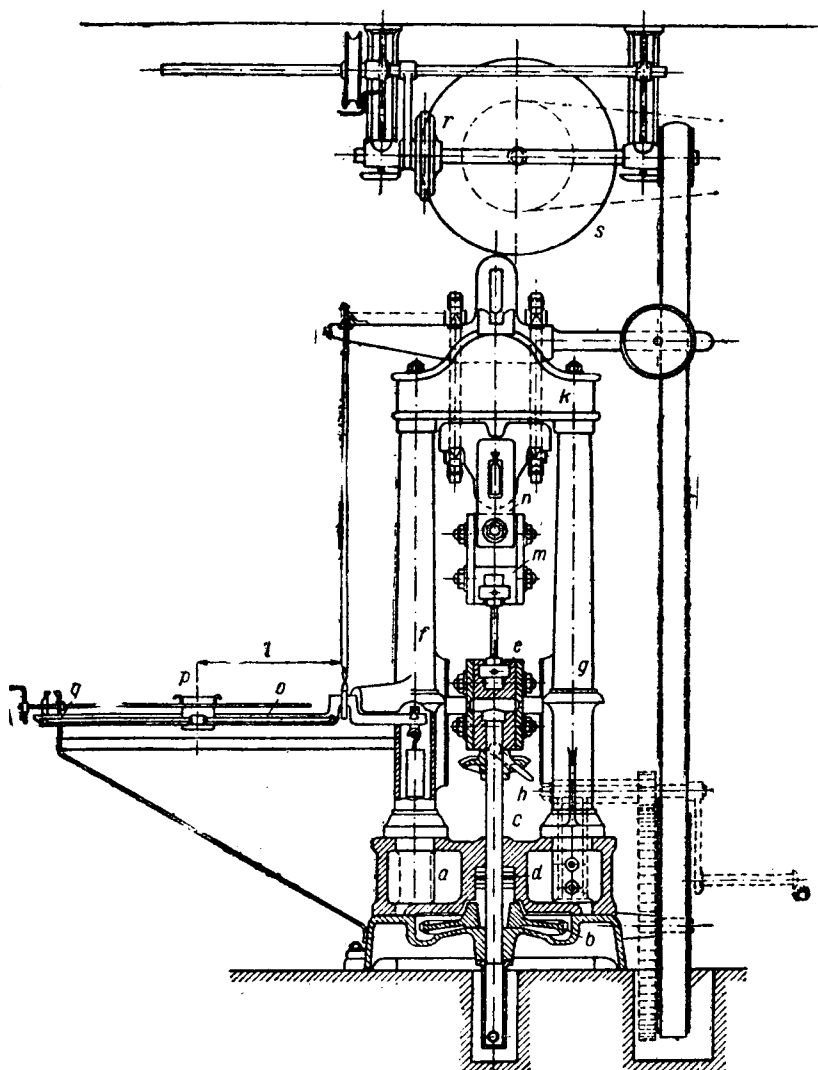


Рис. 272. Разрывная машина Мор и Федергафф

Устройство разрывной машины Мор и Федергафф изображено на рис. 272. При помощи фрикционных колес $r-s$ и ременной передачи приводится во вращение червячное колесо b . Последнее служит гайкой винта c и при своем вращении в зависимости от направления опускает или подымает винт c . Шариковый подшипник d служит опорой. Винт c имеет приспособления e для закрепления образца. Зубчатое скрепление i и h служит для подъема или опускания винта вручную при остановке образцов. На станине a установлены две массивные колонны f и g , на которых установлена перекладина k . Детали $m-n$ являются приспособлениями для верхних зажимов. Силомер в машинах этой конструкции представляет собой рычажные весы, действующие по схеме, изображенной на рис. 273. Равновесие устанавливается передвижным грузом p . Точность работы всей этой конструкции зависит от состояния опорных призм, которые и являются наиболее ответственными деталями силомера. Усилие, испытываемое образцом при растяжении, определяется положением груза p , т. е. расстоянием l . Рычаг q обычно имеет шкалу, по которой и отсчитывается нагрузка.

В новейших системах разрывных машин Мор и Федергаффа передвижение груза p производится автоматически; кроме того имеется приспособление для автоматической записи кривой зависимости нагрузок и удлинения. Однако в этих машинах нагрузка меняется не совсем плавно, а несколько ступенеобразно, почему на таких машинах иногда бывает трудно уловить предел текучести.

Более плавное изменение нагрузки дают машины гидравлические. Типичным представителем испытательных машин этой группы является машина фирмы Амслера. На рис. 274 представлена схема устройства универсальной машины этой фирмы, предназначенной для работы на растяжение, сжатие и изгиб.

Испытуемый образец h захватывается зажимами i и g , из которых g — подвижной. Накачивая масло в цилиндр a , приподымают поршень b , соединенный тягами e с перекладиной f , к которой и прикреплен зажим g . При работе на сжатие или изгиб образец устанавливается на опоры k . Верхней опорой служит опора l . Давление поршня передается на фундамент помощью стоек c . Силомером этой машины служит маятниковый прибор, работающий по схеме, изображенной на рис. 275. Цилиндр машины соединен с цилиндром a прибора. В обоих цилиндрах давление будет одинаковое. Давлением масла поршень b действует на рычаг c и отклоняет маятник d , вес которого G . Угол отклонения маятника d указывает нагрузку испытуемого образца.

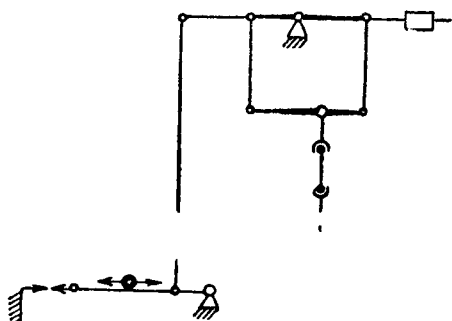


Рис. 273

2. Испытания на сжатие, изгиб, кручение и срез

а. Сжатие. Диаграмма сжатия. Если начать сжимать призматический стержень, то зависимость между сжимающей силой и сокращением его длины изобразится графически в виде кривой, в общих чертах напоминающей кривую растяжения. Предел пропорциональности P лежит там, где линия перестает быть прямой. Предел

текучести F при сжатии или предел сплющивания бывает выражен менее отчетливо, чем при растяжении. Предел раздробления или излома при сжатии выражается отчетливо только для более или менее хрупких материалов (чугун, сталь), в то время как мягкие и пластичные тела, как, например, олово, медь, железо, не могут быть доведены до раздробления, потому что они переносят чрезвычайно большое изменение формы, не показывая при этом ни малейшего признака раздробления.

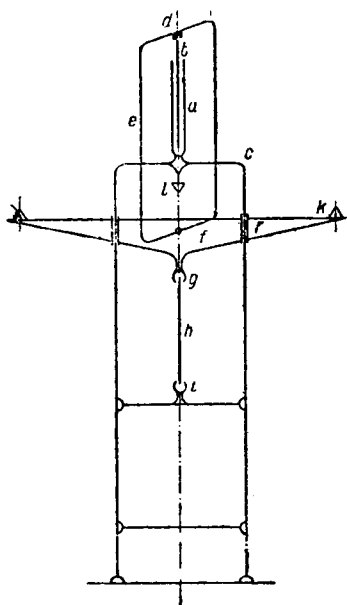


Рис. 274. Схема машины Амслера

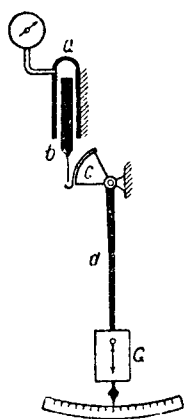


Рис. 275

Форма образца. Форма образца при испытании на сжатие имеет еще большее влияние на результаты испытания, нежели при испытании на растяжение. Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к образцам для испытания на сжатие, является параллельность плоскостей, соприкасающихся с зажимами, и правильное направление действия усилия.

Отношение площади поперечного сечения f к длине образца l влияет не только на результат относительного укорочения образца, но имеет также большое влияние на значение разрушающего усилия.

Нормальным образцом считают образец формы куба, для которого

$$\frac{\sqrt{f}}{l} = 1.$$

Однако в практике испытания весьма часто приходится отказываться от применения таких образцов, особенно в тех случаях, когда необходимо определить упругие свойства материала. Приборы, измеряющие малые деформации, не позволяют пользоваться короткими образцами, и тогда приходится применять образцы, для которых

$$\frac{\sqrt{f}}{l} < 1.$$

Ход испытания. При испытании на сжатие определяются те же величины, что и при испытании на растяжение.

Относительное укорочение здесь выражается также в процентах по отношению к первоначальной длине, т. е.:

$$\delta = \frac{l - l_1}{l} 100 = \frac{\lambda}{l} \cdot 100.$$

Расширение поперечного сечения при сжатии определяют также в процентах относительно величины первоначального сечения, т. е.

$$\psi = \frac{f - f}{f} \cdot 100.$$

Что же касается разрушающего усилия и предела пропорциональности и сплющивания, то его относят к единице площади первоначального поперечного сечения образца.

Зажимы. Выше уже упоминалось, что параллельность сжимающих плоскостей зажимов играет чрезвычайно большую роль при испытании на сжатие. Поэтому зажимы должны быть снабжены шаровыми опорами, которые способствуют правильному распределению

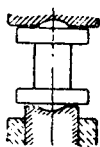


Рис. 276

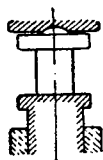


Рис. 277

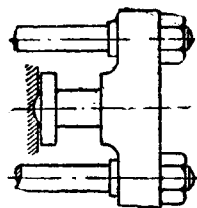


Рис. 278

нагрузки (рис. 276). В случае, если вертикальная машина снабжена лишь одним зажимом, имеющим шаровую опору, то последний должен быть расположен сверху (рис. 277). При горизонтальной машине зажим с шаровой опорой должен быть расположен на неподвижной части машины (рис. 278). Выполнение этих условий способствует более правильной установке образца и распределению усилий.

Машины для испытания на сжатие. Очень часто машины, предназначенные для испытания на растяжение, имеют приспособления, позволяющие производить также испытания и на сжатие (например пресс Амслера, см. ниже). Но кроме того строится целый ряд машин, предназначенных исключительно для испытания на сжатие. Схема работы этих машин аналогична работе разрывных машин, поэтому здесь мы не будем их рассматривать. Остановимся лишь на чрезвычайно интересной машине, которая по точности и по удобству в работе не имеет себе равных — так называемом прессе Гагарина.

Эта машина была предназначена главным образом для сжатия малых образцов, но специальные зажимы позволяют пользоваться ею и как разрывной машиной. Главное достоинство ее заключается в том, что она автоматически зарисовывает диаграммы в таком большом масштабе, что по ним можно с большой точностью определять не только предел текучести, но и предел пропорциональности. На этой машине можно пользоваться весьма малыми образцами, что делает ее незаменимой в тех случаях, когда нельзя выточить большие образцы, а также позволяет проследить равномерность свойства, например, крупной отливки или поковки, испытывая небольшие образцы, взятые из различных мест. Разрывные круглые образцы для прессы

Гагарина имеют диаметр 6 мм, расстояние между головками 30 мм, диаметр головки 12 мм и высоту головки 6 мм.¹

Машина эта еще не получила большого распространения в исследовательских лабораториях, но несомненно, что за ней большая будущность. Ниже приводится описание ее устройства (рис. 279) по Н. Н. Митинскому.²

Сжимаемый образец *В* закладывается между подушками — нижней 4 и верхней 27. Вся машина поддерживается двумя колонками 7 и 7', соединенными поперечинами 31, 28 и 10, причем последняя поперечина имеет выступ для опоры рычага 1 машины. К этому же выступу 10 прикреплена доска 9 стола машины, имеющая опору в третьей колонке 8. Сила, сжимающая образец, вызывается вращением

колеса 29, соединенного с колокообразной отливкой 47, поддерживаемой при ее вращении снизу цилиндрическим суппортом 46, опирающимся на поперечину 28, а сверху направляемой стаканом 50, который наглухо соединен с поперечиной 31. Для уменьшения трения между отливкой 47 и стаканом 50 пятники устроены на шариках.

Отливка 47 имеет внутреннюю винтовую нарезку, в которой ходит нарезанный конец болта 45 с подушкой 27 на его конце. При вращении колеса 29 и отливки 47 болт 45 опускается вниз и сжимает образец *В* между подушками 27 и 4. Чтобы винт 45 вывинчивался, а не вращался вследствие возможного трения вместе с частью 47, на болте 45, вдоль него, сделана борозда,

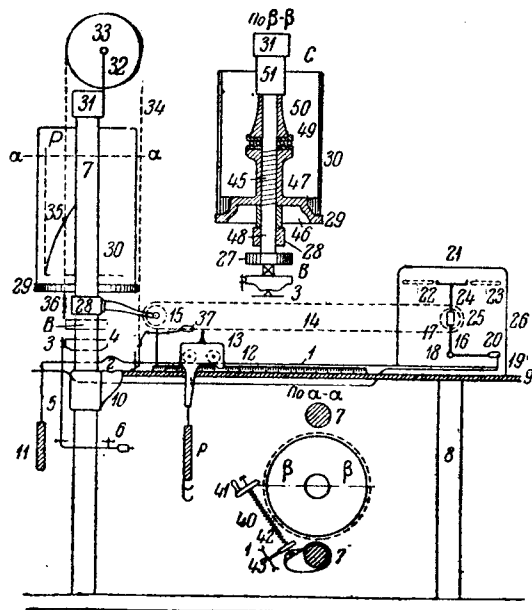


Рис. 279

а в отверстии поперечины 28, через которую он проходит, — соответствующий выступ. Для приведения во вращение колеса 29 служит или червячная передача 40, приводимая в движение ручным маховиком 41, или передача от электромотора (обыкновенно лишь в $\frac{1}{4}$ л. с.) при помощи приводного шнура, соединенного с червячком 43, который вращает зубчатое колесо 42, червячную передачу 40 и, наконец, колесо 29. Червяк 43 особой рукояткой вводится в сцепление с колесом 42 и этой же рукояткой выключается по желанию. Величина сжимающей силы измеряется при помощи рычага 1, который опирается призмой 2 на вышеупомянутый выступ 10; на короткое плечо рычага, на призму 3 опирается подушка 4, принимающая давление образца *В*, нажимаемого верхней подушкой 27. Чтобы подушка 4 не могла повернуться и соскочить с призмы 3, к бокам ее привинчены две эластичные полоски 5, в концах которых ходят винты 6, упирающиеся в колонны 7. Вдоль длинного плеча рычага 1 ходит на роликах тележка 12 с под-

¹ Наиболее распространенный тип; иногда пользуются еще меньшими образцами.

² Н. Н. Митинский, Сопротивление материалов, вып. I, стр. 254—257.

вешенным к ней грузом p . На тележке сделан вырез с индексом, а вдоль рычага 1 нанесены деления; когда индекс показывает нуль, то рычаг 1 должен быть уравновешен весом своих частей и тележки 12, для чего на коротком плече его подвешен противовес 11.

Когда на призму 3 передается некоторое давление P от подушки 4, на которую опирается образец, то рычаг выходит из положения равновесия, и чтобы его уравновесить, необходимо передвинуть тележку с грузом вправо. На делениях вдоль рычага 1 индекс тележки 12 показывает непосредственно величину давления P , соответствующего данному положению груза p . Груз p — переменный и фактически состоит из двух грузов, отличающихся по весу в пять раз; при одной величине груза p каждое деление рычага 1 соответствует приращению нагрузки p на 2 кг от 0 до 1000 кг, при втором грузе — на 10 кг от 0 до 5000 кг.

Передвижение тележки 12 совершается автоматически. К тележке 12 прикреплена ножка 13, соединенная с цепочкой 14, перекинутой через колеса 15 и 16. При вращении колеса 16 в одну или другую сторону цепочка приходит в движение и перемещает тележку 12. Для постоянного уравновешивания рычага 1 при изменении величины давления P на подушку 4 необходимо, чтобы при подъеме длинного конца рычага 1 тележка передвигалась автоматически вправо, а при опускании длинного конца рычага 1 — влево. В коробке 26, стоящей на столе 9, помещены два часовых заводных механизма (на чертеже не показанных), вращение которых совершается в противоположные стороны и которые приводятся в сцепление с колесом 16. При подъеме или опускании длинного конца рычага 1 часовые механизмы вращают его то в одну, то в другую сторону, передвигая соответственно тележку. Для этого длинный конец рычага 1 при посредстве стерженька 19 тянет за стремя 20 коленчатый рычаг 17 вверх или вниз, вращая его около постоянной оси 18, и прижимает тормозное колесо 21 или к легкому маховичку 22 одного часового механизма (при подъеме конца рычага 1 вверх) или к маховичку 23 другого часового механизма (при опускании конца рычага 1 вниз). При этом один механизм затормаживается, а другой работает и колесо 16 вращается то в одну, то в другую сторону, перемещая при опускании длинного конца рычага 1 вниз тележку влево, а при подъеме его вверх — вправо.

Для получения диаграммы к прессу Гагарина приспособлен самопишущий прибор в виде металлического барабана 30, насаженного на отливке 47, на который надевается миллиметровая бумага. Барабан вращается вместе с колесом 29 при опускании винта 45, и поворот его на 1 мм соответствует опусканию подушки 27 на 0,01 мм.

Если пренебречь деформацией металлических частей пресса, то это опускание равно деформации образца, и таким образом можно по величине вращения барабана судить о величине изменения длины образца. Для начертания диаграммы по образующей цилиндра барабана 30 служит карандаш или перо 35, который перемещается вверх и вниз пропорционально движению цепочки 14 соответственно положению тележки 12. Перо висит на шнуре 34 (натянута грузом 36), переброшенном через шкив 33, прикрепленный на ножках 32 к поперечине 31, и, наконец, к звену 37 цепочки 14.

О показаниях пресса Гагарина.¹ Пресс Гагарина служит для испытания образцов растягивающей, сжимающей и изгибающей нагрузками. Этот пресс является наиболее совершенной машиной для механических испытаний материалов, и достоинство его, кроме про-

¹ И. А. Одинг, Изв. ГЭТ, № 12, 1928.

стоты обслуживания и точности показания, заключается в том, что по диаграмме этого пресса можно с достаточной точностью определять не только временное сопротивление разрыву и предел текучести, но и предел пропорциональности, который лучше всего характеризует границу упругих деформаций, а потому имеет весьма большое значение при оценке материала с точки зрения пригодности его для конструкционных целей.

Общая деформация OP (рис. 280), автоматически зарисовываемая прессом, в зависимости от нагрузки представляет собой сумму из: деформации частей самого пресса — $0-2$; деформации испытуемого образца — $0-1$; деформации зажимов — $0-3$.

Последняя не является постоянной величиной; при растяжении, например, она может принять значение, доходящее до значений деформации самого пресса. При испытании на сжатие или изгиб она

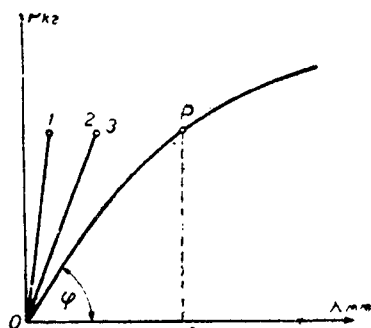


Рис. 280

принимает значение, равное нулю. Поэтому главным образом приходится считаться с первыми деформациями частей пресса и образца, причем в пределах упругих деформаций деформация образца значительно (в несколько раз) меньше упругих деформаций частей пресса.

Диаграмма на прессе Гагарина записывается при совместном движении барабана (вращение) и пера (вертикально вверх или вниз), причем перо получает свое движение от тележки, а последняя от часового механизма, с которым она связана гибкой цепью.

Часовой механизм — весьма маломощный прибор, и тележка может иметь некоторую максимальную скорость v_t . Если же скорость вращения барабана начать увеличивать, то может наступить момент, когда скорость передвижения тележки не будет соответствовать скорости нарастания нагрузки.

На диаграмме Гагарина по оси ординат откладываются усилия P в кг, но с другой стороны эту ось можно рассматривать и как путь S тележки.

По оси абсцисс отложены деформации λ , которые можно рассматривать в масштабе времени t , так как вращение барабана совершается с постоянной скоростью. Тогда наклон прямой OP можно рассматривать с одной стороны как скорость нарастания усилия

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{t} = \frac{PA}{OA}$$

и как скорость передвижения тележки

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{S}{t} = \frac{PA}{OA}.$$

До тех пор пока максимальная возможная скорость тележки будет равна или больше скорости нарастания нагрузки, пресс будет записывать правильную диаграмму. Но лишь только действительная скорость нарастания груза станет больше максимальной скорости тележки, диаграмма покажет неправильные данные.

На рис. 281 представлен такой случай. Машина должна была бы записать кривую OPT , но вследствие того, что скорость тележки была недостаточна, диаграмма получилась в виде кривой OP, T .

Результатом этого обстоятельства явилось неправильное определение предела пропорциональности: вместо значения P на диаграмме он определился выше — в точке P_1 . Таким образом правильное сочетание скорости движения и скорости вращения барабана, которое в конечном итоге и обуславливает действительную скорость нарастания усилия, имеет чрезвычайно большое значение. А так как пресс Гагарина работает вообще весьма медленно, то имеется всегда тенденция **увеличить** скорость вращения барабана, не имея возможности при

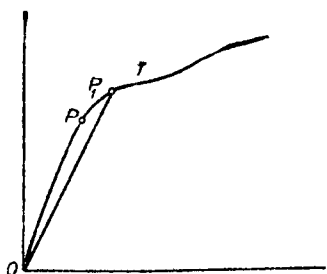


Рис. 281

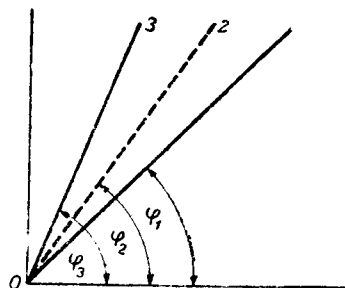


Рис. 282

этом увеличить скорость движения тележки. Результатом этого и получаются неправильные определения предела пропорциональности.

Пусть угол φ_1 характеризует максимальную скорость тележки, которую может показать машина (рис. 282). Пусть далее прямая $0-2$ характеризует деформацию пресса. Сравнивая линии $0-1$ и $0-2$, легко видеть, что при испытании таких материалов, которые в пределах упругих деформаций дают небольшую деформацию (материалы с большим модулем упругости E) на прессе Гагарина, тележка которого передвигается маломощным часовым механизмом, легко получить неправильные результаты, так как истинная кривая может лечь в промежутке между $0-2$ и $0-1$, а пресс запишет кривую по $0-1$ (рис. 282).

Это обстоятельство побудило заменить часовой механизм пресса Гага-

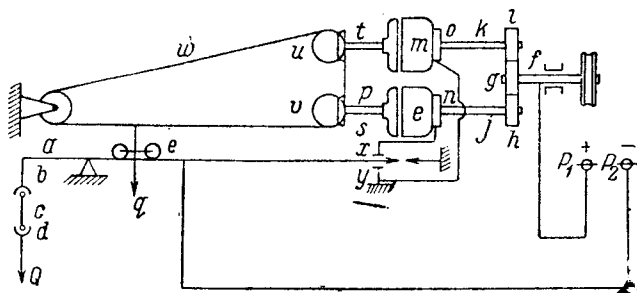


Рис. 283.

рина более мощным прибором, дабы увеличить скорость движения тележки. Схема этого прибора представлена на рис. 283.

На ведущий вал f , который приводится во вращение тем же мотором, что и вся машина, насажена зубчатка g , которая находится в постоянном сцеплении с зубчатками h и i . Зубчатка h насажена на вал j , зубчатка i — на вал k . На валу j закреплена магнитная муфта l , на валу k — такая же муфта m . Против магнитных муфт l и m установлены железные шайбы p и r , которые со шпонкой насажены на валах s и t . Шайбы имеют возможность несколько ($0,2-0,3$ мм) передвигаться вдоль осей. Вращением осей s и t приводятся во вращение шкивы u и v . Шкивы соединены гибкой связью w (например ремень, цепочка), которая в свою очередь соединена с тележкой l .

Один конец обмотки электромагнитных муфт соединен с корпусом механизма, который в свою очередь соединен с полюсом P_2 — элек-

трической сети, вторые же концы выведены на изолированные контактные кольца $п$ и $о$ и подведены к контактам $х$ и $у$. Рычаг $а$ соединен электрически с полюсом P_1 электрической сети.

Из схемы легко видеть, что ведущее звено f вращает электромагнитные муфты l и m в противоположных направлениях (например l по часовой стрелке, а m против, или наоборот). В течение всего испытания муфты вращаются непрерывно. До тех пор пока рычаг $а$ будет в равновесии и не будет касаться контактов $х$ и $у$, ни в одной из электромагнитных муфт тока не будет, и они не притянут шайб p или r и не заставят вращаться валы s и t .

Как только нагрузка Q выведет рычаг $а$ из равновесия, он коснется контакта $х$ и этим замкнет ток через вращающуюся муфту l . Образовавшийся магнитный поток притянет шайбу p , и вращающаяся муфта l приведет во вращение вал s и, стало быть, начнет передвигать тележку до тех пор, пока рычаг $а$ не примет горизонтального положения.

Если рычаг $а$ соединяется с контактом $у$ (например при разгрузке машины и т. п.), то электрический ток пойдет через вращающуюся в противоположном направлении муфту m . Последняя намагнитится, притянет шайбу r , приведет во вращение вал t , передвинет тележку l в обратном направлении.

Таким образом, включая контакт $х$ или $у$, мы включаем ток в одну из электрических муфт и передвигаем этим тележку влево или вправо. Инерция этого механизма ничтожна, так как все детали его весьма легковесны и небольших размеров; поэтому движение тележки силой инерции будет также ничтожно. Скорость же передвижения

тележки можно подобрать такую, чтобы она следовала за действительной скоростью изменения нагрузки. Сила притяжения электромагнитами определяется выбором силы тока.

Общий вид пресса Гагарина с установленным электромагнитным прибором представлен на рис. 284. Ведущее звено электромагнитного прибора приводится во вращение от общего электромотора пресса. Таким образом вопрос о мощности, необходимой для передвижения тележки с грузом, отпадает, так как мощность имеется в избытке. А тогда, следовательно, можно рассчитать скорость передвижения тележки таким образом, чтобы угол φ_3 (рис. 282), характеризующий максимальную скорость тележки, был больше угла φ_2 . В этом случае уже невозможно получить ошибки, указанной на рис. 281, а кроме того можно увеличить скорость работы всего пресса, увеличивая таким образом его производительность.

6. Изгиб, кручение и срез. Изгиб. При испытании металлов пробы на изгиб применяются в весьма ограниченной степени, и в

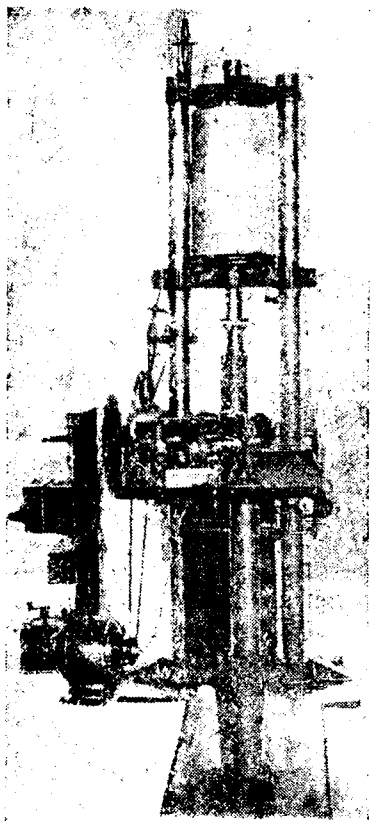


Рис. 284. Пресс Гагарина (общий вид)

этих случаях стараются употребить возможно простой способ. Чаще всего пробный брусок укладывается на двух опорах, и посредине между ними его нагружают силою P . Для этого случая изгибающий момент M будет равен:

$$M = \frac{Pl}{4},$$

где l — расстояние между опорами.

Напряжение же σ в опасном сечении определится, как известно, уравнением:

$$\pm \sigma = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{e}{J},$$

где J — момент инерции поперечного сечения по отношению к нейтральному слою, e — расстояние волокна от нейтрального слоя.

Прогиб f для данного случая выразится уравнением:

$$f = \frac{\alpha}{48} \cdot \frac{Pl^3}{J},$$

где α — коэффициент растяжения.

На практике для испытания на изгиб стараются пробному бруску придать такую простую форму поперечного сечения, чтобы момент инерции его J можно было найти в справочных таблицах.

При испытании определяется изменение прогиба f в зависимости от нагрузки P . Эту зависимость и для данного случая можно изобразить графически подобно тому, как указано выше при испытании на сжатие и растяжение. Кривая получается аналогичной, и на ней опять различают предел пропорциональности P , предел изгиба S и разрушающий груз B .

Для получения результатов испытания на изгиб пользуются уравнением:

$$\sigma = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{e}{J}$$

и по нему определяют σ_p , σ_B и σ_s и соответствующие прогибы f .

Из уравнения для прогиба и найденных величин для f можно вычислить:

$$\alpha = 48 \cdot \frac{Jf}{Pl^3}$$

или, если обозначить отношение $\frac{f}{l}$ как стрелу прогиба,

$$\alpha = 48 \cdot \frac{J}{Pl^3} \cdot \frac{f}{l}.$$

Так как модуль упругости $E = \frac{1}{\alpha}$, то получим:

$$E = \frac{1}{\alpha} = \frac{Pl^3}{48J} \cdot \frac{l}{f}.$$

Кручение. Сопротивление кручению, точно так же как и сопротивление изгибу, при испытании металлов определяется довольно редко. Если же его и производят, то по большей части стараются иметь дело с цилиндрическими предметами, именно — с валами и осями.

При испытании на кручение тело должно быть подвержено лишь одним крутящим напряжениям, т. е. действующие на него внешние силы во всех поперечных сечениях должны создавать лишь одну

пару сил, плоскость действия которой перпендикулярна к оси тела. Побочные воздействия по возможности должны быть исключены.

Выполнение этого условия зависит главным образом от способа закрепления пробного бруска и конструкции захватов. На рис. 285 изображен захват, применяемый преимущественно для литых образ-

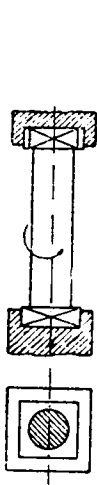


Рис. 285

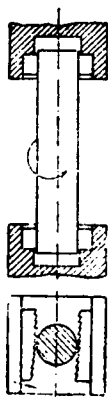


Рис. 286

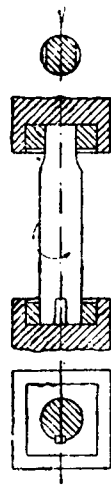


Рис. 287

цов. Головка образца имеет квадратную форму, тело образца — цилиндрическую.

На рис. 286 и 287 изображены способы крепления цилиндрических брусков. В первом случае образец удерживается губками с насечкой, во втором — при помощи шпонки.

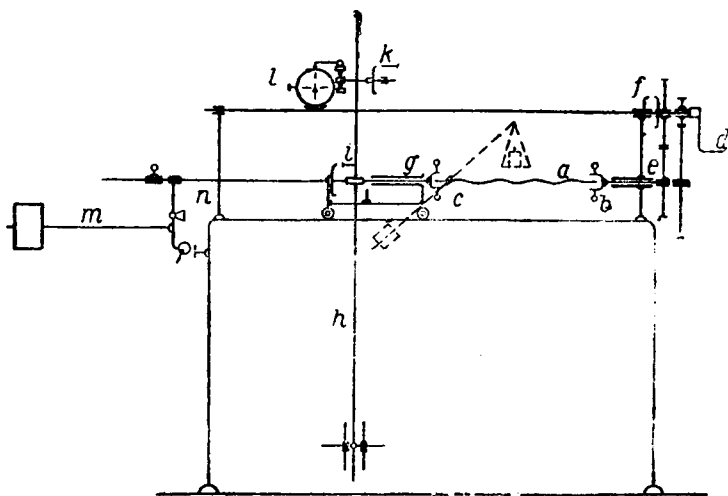


Рис. 288

На рис. 288 представлена схема машины Амслера для испытания на кручение с максимальным крутящим моментом 6 кг/м. Пробный брусок *a* закрепляется в зажимах *b* и *c* и закручивается вращением рукоятки *d*. Полное число оборотов регистрируется счетчиком *e*, дробное же отсчитывается по шкале *f*. Захват с укреплен на оси *g* маят-

ника h . В зависимости от усилия кручения маятник h отклоняется на тот или иной угол, величина которого отсчитывается на шкале i , а также и на шкале k (точный отсчет с нониусом). Деталь I является частью самопишущего прибора. Маятник и самопишущий прибор установлены на тележках, которые могут передвигаться вдоль станины станка. Напруженный рычаг m помощью рычага n втягивает с требуемым усилием испытуемый образец.

При испытании на кручение определяют угол кручения β при ступенеобразном увеличении крутящего момента M_d .

При этом для материалов с модулем сдвига $G = \frac{1}{\beta}$ находят сначала напряжение τ , пропорциональное относительному сдвигу γ , и далее предел пропорциональности, предел текучести и, наконец, временное сопротивление кручению, выраженные в касательных напряжениях τ .

Коэффициент сдвига β определяется из τ и γ на основании уравнения:

$$\beta = \frac{\gamma}{\tau}.$$

Напряжение τ определяется из уравнения:

$$M_d = \tau \frac{J_p}{r},$$

где J_p — полярный момент инерции сечения.

В случае, если поперечное сечение — круг, то:

$$M_d = \tau \frac{J_p}{r} = \tau \frac{\pi}{2} r^3.$$

Относя угол кручения к $r = 1$, т. е. полагая:

$$\varphi = \frac{\gamma}{r},$$

найдем:

$$M_d = \tau \frac{J_p}{r} = \frac{\gamma}{r} \cdot \frac{J_p}{\beta} = \varphi \frac{J_p}{\beta}$$

или для сечения круга:

$$\varphi = \frac{M_d \cdot \beta}{J_p} = \frac{2 \beta \cdot M_d}{\pi \cdot r^4},$$

и таким образом для цилиндра длиной l угол кручения одного концевое поперечного сечения относительно другого:

$$\varphi_l = \frac{2 \beta}{\pi} \cdot \frac{M_d}{r^4} l.$$

Срез. Сопротивление срезу τ_s — это то сопротивление, которое оказывает тело сдвигу своих частиц в какой-либо из плоскостей. Испытание материалов на срез производится, так же как на изгиб и кручение, довольно редко. К тому же произвести испытание среза строго научно представляет собой довольно трудную задачу. Чаще всего это испытание производят по схеме, изображенной на рис. 289, пользуясь при этом захватами, подобными изображенным на рис. 290.

Испытуемый образец m вложен в закаленные стальные кольца n , o , k . Направление действия сил указано стрелками на рис. 289.

Обозначая через f — площадь поперечного сечения бруска и ρ — срезающее усилие, можно для этого случая написать, что напряжение срезывания

$$\tau_0 = \frac{\rho}{2f}.$$

Однако и при таком устройстве зажимов трудно избежать изгибающих напряжений. Точно подсчитать эти добавочные напряжения не представляется возможным. Кроме того, для точного подсчета необходимо также принять во внимание трение на опорах и влияние его на распределение напряжений.

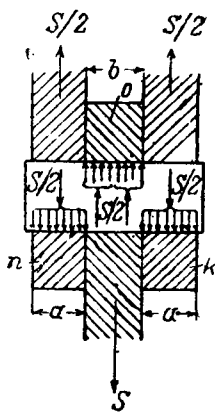


Рис. 289

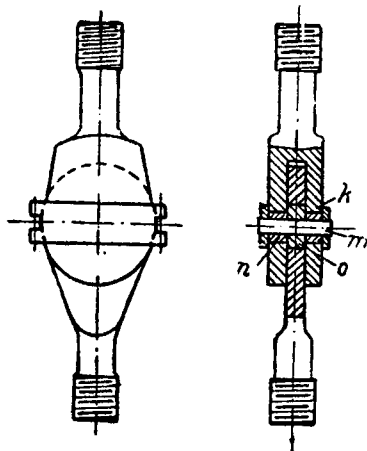


Рис. 290

Если же не принимать во внимание трение и предположить, что силы распределяются равномерно в пределах a и b , то можно для изгибающего момента написать:

$$M_b = \frac{\rho}{2} \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{2} \right) - \frac{\rho}{2} \cdot \frac{b}{4} = \frac{\rho}{4} \left(a + \frac{b}{2} \right).$$

Трудность получения чистого среза и служит причиной того, что этот вид испытания не получает должного распространения. Результаты такого испытания не могут иметь руководящего значения при конструировании и расчете различных деталей, так как цифры напряжений, исправленные даже подсчетом изгибающих усилий, все же не точны, ибо нельзя точно найти значение M_b . Этот момент в некоторых случаях сам вызывает напряжения, превышающие пределы прочности.

в. Величина пластической деформации, обуславливающая предел текучести при сжатии, изгибе и кручении. При испытаниях металлов на сжатие, изгиб и кручение мы так же, как и в случае растяжения, наблюдаем два типа диаграмм напряжение — деформация. В первом типе предел текучести проявляется в виде площадки текучести, и тогда установление величины этой характеристики не вызывает принципиальных затруднений.

Во втором типе площадка текучести отсутствует и предел текучести устанавливается по величине остаточной деформации. В этом случае возникает необходимость в установлении такой величины остаточной деформации и в соблюдении таких условий опыта, которые позволили бы пределы текучести при разных видах напряжений сравни-

вать между собой. Иными словами, пределы текучести при различных видах напряжений должны быть близкими между собой, ибо только в этом случае можно говорить о какой-то единой характеристике прочности металлов.

При растяжении, как указывалось выше, остаточная деформация, обуславливающая предел текучести σ_s , была установлена равной $\delta_s = 0,2\%$. Предел текучести при сжатии σ_{ss} принято определять по такой же величине остаточной деформации

$$\delta_{ss} = 0,2\% = 0,002 \text{ мм/мм},$$

ибо напряженное состояние в обоих случаях одинаково и отличается только знаком действия напряжения. Рекомендуется лишь с целью уменьшения влияния сил трения, которые возникают между поверхностями зажимов машины и торцевыми поверхностями образца, смазывать последние консистентной смазкой и выдерживать высоту образца h равной не менее 2,0—2,5 его диаметра.

При изгибе напряжение распределяется, как известно, неравномерно по площади сечения образца. Растягивающие напряжения, например, от верхних наружных слоев уменьшаются, достигая нуля в нейтральной плоскости, и переходят в сжимающие, достигая максимума в нижних наружных слоях. Поскольку в этом случае материал испытывает в различных частях поперечного сечения напряжения сжатия и растяжения, постольку и предел текучести при изгибе σ'_s может быть определен по допуску остаточной деформации, равной $\delta'_s = 0,2\%$.

Конечно, эту деформацию следует определять на наружных наиболее деформированных слоях. Величину деформации можно определять двумя способами. Наиболее простой состоит в определении изгибающего момента M_s , соответствующего пределу текучести σ'_s по диаграмме изгибающий момент — стрела прогиба (рис. 291). Для этого прежде всего определяют величину стрелы прогиба, соответствующую пределу текучести. Например, для прямоугольной формы образца длиной l и высотой сечения h имеем:

$$f_s = \frac{l^2 \delta'_s}{4h}.$$

Отложив по абсциссе величину f_s и проведя прямую cf_s параллельно прямой Ob , находим точку пересечения c , ордината которой и укажет искомый изгибающий момент M_s .

Теперь уже просто найти и величину предела текучести, зная момент сопротивления:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{w}.$$

Второй способ определения предела текучести при изгибе применяется в том случае, когда при испытании нельзя получить диаграмму изгибающий момент — стрела прогиба. В этом случае экспериментатор должен найти M_s по величине стрелы прогиба f'_s , которую он измеряет после удаления изгибающего момента. В этом случае вели-

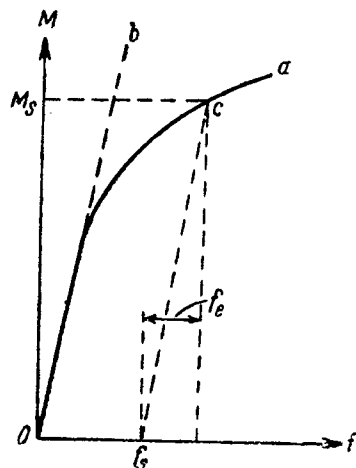


Рис. 291. Диаграмма изгиба

чина f_s уже не равна вышеуказанному f_s , на что было указано Н. Н. Давиденковым.¹

Дело в том, что когда на образец действует изгибающий момент M_s , общее относительное удлинение наружного растянутого слоя будет равно $\delta_e + \delta_s'$, где δ_e — упругое удлинение при пределе упругости. После удаления изгибающего момента остаточное удлинение наружного волокна будет равно не δ_s' , а какой-то меньшей величине, так как в разгруженном образце возникнут остаточные напряжения, укорачивающие пластически растянутые слои и удлиняющие пластически сжатые слои. Обозначая через δ_0 упругую деформацию, снимающуюся при удалении изгибающего момента, и принимая во внимание, что $\delta_0 > \delta_e$, мы измерим величину действительной остаточной деформации в разгруженном образце, равной

$$\delta' = \delta_e + \delta_s' - \delta_0.$$

Для этой величины Н. Н. Давиденков вывел:

$$\delta' = \delta_s' - \frac{\delta_s \delta_e (\delta_e + 0,5 \delta_s')}{(\delta_e - \delta_s')}.$$

Теперь уже можно определить и величину

$$f_s' = \frac{e^2 \delta'}{4 h}.$$

по которой будет установлен M_s .

В этом решении имеется лишь одно неудобство: в поисках величины предела текучести необходимо знать величину деформации при пределе упругости. Фактически последней приходится задаваться и тогда, конечно, теряется точность предложенного метода. Поэтому лучше устанавливать предел текучести при изгибе, используя, как было указано выше, диаграмму $M-f$.

Обратимся теперь к кручению. Деформация при кручении определяется удельным сдвигом

$$\gamma = \frac{2 \pi r z}{l},$$

где r — радиус образца, l — расчетная длина образца, z — число закручиваний, равное частному от деления угла закручивания на 360° .

Людвик², исследуя эффективность остаточных деформаций при кручении и растяжении, пришел к следующей зависимости:

$$\gamma = 2 \ln (1 + \delta).$$

А так как для предела текучести при растяжении принято $\delta_s = 0,002$ мм/мм, то

$$\gamma_s = 2 \delta_s = 0,004 \text{ мм/мм}.$$

Таким образом, допуск остаточной деформации, определяющей предел текучести при кручении t_s' , равен удвоенному допуску, определяющему предел текучести при растяжении.

В отношении метода определения предела текучести при кручении можно рекомендовать тот же метод определения по диаграмме $M-\gamma$, как и в случае изгиба. Если по каким-либо причинам нельзя

¹ Н. Н. Давиденков, Заводская лаборатория, № 3, 1938.

² P. Ludwik, Elemente der technologischen Mechanik, 1909.

построить диаграмму, то и в этом случае можно использовать предложение Давиденкова:

$$\gamma' = \gamma_e + \gamma_s - \gamma_0 = \gamma_s \frac{\gamma_e}{3} \left(1 - \frac{\gamma_e^3}{(\gamma_e - \gamma_s)^3} \right)$$

и по этой величине найти искомый остающийся угол закручивания

$$\varphi' = \frac{\gamma' l}{r},$$

который определит крутящий момент при пределе текучести. И в этом случае точное решение требует предварительного кропотливого определения упругой деформации γ_e при пределе упругости.

3. Испытание динамической нагрузкой

а. Растяжение и сжатие. Как показала практика, испытание материалов статической нагрузкой не является всегда вполне показательной пробой, характеризующей материал с точки зрения его будущей службы. Зарегистрирована масса случаев поломки изделий, материал которых при испытании давал вполне удовлетворительные результаты.

Весьма часты случаи, когда материал подвергается очень быстро возникающим напряжениям и даже ударам. Испытание материала, предназначенного для такого рода службы, статической нагрузкой не будет полностью характеризовать его, так как большей частью отношение материала к спокойным и мгновенным, динамически действующим нагрузкам весьма различно. Поэтому уже давно при приемке целый ряд материалов подвергался еще и ударным испытаниям. Эти испытания одно время были заброшены, но в настоящее время опять начинают применяться все чаще и чаще.

Испытание динамической нагрузкой на растяжение в практике применяется мало и при приемке материалов им пользуются в очень редких случаях. И в исследовательских работах этот способ не получил широкого применения, так как трудно сконструировать машину (копер) для испытаний на разрыв таким образом, чтобы часть работы, действительно передаваемой испытываемому бруску, могла быть определена вполне правильно. Нельзя заставить удар действовать непосредственно на испытываемый брусок; необходимы вспомогательные части конструкции, которые, с одной стороны, связывают пробный брусок с наковальней, а с другой — принимают удар бабы и передают его бруску.

Наиболее удачно разрешил эту задачу Н. Н. Давиденков¹. Предложенная им схема устройства изображена на рис. 292. Образец закреплен одним концом в верхней бабе p , а другим — в нижней бабе P . При ударе верхняя баба ложится на крешеры k , представляющие собой калиброванные брусочки из красной меди, железа и т. п. материала. Эти крешеры, с одной стороны, несколько смягчают удар, что является несомненным минусом такого устройства, но, с другой стороны, уменьшается влияние действия «взлета» верхней бабы, которое трудно учесть и которое весьма сильно искажает конечные результаты испытания.

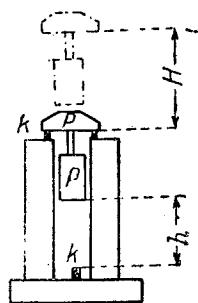


Рис. 292

¹ Н. Н. Давиденков, Динамические испытания металла, ГИЗ, 1929.

Действием падающей нижней бабы P образец разрывается, а деформация нижнего калиброванного крешера k учитывает неизрасходованную работу нижней бабы. Работа, затраченная на разрыв образца, будет равна:

$$T = P(H + h) + pH - N_1 - N_2,$$

где p — вес верхней бабы, P — вес нижней бабы, H — высота падения верхней бабы, $H + h$ — высота падения нижней бабы, N_1 и N_2 — работы деформации верхних и нижних крешеров.

Значительно проще производить испытание материалов динамической нагрузкой на сжатие. В этом случае пропадают промежуточные звенья механизма, и удар падающей бабы воспринимается полностью испытываемым образцом.

Следует отметить, что при статическом испытании измерялась сила, произведшая ту или иную деформацию; при испытании же динамическом измеряется работа (сила $\times$ путь), деформирующая или разрушающая материал.

Обозначив вес падающей бабы G и высоту h , можно определить работу удара:

$$A = Gh \text{ (кгсм)}.$$

Относя эту работу на единицу веса или объема, найдем удельную работу удара:

$$a = \frac{Gh}{V} \left(\frac{\text{кгсм}}{\text{см}^3} \right),$$

$$a' = \frac{Gh}{p} \left(\frac{\text{кгсм}}{z} \right),$$

где V — объем испытываемого тела в см^3 , p — вес испытываемого тела в граммах.

Если тело подвергалось нескольким ударам, то работа удара выразится:

$$A = n(Gh),$$

где n — число ударов, или если удары были не равны:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n.$$

Каждый удар производит сокращение длины образца на некоторую величину λ . Отношение этой длины λ к первоначальной длине l , выраженное в процентах, составит относительное укорочение, т. е.

$$\delta = \frac{\lambda}{l} \cdot 100\%.$$

При испытании несколькими ударами деформация выразится суммой отдельных деформаций, тогда

$$\delta = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}{l} \cdot 100\%.$$

Следует различать результаты ударных испытаний, произведенных одним ударом, от испытаний несколькими ударами.

Предположим, например, что два совершенно одинаковые материала испытываются ударом на вполне определенную работу A с той лишь разницей, что первый образец воспринимает работу A одним ударом, а второй — несколькими. При таком испытании первый образец покажет большую деформацию, нежели второй, и это явление объясняется следующим обстоятельством. Работа удара должна

преодолеть первоначально упругие деформации и затем перейти в область пластичных деформаций. При одном ударе работа, затраченная на преодоление упругих деформаций, будет меньше, нежели при нескольких ударах, так как эта затрата производится при каждом ударе. Отсюда, как следствие, вытекает, что на остаточные деформации в первом случае идет больше работы, чем во втором.

б. Изгиб. Из всех видов испытаний материалов динамической нагрузкой наибольшее распространение получил изгиб благодаря простоте производства испытания и точности результатов. Распространению этого метода очень много способствовал Шарпи, создав маятниковый копер весьма упрощенной конструкции. Этот прибор разрушает образец одним ударом, и работа, потраченная на разрушение, учитывается довольно точно.

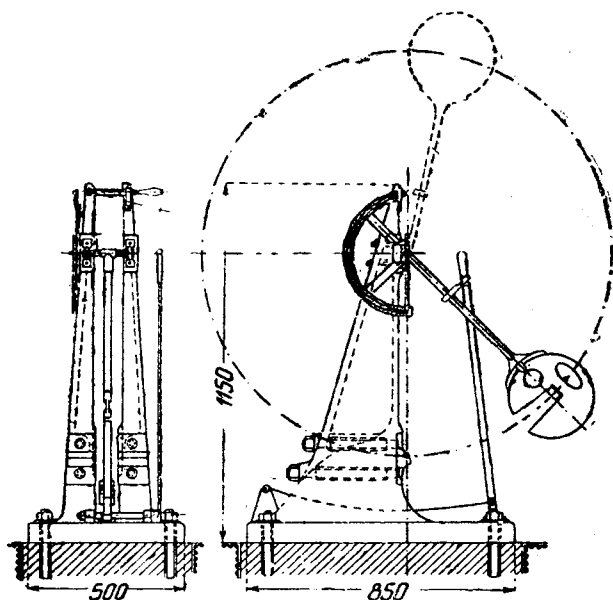


Рис. 293. Копер Шарпи

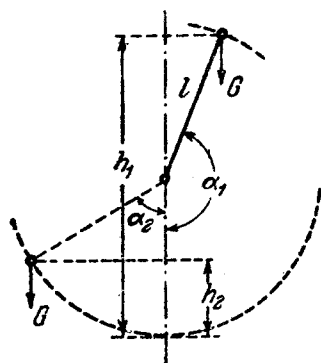


Рис. 294

На рис. 293 представлен маятниковый копер на 10 кгм. Схема работы такого копра изображена на рис. 294. Подсчет работы, затраченной на разрушение образца, производится следующим образом.

Запас работы маятника весом G в приподнятом положении на высоте h_1 равен:

$$A_1 = Gh_1.$$

где

$$h_1 = l [1 + \cos (180 - \alpha_1)].$$

При ударе часть работы пойдет на разрушение образца, оставшаяся же часть израсходуется на подъем маятника на высоту h_2 , и эта работа равна:

$$A_2 = Gh_2,$$

где

$$h_2 = l (1 - \cos \alpha_2).$$

Работа, потраченная на разрушение образца, определится как разность:

$$A = A_1 - A_2 = G(h_1 - h_2) = Gl [\cos (180 - \alpha_1) + \cos \alpha_2] \text{ кгм.}$$

Нужно отметить, что значение l представляет собой расстояние от оси качания до центра тяжести маятника и что это расстояние не равно расстоянию L от оси качания до точки соприкосновения ножа маятника с образцом. Последняя точка лежит обычно ниже центра тяжести и является центром удара. Если точка соприкосновения ножа маятника с образцом совпадает с центром удара, то этим самым ось маятника и подшипники, в которых она качается, предохранены от удара при изломе образца. Требуемое расстояние L можно очень легко определить. Для этого нужно взвесить маятник со штангой, а затем такой же груз подвесить на шнуре и подобрать длину получившегося математического маятника таким образом, чтобы его период качания стал равным периоду качания исследуемого (физического) маятника. Длина математического маятника и будет равна длине L — расстоянию центра удара до оси качания.

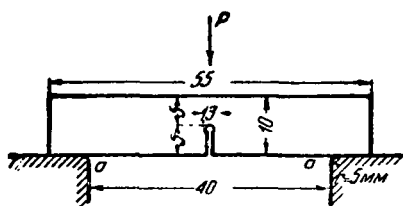


Рис. 295

Образец устанавливается на копре так, как указано на рис. 295, образуя балку на двух опорах. Удар приходится посредине образца (направление указано стрелкой P). Необходимо следить, чтобы образец плотно прилегал к поверхности опоры.

Подобные копры изготовляются различной мощности. Наиболее распространенными являются копры на 250, 75, 25 и 10 кгм, в особенности — последние два типа. В зависимости от мощности копра изготавливается и соответствующего типа образец.

Образцы для испытания. Образцы для испытания на удар в данное время применяются исключительно с прорезью. Форма прорези долгое время не могла установиться, да и сейчас еще существует большое количество типов применяемых прорезей, а вместе с ними и типов образцов.¹ На рис. 295 представлен наиболее распространенный образец, так называемый малый образец Шарпи. Прорезь получается сверловкой образца и последующей затем надпиловкой. На рис. 296 представлены другие типы образцов, также имеющие большое распространение. Из них ясно, что расстояние между опорами меняется от 120 до 40 мм; форма прорези изготавливается круглой, прямоугольной и заостренной. Величина образца и форма прорези имеют, конечно, чрезвычайно большое влияние на результаты испытания, и данные, полученные при испытании различных образцов, не могут быть сравниваемы друг с другом. Поэтому крайне необходимо остановиться на одном каком-либо типе образцов, дабы результаты испытаний различных лабораторий можно было сравнивать между собой.

При выборе такого нормального типа образца нужно прежде всего исходить из существующих в лаборатории машин. Большие копры на 250 и 75 кгм сейчас уже почти не применяются. Наибольшим распространением пользуются копры в 10 и 25 кгм максимальной работы. Поэтому и большие типы образцов, изображенные на рис. 296, следовало бы отбросить.

Затем большое удобство при испытаниях представляют небольшие размеры образцов. Это условие позволяет брать пробы на удар и в том случае, если в распоряжении имеется небольшое количество материала. С этой точки зрения следует предпочесть те образцы,

¹ См. например, P. Fischer. Stahl u. Eisen, стр. 541, 1928.

которые имеют меньшую длину, следовательно, образцы с расстоянием между опорами в 40 мм.

Что касается формы прорези, то следует остановиться на такой форме, которая гарантировала бы легкое и точное изготовление. В этом отношении малые образцы Шарпи и образцы Менаже имеют большое преимущество перед образцами с прямоугольной или острой

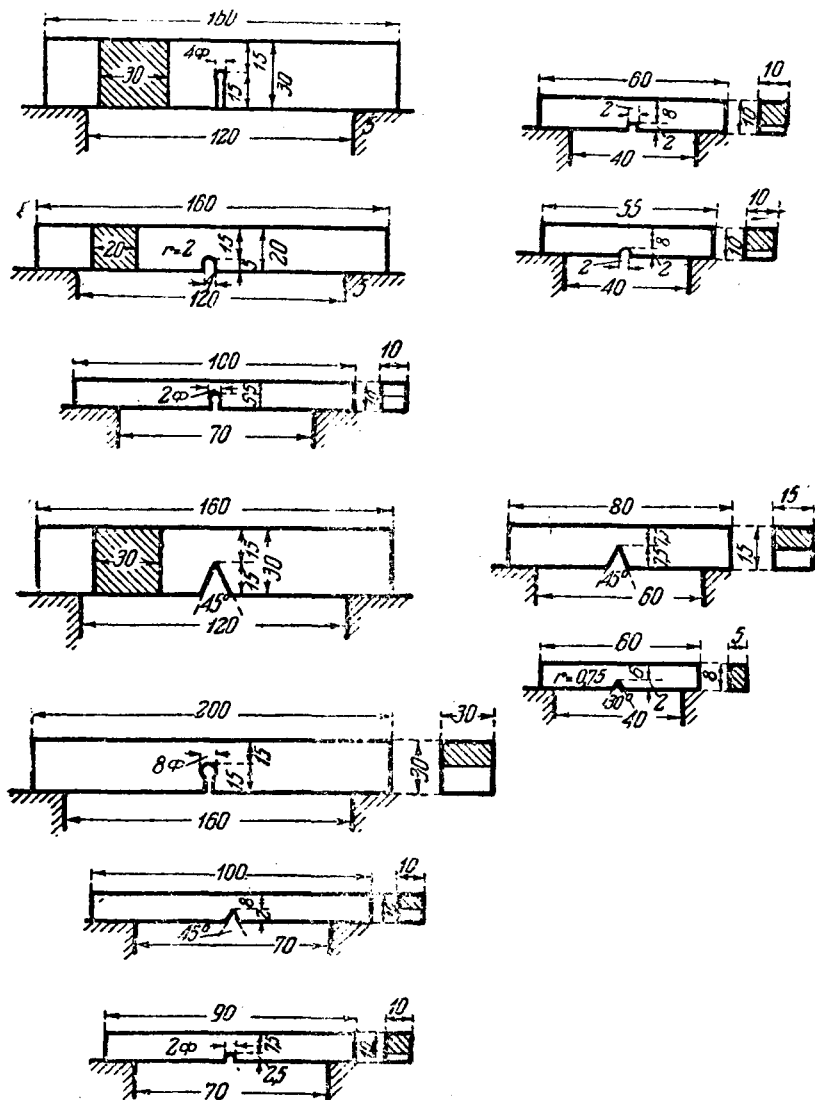


Рис. 296

прорезью. В последних состоянии режущих кромок инструмента, при помощи которых вырезают прорезы, будет, конечно, играть решающую роль. Притупленный инструмент будет изменять радиус закругления прореза, а это обстоятельство повлияет на результат испытания.

Значительно проще изготовление круглых прорезей с большим радиусом закругления. Образцы Шарпи и Менаже снабжаются прорезью при помощи сверла или специальной фрезы (образцы Менаже). Благодаря большому радиусу закругления небольшие отступле-

ния от нормальных размеров прорези не повлияют столь сильно на конечный результат испытания. Кроме того, эти отступления легко определяются, как и состояние поверхности прорези.

Сравнивая, наконец, между собою образцы Шарпи и Менаже, нужно отдать предпочтение последнему и вот по каким соображениям. Для изготовления каждого из этих образцов нужно иметь одно и то же количество материала. Но в образце Шарпи, снабженном более глубокой прорезью, затраченный материал используется в значительно меньшей степени, чем в образце Менаже, глубина прорези которого равна всего лишь 2 мм. А это обстоятельство имеет большое значение, так как более полное использование образца при испытании позволяет получить более характерные результаты. Вот почему образец Менаже получает все большее и большее распространение.

Работу A кгм, затраченную на разрушение образца, делят на площадь сечения образца S см². Таким образом получается значение работы a , кгм/см², т. е. работы, приходящейся на 1 см² сечения образца.

$$a_1 = \frac{\text{кгм}}{\text{см}^2} = \frac{A \text{ кгм}}{S \text{ см}^2}.$$

М. Мозер¹ выдвинул иные идеи для характеристики материала с точки зрения его динамической хрупкости. Этот автор считает, что значение ударной работы является произведением из: 1) числа единиц того объема материала, который воспринимает всю работу удара, и 2) значения работы, воспринятой одной единицей объема, т. е.

$$a = \frac{\text{кгм}}{\text{см}^3} = \frac{A \text{ кгм}}{v \text{ см}^3}.$$

Значение работы, воспринимаемой одной единицей объема, является для данного материала постоянной величиной и не зависит ни от формы испытуемого образца, ни от скорости удара. Оно зависит лишь от природы материала. Это значение называется *рабочей константой*. Число же единиц объема образца, воспринимающих работу удара, так называемый *рабочий объем*, зависит не только от природы материала, но и от формы образца и от скорости удара. Этот объем определяется границей выступающих на поверхности образца фигур истечения. Каждому размеру образца и надреза в нем отвечает свой наибольший объем, который легко вычисляется по деформационным линиям, появляющимся на поверхности разломанного образца.

В зависимости от формы образца и скорости удара, а также и от природы материала, испытуемый образец может или быстро деформироваться, быстро изменяя свою форму, или же сравнительно медленно. Скорость, с которой металл изменяет свою форму при ударе, называется *рабочей скоростью*. Чем больше рабочая скорость, тем больший объем воспринимает работу удара и тем больше потребуются работы для разрушения образца. Таким образом *работа удара определяется рабочей константой и рабочей скоростью*. Рабочая константа a вычисляется, как уже указано, из ударной работы A и рабочего объема v . Для определения рабочей скорости прежде всего можно сделать постоянной скорость удара, так как она влияет на значение рабочей скорости. Это условие выполнено, например, на копке Шарпи. Далее нужно приготовить из каждого сорта стали по два образца, один сечением по месту надреза $S' = 15 \times 15$ мм, дру-

¹ Stahl u. Eisen, № 29, стр. 935—946, 1923.

гой более широкий $S'' = 30 \times 15$ мм. При диаметре цилиндрического надреза в 4 мм рабочий объем первого равен:

$$v' = 6,3 \text{ см}^3,$$

и второго:

$$v'' = 12,5 \text{ см}^3.$$

Допустим, что сталь А дала работу удара:

для I образца $A' = 32$ кгм,

тогда:

$$a' = \frac{32}{6,3} = 5,2 \text{ кгм/см}^3;$$

для II образца $A'' = 62,5$ кгм

и

$$a'' = \frac{62,5}{12,5} = 5,0 \text{ кгм/см}^3$$

и степень рабочей скорости:

$$\frac{a''}{a'} \cdot 100 = \frac{5,0}{5,2} \cdot 100 = 96\%,$$

т. е. сталь имеет низкую рабочую константу и высокую рабочую скорость.

Примем для стали В:

$$\begin{array}{l} A' = 80 \text{ кгм} \\ A'' = 100 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} a' = \frac{80}{6,3} = 12,7 \text{ кгм/см}^3 \\ a'' = \frac{100}{12,5} = 8,0 \end{array} \right. \quad \left| \frac{a''}{a'} \cdot 100 = \frac{8,0}{12,7} \cdot 100 = 63\%, \right.$$

т. е. сталь имеет высокую рабочую константу и низкую рабочую скорость.

Возможны, конечно, случаи, когда обе эти величины имеют высокое или низкое значение. В зависимости от условия службы изделия материал последнего должен иметь высокое значение той или иной величины. Лучше, конечно, если материал обладает высокими значениями рабочей константы и скорости одновременно, однако могут встретиться случаи, когда по экономическим соображениям лучше предпочесть сталь с удовлетворительным значением лишь одной из величин. Которая из величин должна иметь большее значение — укажет характер службы детали. Например, для железнодорожных осей необходимо иметь высокую рабочую скорость, рабочая же константа может быть и мала. Для котельных листов необходимо иметь высокое значение рабочей константы, допуская пониженные цифры для рабочей скорости, и т. д.

Испытание на удар все чаще начинают производить при низкой температуре. Для этой цели изготовляют из испытуемого металла несколько десятков образцов типа Менаже, Шарпи или образцов без надреза и определяют их ударную вязкость при различной температуре, начиная от комнатной и кончая температурой жидкого воздуха, кислорода и т. п. Для замораживания образцов служат или специальные холодильные установки, или холодильные смеси, твердая углекислота, жидкий воздух и т. д.

При этом испытании определяется температурный интервал хрупкости, т. е. тот температурный интервал или та температура, при которой образец резко уменьшает свою ударную вязкость, переходя в хрупкое состояние.

Такое испытание имеет большое значение для тех деталей конструкций, которые должны служить при низких температурах.

4. Испытание на усталость

В описанных выше способах испытания образец большей частью нагружался до разрушения, причем нагрузка или прикладывалась мгновенно или же плавно увеличивалась до явного разрушения испытуемого образца.

В конструкциях детали рассчитываются таким образом, чтобы ни одна часть материала не испытывала напряжений, превышающих предел пропорциональности, и казалось бы, что таким образом рассчитанная деталь должна служить без поломок весьма большой промежуток времени. Однако в практике весьма часты поломки правильно рассчитанных деталей, материал которых не обнаруживает круп-

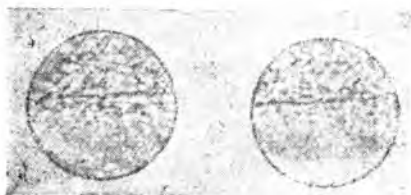


Рис. 297

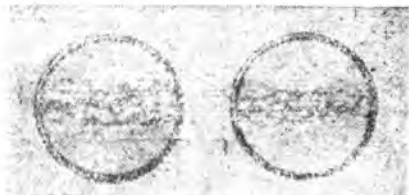


Рис. 298

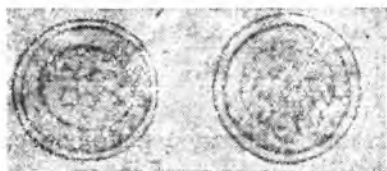


Рис. 299

ных дефектов, и причину таких поломок объясняют усталостью материала.

Нагрузка, вызывающая усталость материала, лежит часто ниже предела упругости и изменяется от нуля до некоторого максимального значения или же от — максимума до + максимума. Знакопеременная нагрузка

оказывает особо большое влияние на усталость материала и поэтому считается наиболее опасной. Частота перемен может быть самой разнообразной, в зависимости от характера службы детали, начиная с весьма небольшой частоты и кончая многими тысячами колебаний в минуту.

Можно привести много примеров разрушения машин, причиной поломки деталей которых служило явление усталости материала. Вполне понятны поэтому стремления целого ряда исследователей выработать метод испытания материалов на усталость. Пионером в этой области следует считать Велера¹, вслед за которым испытанием материалов на усталость начали заниматься Баушингер, Шпангенберг² и др.

Число работ, произведенных в этой области, чрезвычайно велико, но, ввиду сложности такого испытания и необходимости учитывать ряд факторов, влияющих на результаты его, до сих пор не выработался единый нормализованный метод. Однако последние работы в этой области, произведенные в Европе и в Америке, дали чрезвычайно богатый материал для характеристики металлов в отношении усталости, и введение этого рода испытаний в практику приемочных испытаний уже становится в порядок дня.

¹ Zeitschr. f. Bauwesen, S. 583, 1860; S. 233, 1863; S. 67, 1866; S. 3, 1870.

² До Велера вопросом об усталости материалов занимались Альберт (1829) и Ходжкинсон (1847), однако их работы не носили столь систематического и обширного характера, как работы Велера.

Излом, вызванный усталостью, не сопровождается такими же деформациями, как обычный излом, например от изгибающей или разрывающей силы. Картина излома от усталости весьма напоминает излом хрупкого материала, причем вид излома зависит от характера действия усилий. На рис. 297 представлен излом усталого металла от усилий, действовавших в одном направлении. На рис. 298 и 299 представлен излом усталого материала, который изгибался переменными усилиями. На всех трех фотографиях ясно видны зоны: одна весьма мелкозернистая, характеризующая собственно постепенный излом, при которой кристаллы перетирались друг о друга, и вторая, представляющая нормальный излом, происшедший вследствие того, что нагрузка, приходящаяся на единицу здоровой площади поперечного сечения, достигла разрушающего значения.

Задачи, связанные с изучением сопротивляемости металлов усталости, значительно сложнее тех, которые мы рассмотрели выше для случая статического действия сил.

Сложность решения обуславливается следующими обстоятельствами. Во-первых, закон изменения напряжений во времени может быть весьма разнообразным, как это легко видеть на рис. 300

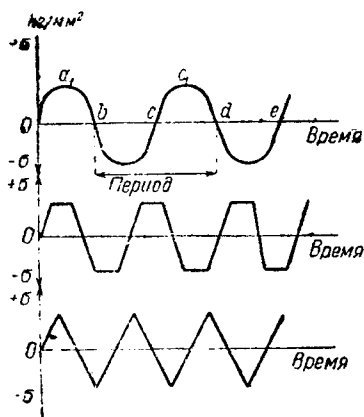


Рис. 300. Характер изменения напряжения

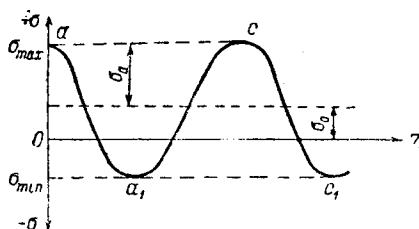


Рис. 301. Несимметричный цикл

Большинство исследований усталости металлов произведено для синусоидальной формы кривой изменения напряжения и полученные результаты без корректировки распространяются и на другие формы кривой. Однако достаточных опытных данных, подтверждающих возможность такого переноса, нет.

Во-вторых, говоря о переменных напряжениях, нужно различать симметричные и несимметричные циклы. Циклом называют замкнутую однократную смену напряжений, проходящих непрерывный ряд значений.

Например, на рис. 301 один цикл распространяется от a до c . За этот цикл напряжения приняли все возможные значения, свойственные данному циклу, и по своей величине в точке c вернулись к исходной величине (точка a). Аналогично — при исходном напряжении, соответствующем точке a_1 , — цикл окончится в точке c_1 , и т. д. Время, в течение которого протекает один цикл, называется периодом.

Симметричным циклом называется такой цикл, в котором максимальное и минимальное напряжения одинаковы по величине, но противоположны по знаку (рис. 300).

Сопротивляемость металлов усталости больше всего изучалась при симметричном цикле. Она характеризуется *пределом усталости*. Предел усталости является тем максимальным напряжением, которое до-

пускает повторение цикла N раз без разрушения образца, где N — заданное техническими условиями большое число. Обычно это число устанавливается равным $N = 10 \cdot 10^6$ для черных металлов и $N = (50 \text{ до } 100) \cdot 10^6$ — для цветных металлов. Опытные данные позволяют признать, что если материал при некотором напряжении выдержал без разрушения указанное число циклов, то он выдержит такое же напряжение и при значительно большем числе перемен.

Определение предела усталости при симметричном цикле производится следующим образом. Из испытываемого материала изготавливают 8—10 образцов, форма и размеры которых обуславливаются конструкцией испытательной машины.

Один из 8—10 образцов закрепляют в машину, дают напряжение σ_1 , заведомо превышающее предел усталости, и определяют число циклов N_1 , при котором произойдет поломка образца. Затем закрепляют в машину второй образец, нагружают его до напряжения $\sigma_2 < \sigma_1$ и опять определяют число циклов N_2 , при котором образец сломается. Таким же образом поступают с образцами 3, 4, 5, 6 и 7 (рис. 302).

Предположим, что образец 7 не сломался, выдержав при напряжении σ_7 число циклов, равное $N_7 = 10 \cdot 10^6$ или, что то же, 10^7 . Остается теперь решить, является ли напряжение σ_7 пределом усталости. Если величина этого напряжения близка к σ_6 , т. е. к предыдущему напряжению, которое вызвало поломку образца через число циклов, равное N_6 , тогда можно считать, что σ_7 является пределом усталости. Если же эта разность между σ_6 и σ_7 еще велика, тогда придется использовать еще один образец и нагрузить его промежуточным по величине напряжением σ_8 . Очень наглядно все результа-

ты испытания можно представить в виде так называемой кривой Велера (рис. 302). Точками здесь обозначены сломавшиеся образцы, точкой со стрелкой — образцы не сломавшиеся. Как видно, образец 8, так же как и 7, не сломался. Следовательно, пределом усталости нужно признать σ_8 , если разность $\sigma_8 - \sigma_7$ укладывается в предусмотренный допуск. Такие допуски не нормализованы. В своих исследованиях мы придержи-

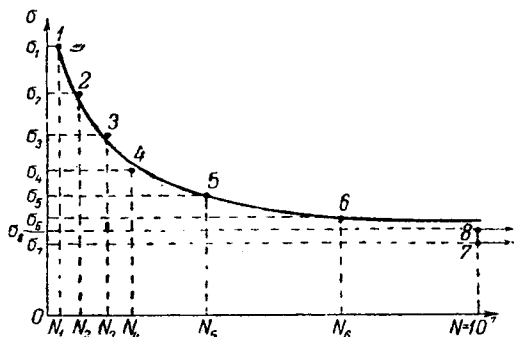


Рис. 302. Кривая Велера

ваемся следующих условий. Назовем наибольшее напряжение несломавшегося образца σ_w , а величину напряжения ближайшего сломавшегося образца обозначим σ_N .

Величина σ_w может быть названа пределом усталости в том случае, если разность $\Delta\sigma = \sigma_N - \sigma_w$ не превышает 5% от σ_w , но и не больше 1 кг/мм².

При таких условиях сумма всех циклов, необходимых для построения кривой Велера и определения предела усталости, обычно достигает величины

$$\Sigma N = (25 \text{ до } 30) \times 10^6.$$

При работе с одной машиной, делающей 3000 циклов в минуту, испытание занимает около 170 час., не считая времени, затрачиваемого на установку образцов. И работая даже на нескольких машинах, фактически не удается сократить время испытания одного материала

меньше чем до 60—70 час. Это обстоятельство в большой степени удорожает испытание на усталость и тормозит его развитие. Поэтому вполне понятны стремления целого ряда исследователей найти пути упрощения этого чрезвычайно важного испытания, дабы им можно было пользоваться в повседневной практике заводских и лабораторных испытаний.

Первым решением этого вопроса было увеличение числа перемен нагрузок в минуту. В первоначальных опытах Велера они не превышали 40—60; в опытах Лаше и Гопкинсона число перемен доходит уже до 6000—7000 в минуту, и, наконец, Дженкин¹, применив принцип электромагнитного возбуждения колебаний с резонансом, доводит число колебаний до 2000 в секунду. Однако такое сильное увеличение частоты перемен влияет на значение предела усталости. Оказывается, что с увеличением частоты предел усталости повышается и особенно сильно при большой частоте. При большом числе перемен нагрузки малый период времени уменьшает амплитуду неупругих деформаций, отвечающих данному интервалу напряжений, и, следовательно, понижает и вред от последнего. Таким образом для получения реальных результатов испытания на усталость нельзя пользоваться чрезмерно большой частотой. Обычно частота циклов принимается сейчас равной от 2000 до 5000 в минуту.

Гаф² предложил для укорочения времени испытания на усталость изготовлять пробный образец просверленным в виде цилиндра. В этом случае кривая $\sigma-N$ принимает горизонтальное положение при меньшем N , но, как показали работы Мазона³, при этом происходит увеличение предела усталости.

Весьма простой метод определения предела усталости предложен Стромейером. Метод заключается в следующем: испытуемый брусок подвергают переменной нагрузке, увеличивающейся ступенчато, и при этом измеряется температура образца. Первоначальное нагревание образца до определенной нагрузки незначительное; однако затем, при незначительном увеличении напряжения, температура сильно повышается. Эта нагрузка очень близко совпадает с пределом усталости, найденным прямым испытанием.

Выделение теплоты в образце при испытании его переменной нагрузкой объясняется петлей гистерезиса, получаемой на протяжении одного цикла. Площадь петли гистерезиса будет пропорциональна выделившейся теплоте. Гаф предполагает существование двоякого рода петель гистерезиса: чисто упругих, безвредных для материала, и полупругих, сопровождающихся появлением внутрикристаллических обратимых сдвигов, приводящих к разрушению от усталости. Момент появления последних резко увеличивает площадь петель, что сопровождается резким увеличением температуры, и эти явления характеризуют предел усталости материала.

Смитс⁴ определяет предел усталости аналогично тому, как определяется предел пропорциональности при статическом испытании. Специальный зеркальный прибор измеряет деформацию пробного бруска, подверженного переменной нагрузке, увеличивающейся ступенчато. При определенном напряжении деформация сильно увеличивается, и это напряжение характеризует предел усталости.

Методы Стромейера и Смитса, как и целый ряд других предложений, не сумели заменить собой длительный классический метод Ве-

¹ Proc. Royal Soc., Vol. 109, S. 119, 1925.

² Eng. II, S. 159, 1921.

³ 1) Eng. II, S. 388, 1923; 2) Stahl u. Eisen, S. 639, 1918.

⁴ 1) J. Iron Steel Inst. I, p. 365, 1915; 2) Stahl u. Eisen, S. 837, 1915.

лера. На ряде материалов пределы усталости, определенные ускоренными методами, совпадают с пределами усталости, установленными методом Велера. Однако можно указать еще большее число металлов, для которых ускоренные методы себя не оправдали. Поэтому последними следует пользоваться с большой осторожностью и только с целью приближенного установления порядка величины напряжения, соответствующего пределу усталости.

Методы Стромейера и Смита в значительной степени сокращают время испытания материала на усталость, а упрощение в аппаратуре, возможное для данных методов, может способствовать их широкому распространению.

В целях упрощения испытания материалов на усталость, а также и с целью изучения этого рода испытания был предпринят ряд работ по изучению связи между усталостью и другими механическими свойствами. Однако эти исследования не дали какого-либо практического результата — найти закономерную зависимость между усталостью и другими механическими свойствами не удалось. Что особенно интересно в данных этих опытов — это отсутствие какой-либо согласованности между пределом усталости и пределом пропорциональности. По данным Мура, предел усталости для некоторых сортов стали может быть даже выше предела пропорциональности, хотя для большинства материалов предел усталости ниже предела пропорциональности.

В отношении влияния термической обработки пришли к тому заключению, что при надлежащей термической обработке предел усталости повышается с повышением других механических свойств, хотя опять-таки строгой зависимости здесь не найдено.

Из всего сказанного следует, что сопротивление усталости, являясь вполне самостоятельным механическим свойством, имеющим большое значение при расчете конструкций и деталей, должно будет рано или поздно войти в практику механических испытаний. Сложность и длительность этого испытания не позволили еще до сих пор выработать надлежащих методов и рациональный тип машин и приборов для этих испытаний. Это — задачи ближайшего будущего, и можно быть уверенным в скором их разрешении, в особенности если принять во внимание широкий масштаб этих работ.

Предел усталости при симметричном цикле обычно обозначается одной величиной, например $\sigma_w = 24 \text{ кг/мм}^2$. Но при этом подразумевают, что указаны два напряжения, одинаковые по величине, но обратные по знаку, ибо точнее $\sigma_w = \pm 24 \text{ кг/мм}^2$.

Цикл, в котором максимальное и минимальное напряжения не одинаковы по величине, называют несимметричным или асимметричным циклом. Несимметричный цикл уже нельзя характеризовать одним напряжением — пределом усталости. Здесь необходимы два напряжения — предельные напряжения усталости.

Действительно, несимметричный цикл характеризуется, во-первых, коэффициентом асимметричности

$$\rho = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}},$$

представляющим собой отношение максимального (верхнего) напряжения цикла к минимальному (нижнему), а во-вторых, размахом колебания

$$R = \sigma_{\max} - \sigma_{\min},$$

представляющим собой алгебраическую разность между максимальным и минимальным напряжениями цикла.

Сохраняя постоянным коэффициент асимметричности, можно так изменять величину размаха колебания, чтобы в одном случае поломка образца произошла за сравнительно небольшое число циклов, а во втором — не имела места и после 10 миллионов циклов.

Предельными напряжениями несимметричного цикла с заданным коэффициентом называются такие два напряжения, которые создают наибольший размах колебания, не разрушающий образец после большого числа повторений цикла. Здесь опять это число устанавливается равным $N = 10$ миллионов для черных и $N = 50 - 100$ миллионов для цветных металлов.

Таким образом, несимметричный цикл характеризуется двумя предельными напряжениями. Его можно рассматривать слагающимся из двух напряжений (рис. 301): постоянного напряжения σ_0 , равного алгебраической полусумме из максимального и минимального напряжений:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2},$$

и переменного симметричного пульсирующего напряжения, равного алгебраической полуразности из максимального и минимального напряжений:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{R}{2}.$$

Первое из них — σ_0 — называется *средним напряжением цикла*, второе — σ_a — *амплитудой напряжения цикла*. Оба эти показателя также могут быть использованы для характеристики предельных напряжений цикла.

Таким образом в общем виде симметричный цикл является частным случаем несимметричного цикла, для которого коэффициент асимметричности равен $\rho = -1$.

Отметим еще и так называемый *повторный цикл*. Этим термином называется такой цикл, для которого одно из напряжений, верхнее или нижнее, равно нулю. Для него в случае растяжения коэффициент асимметричности $\rho = \infty$, так как $\sigma_{\min} = 0$ и $\sigma_{\max} > 0$, а для случая сжатия $\rho = 0$, так как $\sigma_{\max} = 0$ и $\sigma_{\min} < 0$.

5. Машины для испытания усталости металлов

а. Машина, работающая на изгиб. Конструкция этих машин весьма разнообразна. Мы ограничимся здесь кратким описанием лишь двух машин, изготавливаемых фирмой К. Шенк в Дармштадте¹ и являющихся в данное время наиболее совершенными. Одна из этих машин работает изгибающей нагрузкой, а вторая на переменное растяжение — сжатие.

Первая машина, схема которой представлена на рис. 303, состоит из двух неподвижных подшипников, связанных посредством тяг с рычажной системой, по которой движется груз $G = 10$ кг. Для того чтобы вся система в момент начала опыта находилась в равновесии, с противоположной стороны приложен противовес Q . Испытуемый образец, заложенный в соответствующие конуса машины, подвержен постоянному по всей длине изгибающему моменту. Расчет напряжения, испытываемого образцом от изгибающей нагрузки, производится следующим образом: сначала определяют по соответствующим фор-

¹ E. L e h r, Diss, TH, Stuttgart, 1925.

мулам изгибающий момент, деление которого на момент сопротивления сечения дает нам искомое напряжение в крайнем волокне.

Первоначально определяем силу P , составив предварительно уравнение моментов сил, приложенных к рычагу, относительно точки O .

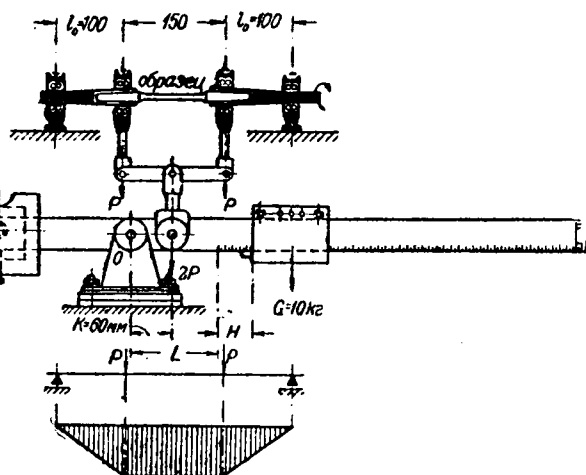


Рис. 303

$$2PK - G(H + L) + Ql = 0$$

При

$$GL = Ql,$$

раскрывая скобки, получим:

$$2PK - GH - Ql + Ql = 0;$$

$$2PK = GH.$$

Отсюда определяем силу P , изгибающую наш образец:

$$P = \frac{G}{2K} \cdot H.$$

Согласно выполненной конструкции машины, мы имеем:

$$G = 10 \text{ кг и } K = 60 \text{ мм}$$

Подставив указанные величины в наше уравнение, мы получим:

$$P = \frac{10}{2 \cdot 6} \cdot H.$$

Изгибающий момент найдем из уравнения:

$$M = P \cdot l_0 = \frac{10}{2 \cdot 6} \cdot H \cdot l_0 = \frac{10 \cdot 10}{2 \cdot 6} H,$$

где $l_0 = 10 \text{ см}$.

Принимая во внимание, что длина рычага, помещающегося внутри закрытой станины, в два раза больше шкалы, выведенной наружу, вследствие чего число делений на наружной шкале будет в два раза меньше числа равноценных делений на рычаге, из предыдущего уравнения получим (заменяя $H = 2L$):

$$M = \frac{10 \cdot 10}{6} L.$$

Момент сопротивления W при диаметре образца, равном 7,52 мм, будет определен нами по формуле:

$$W = \frac{\pi}{32} d^3 = 0,0417 \text{ см}^3$$

и напряжение

$$\sigma_u = \frac{M}{W} = \frac{100}{6 \cdot 0,0417} L.$$

Переходя к устройству машины Шенка, проследим, каким образом передается вращение испытываемому образцу. Постоянный ток из сети с напряжением в 100 В питает нижний мотор, соединенный посредством муфты с генератором, дающим постоянный ток в 220 В верхнему свободно подвешенному на двух опорах мотору в 0,25 л. с.,

снабженному шкалой, по которой ведутся отсчеты крутящего момента (рис. 304).

Верхний мотор *a* с присоединенным к нему счетчиком оборотов *b* передает вращение посредством гибкого вала с конусным зажимом *d*, в которых и закреплен образец *e* при помощи двух винтов *f*.

Вся эта система (образец и конусные зажимы) представляет собой свободно лежащую балку на двух опорах. При закладывании образца, что требует большой сноровки и опыта, необходимо следить по индикаторам *g*, чтобы образец не бил больше, чем на 0,02 мм. Биение образцов зависит не только от правильной подгонки системы конусов, но также и от малейшего засорения в конусах. Даже сравнительно ничтожная смазка вазелином соприкасающихся друг с другом конусных поверхностей в сильной степени влияет на величину прогиба заложённого образца, что в свою очередь сказывается на точности определения предела усталости.

Нагрузка прикладывается на два свободные шариковые подшипника *h* и передается системой рычагов от груза *i*, передвижение которого вдоль рычага *k* позволяет изменять нагрузку, передаваемую на образец. Груз *q* является противовесом, который арретируется захватом *l*.

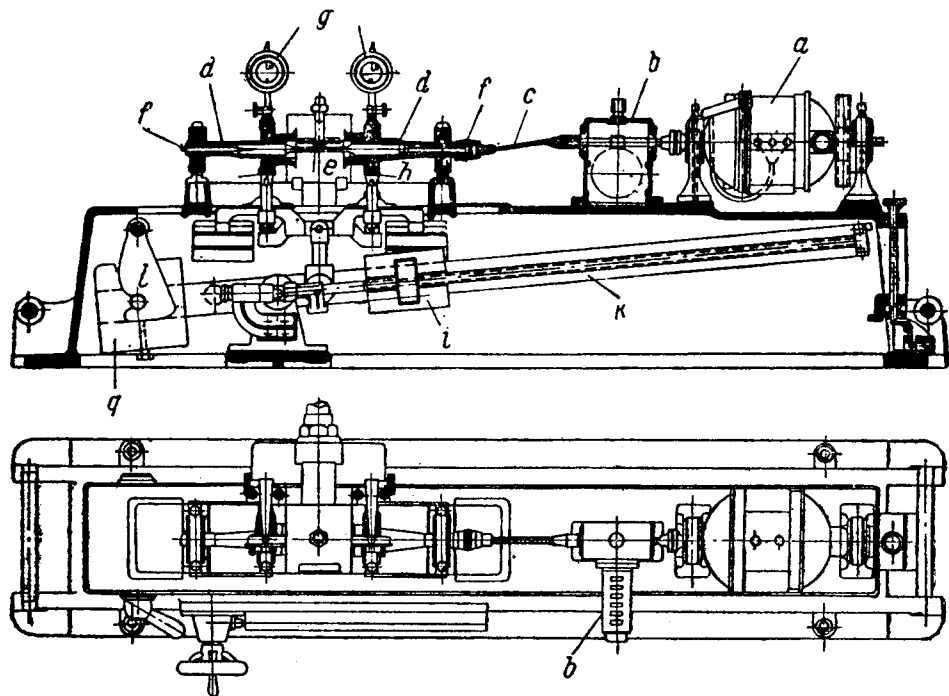


Рис. 304

При помощи термопары, надетой на образец, измеряется температура образца, индикаторы *g* указывают прогиб образца при различной нагрузке, а амперметр, как и шкала пендельмотора, позволяет определить мощность, затрачиваемую на вращение образца при различной нагрузке. Эти устройства позволяют определять пределы усталости ускоренными методами. Все эти четыре величины: температура, стрела прогиба, крутящий момент пендельмотора и сила тока, потребляемая мотором, фиксируются через определенный промежуток времени, например 5 или 10 мин. Отсчитав эти величины, увеличи-

вают нагрузку на образец на $1\text{--}2 \text{ кг/мм}^2$ и опять через $5\text{--}10$ мин. производят запись показания приборов. По этим записям строятся четыре кривые, указанные на рис. 305, по которым и определяют предел усталости.

Прямолинейный участок этих кривых лежит в области напряжений,

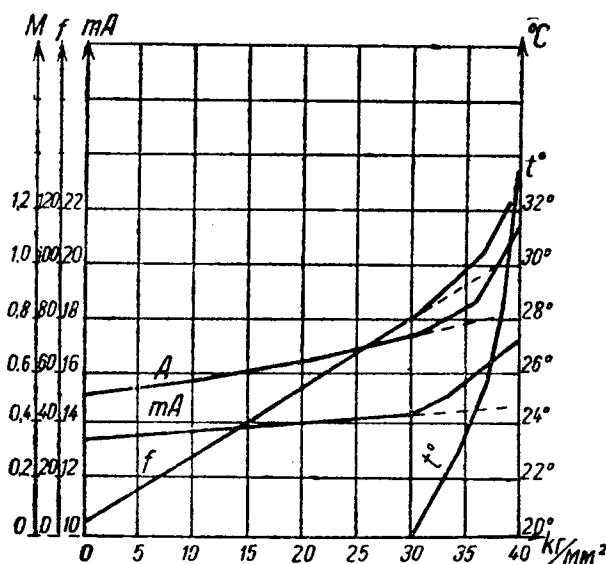


Рис. 305

величина которых меньше предела усталости. Точка перегиба (на рис. 305 соответствующая $\sigma = 30 \text{ кг/мм}^2$) должна указывать величину предела усталости.

Нужно, однако, отметить, что различные материалы по-разному реагируют на получение указанных перегибов. Поэтому, если производить испытание наблюдая лишь за одним фактором, например, за стрелкой прогиба, или за температурой, или за крутящим моментом, то легко получить результаты, сильно отличающиеся от истинных. Наличие же всех четырех кривых позволяет определять

предел усталости более точно. Однако далеко не для всех материалов пределы усталости, установленные этим способом, совпадают с пределом усталости, установленным по кривой Велера.

б. Машина, работающая на растяжение — сжатие. Наиболее удачную конструкцию машины для испытания материалов на усталость попеременно растягивающей и сжимающей нагрузкой предложила фирма К. Шенк в Дармштадте¹. Машина работает по принципу электромагнитного возбуждения и предназначена для испытания цилиндрических образцов диаметром 5 мм и длиной 50 мм и дает 30 000 перемен в минуту (500 пер./сек.), что позволяет в значительной мере сократить время, необходимое для определения предела усталости классическим методом. В машине следует различать приводной механизм, вызывающий попеременно растягивающую и сжимающую деформацию в образце, и механизм, измеряющий эту деформацию. Первый представляет собой систему масс, приводимых в колебание переменным током 500 пер./сек. Измерительный же механизм представляет собой колебательный контур, который измеряет колебания первой системы.

Приводной механизм состоит из двух больших масс m_2 и m_3 и третьей меньшей массы m_1 (рис. 306). Последняя связана с массой m_2 сильной пружиной c и с массой m_3 образцом c_p . Так как массы m_2 и

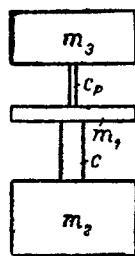


Рис. 306.

¹ Engg. London, Bd. 122, p. 722/24, 1926; E. Lehr. Diss. C. H., Stuttgart, p. 67/80, 1925; K. Memmler u. K. Laute, Forschungsarbeiten, V. D. I. Heft 329.

m_3 примерно в десять раз больше массы m_1 , а сила упругости постоянной пружины c также больше таковой образца c , то в первом приближении можно считать массы m_2 и m_3 неподвижными. Масса m_1 представляет собой якорь электромагнита.

Массы m_2 и m_3 так же, как и натяжение пружины c , постоянны.

В зависимости от упругих свойств образца c_p добавочными грузами изменяют массу m , таким образом, чтобы собственное число колебаний всей системы было равно, примерно, 500 пер./сек.

На рис. 307 изображена схема такой машины. Здесь a обозначает массу m_1 , а m — добавочные грузы, изменяющие величину m_1 . Далее b и c — соответственно массы m_2 и m_3 , d — электромагнит, e — обмотка электромагнита, f — пружина, g — якорь, h — мембрана, i — направляющие ролики, k и l — механизм для вертикального перемещения m_2 , o — испытуемый образец, q — основание машины и p — пробковая прокладка.

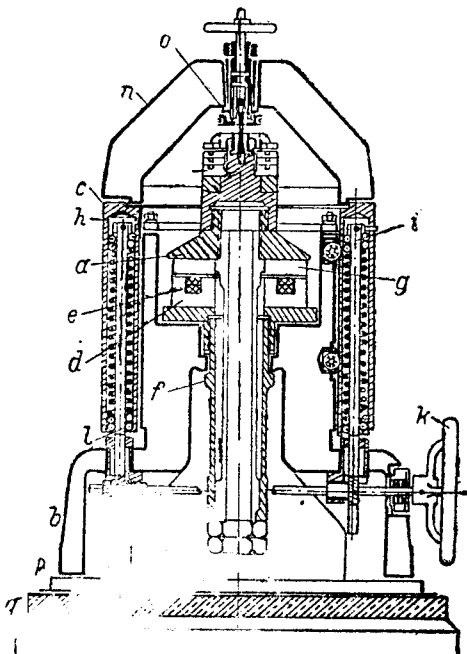


Рис. 307

На рис. 308 изображена электрическая схема приводного механизма. Мотор d приводит во вращение генератор высокой частоты a и постоянного тока b . В цепь высокочастотного тока (500 пер./сек.) включаются конденсатор e , ваттметр f и обмотка электромагнита, приводящего в колебание массу m_1 .

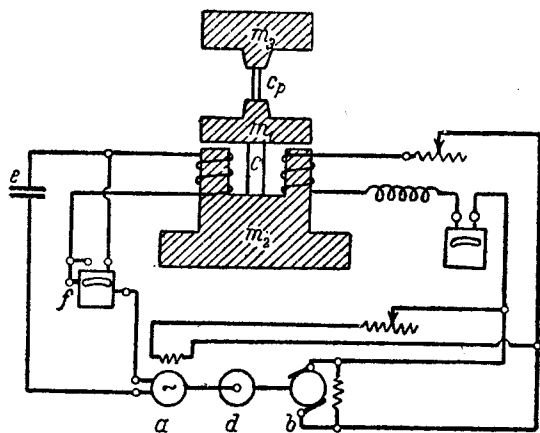


Рис. 308

Цепь постоянного тока (40 В) служит для возбуждения высокочастотного генератора и для создания полярности электромагнитов. Изменением возбуждения высокочастотного генератора легко регулируется сила тока последнего и вместе с этим амплитуда колебания массы m , или, что то же самое, амплитуда деформации испытуемого образца.

Величина амплитуды деформации образца измеряется по схеме, изображенной на рис. 309. Это устройство позволяет производить отсчеты в отдалении от машины, так как при работе машина издает сильный и пронзительный звук.

Пластина массы m колеблется в магнитном поле электромагнита, возбуждаемого постоянным током. При этом во вторичной обмотке

индуцируется переменный ток, напряжение которого, измеряемое вольтметром, зависит от величины амплитуды колебания.

Число перемен нагрузок на образце подсчитывается из числа оборотов электромотора приводного механизма. На случай поломки образца предусмотрено реле, которое останавливает всю машину.

в. Машина для испытания на ударную усталость. Весьма широко распространены машины, испытывающие усталость металлов при действии ударной нагрузки. Машины эти значительно более просты по конструкции, не требуют особого умения в обращении с ними; однако результаты, получаемые при этих испытаниях, не имеют пока еще такой ценности, как при испытаниях на машинах, описанных выше. Объясняется это тем, что явления, имеющие место при динамическом действии сил, далеко еще не разработаны, и потому и получаемые результаты позволяют судить лишь качественно о достоинстве материала и не дают еще возможности практически использовать коли-

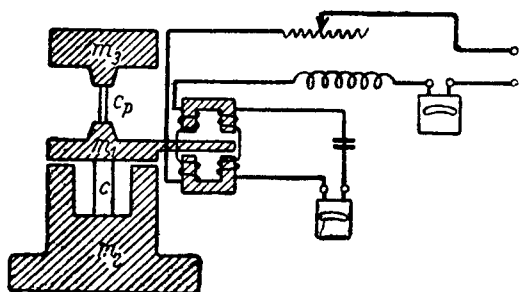


Рис. 309

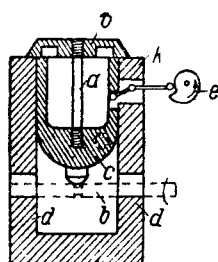


Рис. 310

чественные данные. Одна из машин для испытания металлов на ударную усталость изображена на рис. 310. Образец может испытываться как на растяжение, так и на изгиб.

При испытании на изгиб обычно применяется образец *b*, имеющий выточку; он устанавливается на двух опорах *d—d*, в которых после каждого удара поворачивается на некоторый угол специальным крановым механизмом. Падающая баба с изгибает образец, а счетчик оборотов регистрирует число ударов, потребное на разрушение образца. Баба подымается эксцентриком *e*. В машинах предусмотрена возможность изменения веса падающей бабы (добавочные веса или съемные бабы), а в некоторых даже возможно в небольшом интервале изменить высоту падения.

При этих испытаниях необходимо следить, чтобы при падении баба производила лишь один удар по образцу. Некоторые конструкции допускают после первого удара еще и второй, а иногда и третий удар отскакивающей бабы. Это обстоятельство сильно искажает результаты испытания, так как добавочные удары остаются не учтенными. Такой дефект может быть исправлен или увеличением числа ударов, или же исправлением профиля кулачной шайбы, подымающей бабу. Увеличивая число ударов, можно достигнуть того, что кулачная шайба подхватит бабу, прежде чем последняя после отскока ударит по образцу вторично. Но увеличивать скорость выше определенного предела, который зависит от конструкции машины, нельзя, так как при очень большой скорости кулачок может подхватить падающую бабу, прежде чем она ударила по образцу.

Обычно такие машины работают при числе ударов, равном не более 100—200 ударов в минуту, и это обстоятельство заставляет отка-

зываются от определения предела усталости по Велеру, так как суммарное число перемен, которое необходимо набрать при шести образцах — 20 миллионов, — потребует свыше 70 суток непрерывной работы.

Поэтому в этих испытаниях ограничиваются тем, что характеризуют сопротивляемость материала ударным нагрузкам числом ударов, которое выдержит образец до поломки, сохраняя при этом постоянными и высоту падения и вес бабы. Производство из веса бабы, высоты падения и числа ударов до разрушения укажет работу, потребовавшуюся для разрушения образца. Эти данные, конечно, еще мало говорят о действительной сопротивляемости усталости под действием динамических сил, и приходится пока еще ожидать или создания более быстрых методов испытания или более совершенных машин.

Для испытания на растяжение образец *a* закрепляется, как видно на рис. 310, одним концом в баб *с*, а другим в обойму *о*. При падении обоймы ударяется о корпус машины, а живая сила бабы растягивает образец. При испытании на растяжение часто наблюдается искривление образца. Объясняется это явление или неправильным закреплением образца или же неправильным положением верхней обоймы по отношению к той плоскости машины, о которую эта обойма ударяется. Конечно, результаты испытания сломавшихся образцов, указывающие на их искривление, в расчет принимать нельзя.

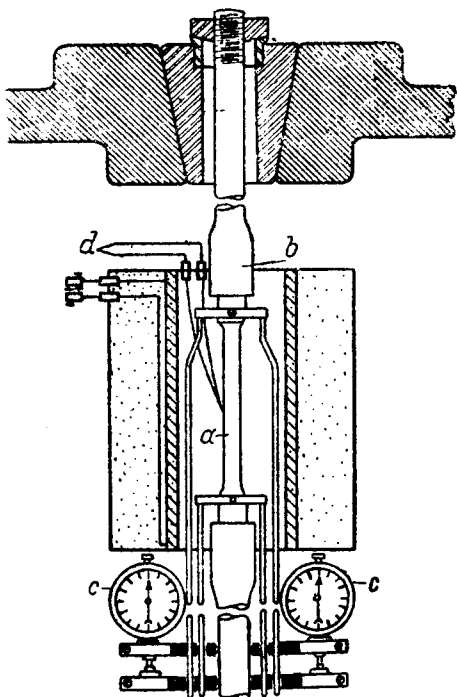


Рис. 311

6. Испытание механических свойств при высоких температурах

Целый ряд конструктивных деталей, как-то: детали паровых котлов, паровых турбин и др., работают при высоких температурах, и здесь поведение металлов под напряжением иное, чем при нормальной комнатной температуре. Поэтому испытание свойств при нормальной температуре тех материалов, которые применяются на изготовление таких деталей, является недостаточным. Необходимо изучать механические свойства их и при высоких температурах.

Для этого собственно пользуются двумя методами. Первый, наиболее старый, состоит в том, что испытуемый образец, как и при обычных условиях, подвергается, например, растяжению, причем температура его поддерживается на определенном уровне. Схема необходимой аппаратуры для производства таких испытаний может быть весьма разнообразной. На рис. 311 представлено устройство, которым пользовался Уайт¹.

¹ A. E. White, International congress for testing materials, p. 431, Amsterdam, 1927.

Образец *a* закрепляется в державки *b*, которые в свою очередь закреплены в зажимы машины. К образцу прикрепляется аппарат, который позволяет при помощи индикаторов с измерять удлинение образца. Точность измерения зависит от чувствительности индикаторов; если одно деление индикатора равно, например, 0,001 мм, то при расчетной длине образца в 100 мм возможно измерять относительные удлинения до 0,001%. Нагрев образца производится электрической печью сопротивления, а температура измеряется термопарой *d*.

При помощи такого устройства Уайт производил разрывы стальных образцов при различной температуре, а большая чувствительность примененных им индикаторов позволяла кроме обычного временного сопротивления с большой точностью определять предел пропорциональности.

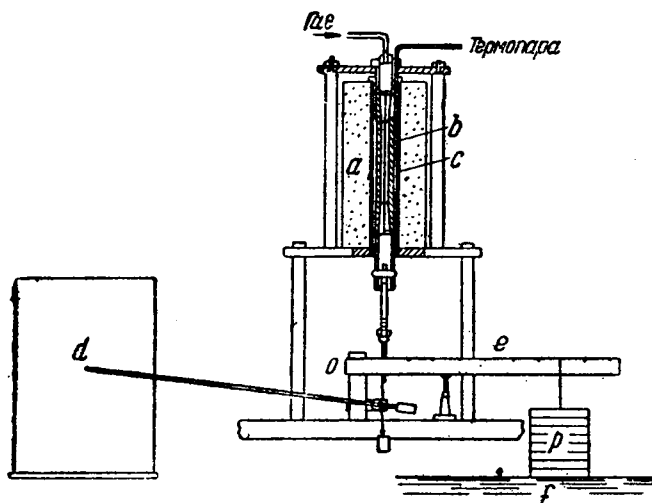


Рис. 312

Однако даже и эта величина не характеризует пригодности материала для работы под механической нагрузкой при высоких температурах. Дело в том, что всякий металлический сплав, находясь под какой-либо нагрузкой, начинает с определенной температуры приобретать способность деформироваться (ползти — сгее¹). причем эта нагрузка может быть в несколько

раз меньше предела пропорциональности для данной температуры.

Велтер¹ нашел, что для таких металлов, как медь и ее сплавы, даже при комнатной температуре и при нагрузке, меньшей предела текучести, наблюдается явление ползучести. Например, испытывая на растяжение латунь, для которой предел текучести был найден равным 36 кг/мм² и предел упругости (как нагрузка, давшая остаточное удлинение 0,02%) — 24 кг/мм² и временное сопротивление — 51,5 кг/мм², он нашел что при нагрузке в 40 кг/мм² образец сломался через день, при 30 кг/мм² — через 25 дней и, наконец, при нагрузке в 16 кг/мм² образец сломался через 110 дней. В течение всего опыта образец непрерывно удлинялся.

В отношении стали, как показал Ли², явления ползучести при комнатной температуре не наблюдается, но при высоких температурах даже сравнительно незначительные нагрузки вызывают уже постепенное деформирование образца.

Изучением явления ползучести при высоких температурах занимался целый ряд исследователей. В общем задача сейчас сводится к тому, чтобы определить при различной температуре степень (скорость) деформации образцов, подверженных различным нагрузкам, и найти те нагрузки и температуры, при которых материал дает допустимую скорость ползучести.

¹ Welter, Zeitschr. f. Metallkunde, S. 75 u. III, 1926.

² Proc. Inst. Mech. Eng., Decembre, 1924; Engineering, 12 and 19, Dec. 1924.

На рис. 312 представлена схема устройства для такого испытания, которым пользовались Мишель и Курно¹. Здесь a — электрическая печь сопротивления, b — образец, c — металлический муфель для более равномерного распределения температуры в образце. Образец растягивается грузом p , приложенным к рычагу l , а удлинение в зависимости от времени зарисовывается на самопишущем приборе, состоящем из стрелки и барабана d , совершающего равномерное вращение вокруг своей оси. При растяжении образец уменьшает свое поперечное сечение и, чтобы нагрузка на единицу площади сечения оставалась неизменной, груз p при опускании погружается в бак с водой f и этим компенсируется уменьшение площади сечения — с уменьшением сечения образца уменьшается нагрузка и, следовательно, напряжение остается постоянным.

Общий вид диаграммы, получающейся при таком испытании, изображен на рис. 313. Участок ab соответствует мгновенному упругому удлинению. Далее следует криволинейный участок bc — удлинение с убывающей скоростью. Если удалить нагрузку в периоде, соответствующем этому участку, то можно заметить, что кроме упругого мгновенного сжатия будет происходить еще и медленное сокращение длины образца. Однако образец не примет своей первоначальной длины — получится некоторое остаточное удлинение.

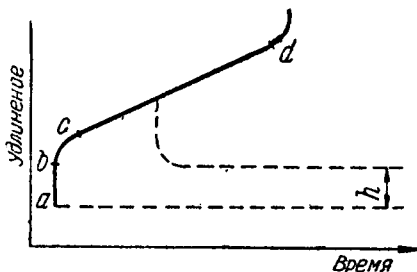


Рис. 313

Наконец, участок cd соответствует удлинению образца с некоторой постоянной скоростью, и этот период деформации называется деформацией ползучести.

По окончании этого периода наступает опять ускоренная деформация (участок de), которая заканчивается разрывом образца.

Таким образом изучение поведения металлов, находящихся под действием нагрузки, заключается в нахождении постоянной скорости деформации (участок cd) металла при различных температурах. Скорость деформации изобразится тангенсом угла наклона прямой cd к оси абсцисс.

Определив эти скорости при различных температурах и для различных нагрузок, можно тогда получить суждение о пригодности материалов для службы в качестве той или иной детали, работающей под напряжением при высокой температуре.

Предположим, что решено произвести испытание материала при трех температурах t_1, t_2, t_3 , например: $t_1 = 400^\circ, t_2 = 500^\circ, t_3 = 600^\circ$.

Для каждой температуры выбираем не менее трех напряжений:

$$\begin{aligned} &\text{для } t_1 \dots \sigma_1' \sigma_1'' \sigma_1''' \\ &\quad \cdot t_2 \dots \sigma_2' \sigma_2'' \sigma_2''' \\ &\quad \cdot t_3 \dots \sigma_3' \sigma_3'' \sigma_3''' \end{aligned}$$

Следовательно, необходимо иметь в распоряжении не менее девяти образцов и для каждого из них определить соответствующую скорость равномерной ползучести, выраженную, например, в процентах относительного удлинения в час. Эти скорости определяются по прямолинейному участку кривой ползучести. Полученные результаты

¹ Internat. Congress for testing materials. S. 397. Amsterdam. 1927.

наносят на диаграмму рис. 314, в которой по оси ординат отложены напряжения, а по оси абсцисс — скорость равномерной ползучести. Эти результаты будут представлены следующими девятью точками:

$$\begin{matrix} v'_1 & v''_1 & v'''_1 \\ v'_2 & v''_2 & v'''_2 \\ v'_3 & v''_3 & v'''_3 \end{matrix},$$

индексы которых соответствуют указанным выше температурам и напряжениям.

Соединяя каждые три точки с одноименным нижним индексом, получаем три кривые A, B, C, из которых каждая указывает для определенной температуры зависимость между напряжением образца и его скоростью равномерной ползучести.

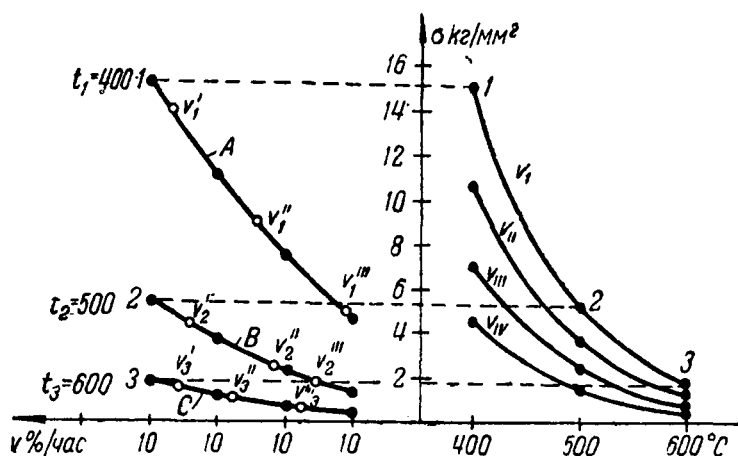


Рис. 314

По этим данным теперь можно построить кривые, указывающие зависимость между напряжением и температурой при постоянной скорости равномерной ползучести. Определение такой зависимости для скорости v_1 показано на рис. 314 переносом точек 1, 2, 3. Таким же способом определяются зависимости между σ и t° для скоростей v_{-1} , v_{IV} и т. д.

Последние кривые и служат для расчетных целей конструктора, который, задавшись, например, допускаемой скоростью ползучести и рабочей температурой, определяет по соответствующей кривой допускаемые напряжения в материале.

Отметим, что для получения этих результатов необходимо затратить много времени, эти испытания очень дороги, но результат их дает чрезвычайно ценные данные в руки конструктора.

При изучении ползучести необходимо учитывать следующие четыре фактора: а) температуру, б) деформацию, в) нагрузку, г) время.

Изменяя один из трех первых факторов, необходимо удерживать постоянными остальные. Невыполнение этих условий влечет за собой искажение конечных результатов исследований. Так как удерживать упомянутые факторы в абсолютно неизменном состоянии невозможно, то необходимо хотя бы примерно определять допускаемые пределы колебания. Последний фактор — время — не вызывает затруднений в отношении точности измерений, но заслуживает большого вни-

мания в смысле определения общей длительности испытания одного образца.

Ниже мы рассмотрим значение каждого фактора в отдельности.

а. Температура. Влияние температуры на скорость ползучести легко видеть из диаграммы рис. 315, в которой воспроизведены четыре кривых ползучести для чистого железа Армко. Нагрузка при испытании всех образцов составляла $17,2 \text{ кг/мм}^2$. Легко видеть, что если при 355° деформация образца прекратилась после 30—35 дней испытания, то при 383° , т. е. всего на 28° выше, скорость ползучести имеет значительную величину. Дальнейшее повышение температуры до 403° , т. е. всего на 20° , как и с 403 до 421° , вызывает уже чрезвычайно большие изменения в диаграмме ползучести. Например, Бейли сообщает, что колебание температуры в течение всего периода испытания может быть допущено не более $\pm 0,25^\circ$ и лишь в этом случае получаются кривые, позволяющие определять скорость равномерной ползучести 10^{-4} — $10^{-6} \%$ /час. Следовательно, для этих испытаний нужно предусмотреть весьма точный терморегулятор, учитывающий также и изменение температуры помещения, в котором производится испытание.

б. Деформация. Для определения скорости ползучести порядка $v = 10^{-6} \%$ /час. на образце с расчетной длиной в 200 мм общая деформация образца в течение 500 час. составит:

$$\Delta l = \frac{10^{-6} \cdot 200 \cdot 500}{100} = 0,001 \text{ мм.}$$

Из этого примера уже ясно, что для измерения ползучести необходимо пользоваться чрезвычайно точными экстенсometрами, позволяющими измерять удлинение образца с точностью $0,0001$ — $0,0005 \text{ мм}$.

в. Нагрузка. Большинство испытательных машин, применяемых для изучения ползучести, относится к рычажному типу, и если отношение плеч рычага не превышает $1:10$, то достижение удовлетворительной точности в измерении нагрузки не представляет затруднений. Необходимо лишь озаботиться снабжением машины арретиром, позволяющим нагружать образец достаточно плавно.

г. Время. Этот фактор, не вызывающий каких-либо затруднений в отношении точности измерения, чрезвычайно усложняет и удорожает испытание. Длительность испытания ползучести является большим недостатком, с которым все же приходится мириться. Изучая, например, кривые ползучести, представленные на рис. 316 и 327, легко видеть, что общая длительность испытания каждого образца доведена до 7000—11 000 час., т. е. занимает в среднем $0,5$ — $1,0$ года. При этом участок равномерной ползучести начинает определяться лишь после 2000—4000 час. Конечно, такая большая продолжительность требуется для определения весьма малых скоростей ползучести, но такие скорости как раз и представляют наибольший практический интерес.

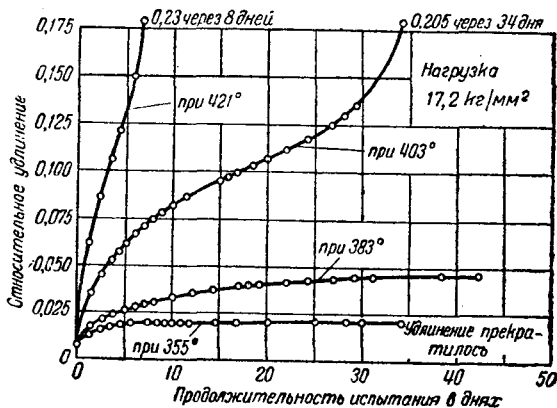


Рис. 315

7. Быстрые методы изучения ползучести металлов

а. Общее. Чрезвычайно большое время, требующееся для изучения ползучести металлов способом, изложенным выше, заставило ряд исследователей уделить много внимания отысканию более дешевых и быстрых способов испытаний характеристик ползучести. В данное время, однако, еще не предложен ни один способ, который мог бы заменить установившуюся длительную методику. И немудрено: в явлении ползучести наиболее важным фактором является время, и при исключении или при сокращении его теряется в большой степени ценность испытаний, так как получающиеся результаты исследований не отражают в себе влияния этого важного фактора.

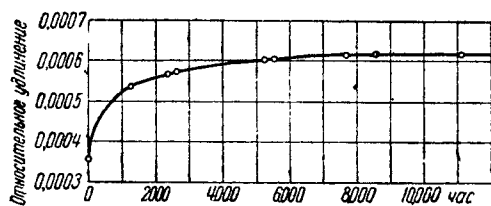


Рис. 316

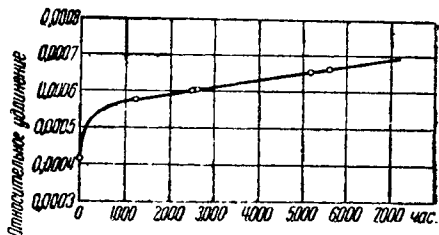


Рис. 317

Но все же, несмотря на это, некоторые из быстрых способов изучения прочности металлов при повышенных температурах имеют большое практическое значение. Хотя ускоренные способы испытаний и не дают точной количественной характеристики сопротивляемости металла механическим силам при повышенных температурах, но они позволяют рассортировать машиностроительные материалы на группы по качественным признакам. Таким образом можно быстро отобрать группу материалов с высокой сопротивляемостью ползучести и уже эти материалы подвергнуть длительным испытаниям с целью определения точных количественных характеристик ползучести, как-то: определение зависимости между температурой и напряжением при постоянной скорости ползучести.

Из многих предложенных методов быстрого изучения ползучести мы рассмотрим только три метода, заслуживающие с нашей точки зрения наибольшего внимания: 1) Бейли и Робертса, 2) Помпа и Дамена, 3) Гатфильда.

б. Метод Бейли и Робертса¹. Для качественной характеристики металлов при повышенных температурах Бейли и Робертс предложили принимать временное сопротивление разрыву металла, определенного при температуре 550° и при скорости растяжения, равной 0,1% в минуту.

Избранная скорость позволяет в среднем разорвать один образец в течение 7 час. Это время фактически сокращается до 2—3 час., в течение которых уже определяется максимальная нагрузка на образец — его временное сопротивление разрыву. С точки зрения длительности испытания предложенный метод следует признать приемлемым. Напрашивается здесь некоторое уточнение, заключающееся в том, чтобы определять временное сопротивление разрыву не по первоначальной площади, а по площади соответствующей шейки при разрыве.

¹ R. W. Bailey and A. M. Roberts, J. Inst. Mechan. Eng. (Febr. 1932), стр. 1—75.

Свой выбор температуры 550° авторы объясняют следующим образом. С одной стороны, они стремились удалиться от температуры, при которой проявляется явление синеломкости. Высшей температурой при исследовании различных сортов стали, при которой еще проявлялась синеломкость, была 450° . Следовательно, стандартная температура должна была быть установлена более высокой. Но, с другой стороны, следует избегать таких высоких температур, при которых наблюдаются структурные изменения в конструкционных сортах стали. Такие структурные изменения, как сфероидизация цементита в перлите, явление отпуска в термически обработанной конструкционной стали, заставили авторов установить стандартную температуру не выше 550° , тем более, что этот предел вполне приемлем и с точки зрения конструкций современных паротурбинных и котельных установок.

в. Метод Помпа и Дамена¹. Метод этих авторов заключается в определении при заданной температуре того напряжения, которое в периоде времени от 3—6 часов после приложения нагрузки вызовет скорость ползучести, равную $0,001\%$ в час. Несколько позже Помп и Эндерс² видоизменили и эти условия, предложив определять то напряжение, которое при заданной температуре, в периоде от 5-го до 10-го часа после приложения нагрузки, вызовет скорость ползучести, равную $0,003\%$ в час.

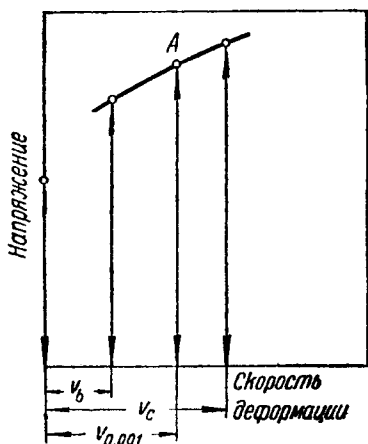


Рис. 318

Практически эта нагрузка определяется следующим образом (рис. 318). Опытом определяются в указанный период времени скорости ползучести v_b и v_c при напряжениях σ_b и σ_c . Затем путем экстраполяции определяется напряжение σ_0 при условии скорости $v_{0,001}$.

Легко видеть, что по первому варианту длительность испытания для одного образца занимает 6 час., а по второму — 10 час., вместо 2—3 час., потребных при испытании по способу Бейли и Робертса. К указанным промежуткам времени для всех методов следует еще прибавить время на установку образца, на нагрев печи и образца и на выравнивание температуры. Способ Помпа требует испытания нескольких образцов и, следовательно, значительно большего времени и большей тщательности, так как неточность в температуре больше сказывается на скорости ползучести, чем на временном сопротивлении разрыву. И действительно, Помп указывает на необходимость выравнивать температуру в течение 42 час. По способу Бейли и Робертса на эту операцию можно расходовать не более 1—2 час. и, следовательно, с точки зрения экономии времени их способ имеет значительные преимущества.

С точки зрения практического значения характеристик, получаемых обоими способами, их необходимо признать равноценными. Обе характеристики чисто условные, позволяющие лишь качественно оценивать способность материала сопротивляться деформациям при повышенной температуре. Их количественные значения не могут быть использованы даже с грубым приближением для расчетных целей, так

¹ A. Pomp u. Dahmen, Mitt. a. d. K.-W. Inst. f. Eisenforschung, v. 9., № 3, стр. 38 (1927).

² A. Pomp u. W. Enders, Stahl u. Eisen (1931), № 6.

как по способу Бейли и Робертса определяется с условной скоростью растяжения условное значение временного сопротивления разрыву, а по способу Помпа и Дамена — скорость ползучести при далеко не установившемся режиме деформации.

г. Метод Гатфильда. Первое¹ предложение Гатфильда заключалось в определении при заданной температуре максимального напряжения, которое в первые 24 часа после приложения нагрузки вызовет удлинение образца, не превышающее 0,5%, и в последующие 48 час. удлинение, не превышающее 0,01%. Таким образом определялось не что иное, как напряжение, вызывающее скорость ползучести, равную

$$v_1 = \frac{0,01}{48} = 0,0002 = 2 \cdot 10^{-4} \%/\text{час.}$$

Немного позже² Гатфильд несколько изменил свой метод, предлагая определять при заданной температуре максимальное напряжение, которое в первые 24 часа после приложения нагрузки вызовет удлинение образца, не превышающее 0,5%, а в последующие 48 час. скорость ползучести v_2 , не превышающую $10^{-4} \%/\text{час.}$

Легко видеть, что этот метод, так же как и метод Помпа, требует для своего выполнения несколько образцов, и длительность всего испытания здесь определяется уже, примерно, 5—6 днями.

С одной стороны, этот срок весьма велик, а с другой, — получающиеся результаты не могут быть использованы как расчетные данные, хотя Гатфильд указывает, что $\frac{2}{3}$ от найденного напряжения могут быть допущены как расчетные значения. Рассмотрение же опубликованных данных длительных испытаний заставляет в этом сомневаться.

8. Испытание на износ

Износом называется разрушение материала с поверхности при длительном воздействии на него сил трения. Этот процесс складывается из двух самостоятельных механических процессов — истирания и смятия, протекающих одновременно. Немаловажную, а в отдельных случаях и решающую роль играют при износе химические процессы, как, например, контактная коррозия и т. п.

Износ имеет место как в случае трения I рода, так и II рода. Он протекает как в присутствии смазки (износ со смазкой), так и в отсутствии смазки (сухой износ). Износ может происходить в условиях применения абразивов (наждак, карборунд, песок и т. п.), причем последними могут являться и сами продукты разрушения при износе, если они не удаляются с достаточной тщательностью.

Несмотря на исключительное значение проблемы износа для машиностроения, физическая природа процессов, сопровождающих износ, остается до сих пор не изученной. Поэтому отсутствует и единая методика испытания металлов на износ. Наоборот, многочисленные исследователи этой проблемы предпочитают в каждом случае создавать свои собственные установки для проведения эксперимента и разрабатывать свои методы исследования металлов на износ.

Это обстоятельство не позволяет в объеме этой книги с достаточной подробностью осветить все методы испытания на износ. Отсылая интересующихся к обстоятельному труду Конвисарова³, отметим, что

¹ W. H. Hatfield, J. Iron. and. Steel Inst., vol. 117, № 1, стр. 288 (1928).

² W. H. Hatfield, J. of Scotland Iron and Steel Inst., vol. 36, стр. 60 (1929).

³ Д. В. Конвисаров, Износ металлов, ОНТИ, 1938.

для суждения о пригодности металлов для работы на износ обычно определяют три величины:

- 1) коэффициент трения,
- 2) температуру нагревания металла при работе на износ,
- 3) сопротивляемость износу, характеризуемую или потерей в весе или изменением размеров образца.

Мы опишем здесь устройство трех машин для испытания на износ, которые у нас в СССР нашли, пожалуй, большее распространение, чем другие.

На рис. 319 схематически изображена машина Зайцева¹. В ней к неподвижному диску трения *a* кольцевой формы прижимаются три цилиндрика *b* ($d=5$ мм, $h=9$ мм) из испытуемого материала, которые вращаются вокруг вертикальной оси вместе с валом машины *c*. Момент трения измеряется по сжатию спиральной пружины, на которую он передается от диска трения *a*. Температура измеряется термометром, вставленным в отверстие, высверленное в диске трения. Износ от истирания определяется точно по убыли веса цилиндров, а износ от смятия — по убыли высоты цилиндров с учетом потери их высоты от истирания.

На рис. 320 представлена схема машины проф. Шварца. Машина снабжена электромотором, который двойной ременной передачей связан с диском трения. Благодаря ступенчатому шкивам можно изменять в широких пределах скорость на окружности диска. В этой машине образец из испытуемого материала *a* прижимается к ободу *b* вращаемого диска *c*. Для измерения силы трения устроен маятник, с которым связан патрон, несущий образец. Угол отклонения этого маятника, измеряемый по градуированной шкале, позволяет измерить силы трения, а следовательно, определить и величину коэффициента трения при известном давлении на образец.

Наибольшее удельное давление, на которое построена машина, составляет 100 кг/см^2 , при наибольшей скорости на окружности шайбы в 10 м/сек . При испытании определяются температура, сила трения, потеря в весе образца при заданном числе оборотов в минуту и удельном давлении на образец.

В машине Амслера (рис. 321) образцы *a* изготавливаются в форме двух дисков диаметром $30\text{--}35$ мм и шириной 10 мм. Давление на диски осуществляется градуированной пружиной и может устанавливаться от 25 до 250 кг. Соотношение скоростей вращения дисков может изменяться или изменением диаметра одного из дисков (оба диска принудительно вращаются от одного мотора) или специаль-

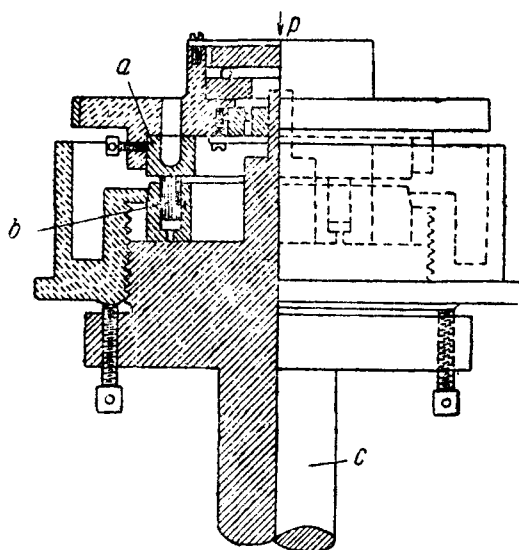


Рис. 321. Машина Амслера

¹ А. К. Зайцев. Антифрикционные сплавы, ЖРМО № 3, 1925.

ной зубчатой передачей. Таким образом, машина позволяет осуществлять износ или в условиях трения II рода или с добавлением трения I рода. Остановив один из дисков, можно получить чистое трение I рода.

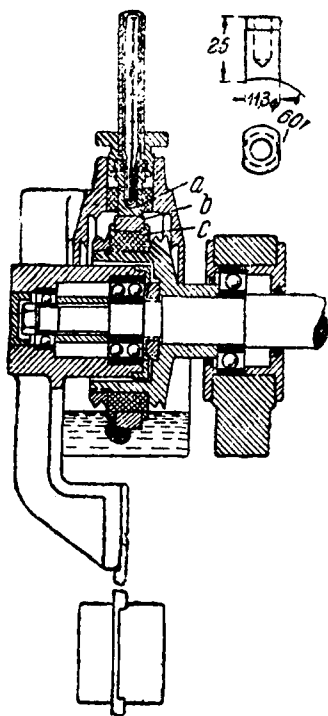


Рис. 320. Машина Шварца

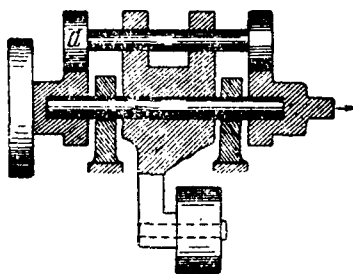
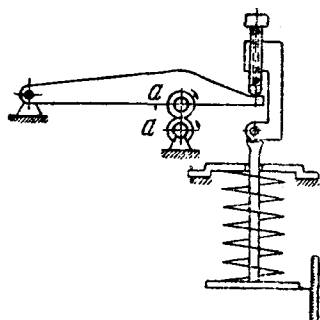


Рис. 321. Машина Амслера

Величина износа дисков определяется периодическим взвешиванием. Счетчик оборотов позволяет определить весь путь пробега дисков, а особый интегратор указывает величину работы сил трения.

ГЛАВА VIII

ИСПЫТАНИЕ ТВЕРДОСТИ

В отношении испытания твердости еще не установился единый метод. Разнообразие в определениях понятия твердости служит причиной того, что твердость испытывается рядом методов, часто не имеющих между собой ничего общего. Число этих методов испытания твердости растет, увеличивая разнообразие и без того уже в весьма пестром вопросе. Ниже приводится описание нескольких наиболее распространенных способов испытания твердости.

1. Метод вдавливания

Испытание твердости методом вдавливания основано на понятии твердости как противодействия, оказываемого одним телом проникновению в него другого более твердого тела.

Способ Бринеля. Наиболее распространен способ Бринеля, согласно которому в испытываемое тело (рис. 322) вдавливается грузом P шарик диаметром D . Такая операция оставит на поверхности испытываемого образца отпечаток — шаровую поверхность диаметром d . Если обозначить площадь шаровой поверхности (лунки) через f_k , число твердости H по Бринелю выразится:

$$H = \frac{P}{f_k} \text{ (кг/мм}^2\text{)}.$$

Вычислить шаровую поверхность f_k отпечатка можно следующим способом:

$$f_k = \pi \cdot D \cdot h \text{ и } h = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}},$$

тогда

$$H = \frac{P}{\pi D \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right)}.$$

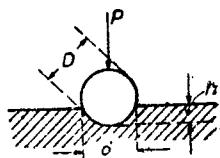


Рис. 322

Метод Бринеля получил чрезвычайно большое распространение. Им широко пользуются при различных исследовательских и приемочных испытаниях. При его выполнении нужно придерживаться следующих правил:

1) испытание должно производиться на гладкой плоской поверхности;

2) расстояние центра отпечатка от края образца или от другого отпечатка надо выбирать так, чтобы не было никаких явлений, могущих оказать влияние на результат (выпучивание края и т. п.);

3) загрузка должна поступенно и без толчков подниматься в течение 15 сек. и держаться на конечной величине 30 сек.; для стали с $H \geq 140 \text{ кг/мм}^2$ достаточно 10 сек.;

4) диаметр отпечатка d должен измеряться с точностью до сотых долей миллиметра;

5) для некруглых отпечатков для каждого из них берется средний диаметр;

6) для характеристики материала необходима средняя величина из двух по крайней мере отпечатков;

7) в зависимости от толщины и природы испытуемого образца следует применять следующие диаметры шариков и величины нагрузки (табл. 30).

Таблица 30

Толщина образца мм	Диаметр шарика D мм	Нагрузка P , кг		
		$30D^2$ для чугуна и стали	$10D^2$ для твердой ме- ди, латуни, бронзы и т.п.	$2,5D^2$ для более мяг- ких мате- риалов
Более 6 . .	10	3000	1000	250
6—3	5	750	250	62,5
Менее 3 . .	2,5	187,5	62,5	15,6

Материалом шариков служит закаленная сталь с твердостью не менее 630 кг/мм^2 .

Шариковая проба теоретически была бы более правильна, если бы нагрузку отнести не на шаровую поверхность, а на проекцию этой поверхности $f = \frac{\pi d^2}{4}$. Однако при вдавливании шарика твердость образца повышается вследствие наклепа. Желая ослабить влияние этого явления на определение действительной твердости ненаклепанного материала, Бринель предложил вместо числа $\frac{P}{f}$ вычислять число $\frac{P}{f_k}$. С увеличением глубины вдавливания f_k увеличивается быстрее, нежели f ; поэтому усиливающийся при этом наклеп будет меньше сказываться на вычисленной твердости.

В табл. 31 приведены числа твердости по Бринелю при нагрузке в 3000 и 500 кг для шарика $d = 10 \text{ мм}$. Весьма большим достоинством метода Бринеля следует считать зависимость между числами твердости H и временным сопротивлением разрыву σ_B . Это обстоятельство позволяет при приемочных испытаниях значительно сократить число дорогостоящих испытаний на разрыв, заменив их более простой, дешевой шариковой пробой. Для стали в среднем можно считать:

$$\sigma_B \cong 0,343 \text{ Н кг/мм}^2 \text{ при } H > 125$$

$$\sigma_B \cong 0,362 \text{ Н} \quad \cdot \quad \cdot \quad > 175$$

В заключение следует указать, что испытание сплавов, твердость которых близка к твердости самого шарика, не дает точных результатов. Весьма обстоятельное исследование этого вопроса произведено Майлендером,¹ который параллельно испытывал твердость металлов помощью шариков различной твердости, начиная с мягких стальных и кончая твердым алмазным. В результате этих исследований Майлендер пришел к заключению, что, пользуясь стальными закаленными шариками обычной твердости, можно вести испытания материалов, твердость которых не превышает $H = 420\text{—}450 \text{ кг/мм}^2$. Для особо твердых шариков предел измерения несколько повышается — до $460\text{—}500 \text{ кг/мм}^2$.

¹ R. Mailänder, Stahl u. Eisen. № 43, 1769/75, 1925.

Таблица 31

Диаметр отпечатка <i>мм</i>	Поверх- ность отпечатка <i>мм²</i>	Число твердости при нагрузке, <i>кг/мм²</i>			Диаметр отпечатка <i>мм</i>	Поверх- ность отпечатка <i>мм²</i>	Число твердости при нагрузке, <i>кг/мм²</i>		
		3000 <i>кг</i>	1000 <i>кг</i>	500 <i>кг</i>			3000 <i>кг</i>	1000 <i>кг</i>	500 <i>кг</i>
1,55	1,8975	1582	528	261	3,05	7,4629	402	134	67
1,60	2,0232	1487	495	248	3,10	7,7378	387	129	65
1,65	2,1866	1373	458	229	3,15	8,0001	375	125	63
1,70	2,2871	1310	437	218	3,20	8,2624	364	121	61
1,75	2,4378	1236	411	205	3,25	8,5310	351	117	59
1,80	2,5761	1164	388	194	3,30	8,7996	340	114	57
1,85	2,7112	1108	368	185	3,35	9,0792	332	111	55
1,90	2,8620	1048	350	175	3,40	9,3588	321	107	54
1,95	3,0159	995	332	166	3,45	9,6478	311	104	52
2,00	3,1762	946	316	157,7	3,50	9,9369	302	101	50
2,05	3,3427	898	298	149,8	3,55	10,2353	293	98	49
2,10	3,5290	857	286	143	3,60	10,5338	286	95	48
2,15	3,6757	817	273	136	3,65	10,8416	277	92	46
2,20	3,8485	782	261	130	3,70	11,1495	269	90	45
2,25	4,0275	744	248	124	3,75	11,4495	262	88	44
2,30	4,2097	713	238	119	3,80	11,7496	255	85	43
2,35	4,3982	683	227	114	3,85	12,0951	248	83	41
2,40	4,5930	652	218	109	3,90	12,4407	241	81	40
2,45	4,7885	627	209	105	3,95	12,7785	235	78	39
2,50	4,9889	600	200	100	4,00	13,1162	228	76	38
2,55	5,1931	578	193	95	4,05	13,4712	223	75	37
2,60	5,4036	555	185	93	4,10	13,8262	217	73	36
2,65	5,6188	532	178	89	4,15	14,1749	212	71	35
2,70	5,8340	512	171	86	4,20	14,5236	207	69	34,5
2,75	6,0586	495	166	83	4,25	14,8943	202	67	33,6
2,80	6,2832	477	159	80	4,30	15,2650	196	65	32,6
2,85	6,5172	460	154	77	4,35	15,6451	192	64	32
2,90	6,7513	444	148	74	4,40	16,0253	187	63	31,2
2,95	6,9696	430	144	73	4,45	16,4148	183	61	30,4
3,00	7,1880	413	140	70	4,50	16,8044	179	60	29,4
4,55	17,2065	174	58	29,1	6,05	32,0066	94	31	15,6
4,60	17,6087	170	57	28,4	6,10	32,6098	92	30,6	12,3

Продолжение табл. 31

Диаметр отпечатка мм	Поверх- ность отпечатка мм ²	Число твердости при нагрузке, кг/мм ²			Диаметр отпечатка мм	Поверх- ность отпечатка мм ²	Число твердости при нагрузке, кг/мм ²		
		3000 кг	1000 кг	500 кг			3000 кг	1000 кг	500 кг
4,65	18,0186	166	56	27,8	6,15	33,2136	90	30	15,1
4,70	18,4286	163	54	27,2	6,20	33,8350	89	29,6	14,8
4,75	18,8527	160	53	26,5	6,25	34,4602	87	29	14,5
4,80	18,2768	156	52	25,9	6,30	35,0634	86	28,5	14,3
4,85	19,7135	153	51	25,4	6,35	35,7325	84	28	14
4,90	20,1502	149	50	24,9	6,40	36,3823	82	27,5	13,8
4,95	20,5978	146	49	24,4	6,45	37,0426	81	27	13,5
5,00	21,0455	143	48	23,8	6,50	37,7086	80	26,5	13,3
5,05	21,5041	140	46,5	23,3	6,55	38,3872	79	26	13,1
5,10	21,9629	137	45,5	22,8	6,60	39,0720	77	25,5	12,8
5,15	22,4357	134	44,5	22,3	6,65	39,7632	76	25,2	12,6
5,20	22,9085	131	44	21,8	6,70	40,4700	74	24,7	12,4
5,25	23,3939	128	43	21,5	6,75	41,1822	73	24,4	12,2
5,30	23,8793	126	42	21	6,80	41,9058	71,5	23,8	11,9
5,35	24,3694	124	41	20,6	6,85	42,6409	70	23,5	11,7
5,40	24,8720	121	40	20,1	6,90	43,3855	69	23	11,5
5,45	24,3778	118	39,5	19,7	6,95	44,1394	68	22,6	11,3
5,50	25,8931	116	39	19,3	7,00	44,9028	67	22	11,1
5,55	26,4114	114	38	19	7,05	45,6877	65,5	21,8	10,9
5,60	26,9392	112	37	18,6	7,10	46,4642	64,5	21,5	10,75
5,65	27,4733	109	36,5	18,2	7,15	47,2622	63,5	21,2	10,6
5,70	28,0168	107	35,7	17,8	7,20	48,0696	62,5	20,8	10,4
5,75	28,5634	105	35	17,5	7,25	48,8895	61,5	20,4	10,22
5,80	29,1163	103	34,4	18,2	7,30	49,7221	60,3	20,1	10,02
5,85	29,6818	101	33,8	16,9	7,35	50,5703	59,4	19,8	9,9
5,90	30,2536	99	33	16,6	7,40	51,4279	58,6	19,5	9,76
5,95	30,8616	97	32,5	16,2	7,45	52,2982	57,5	19,2	9,6
6,00	31,4160	95	31	15,9	7,50	53,1810	56,5	18,9	9,45
7,55	54,0795	55,6	18,5	9,28	7,80	58,7824	51,2	17,1	8,45
7,60	54,9905	54,8	18,2	9,13	7,85	59,8192	50,3	16,8	8,38
7,65	55,9173	53,9	17,9	8,98	7,90	60,7742	49,5	16,5	8,25
7,70	56,8567	53	17,6	8,83	7,95	61,7931	48,7	16,2	8,12
7,75	57,7332	52,1	17,3	8,7	8,00	62,8320	48	16	8

Для испытания твердости методом вдавливания имеются специальные машины самых разнообразных конструкций. На рис. 323 изображен весьма распространенный гидравлический пресс шведской фирмы Альфа. Испытуемый образец *a* подводится винтом *b* к шарiku *c*. Насосом накачивают масло в специальный цилиндр, производя этим давление на шарик. Величина давления отсчитывается манометром *d*, для проверки которого служат грузы *e*. Прибор весьма компактен и очень удобен в работе.

Людвик¹ предложил вместо стального шарика вдавливать в испытуемый материал стальной закаленный конус с углом при вершине, равным 90° (рис. 324). Если обозначить через *P* нагрузку в кг, *d* —

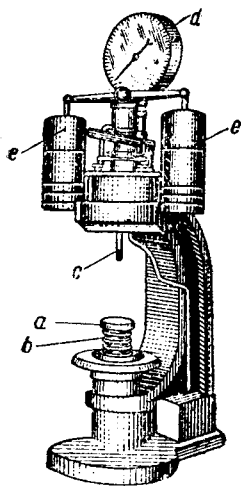


Рис. 323. Пресс фирмы Альфа

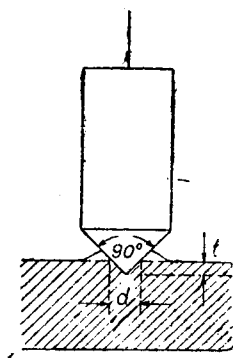


Рис. 324

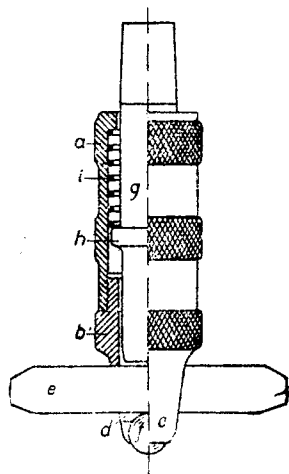


Рис. 325

диаметр отпечатка в мм и *t* — глубину отпечатка в мм, то *L* — число твердости по Людвигу выразится:

$$L = \frac{P}{\frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{2}}$$

Очень часто число твердости *L* определяют по глубине *t* отпечатка. Площадь отпечатка:

$$f = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2} = 1,11 d^2 = 4,44 t^2$$

и тогда:

$$L = \frac{P}{4,44 t^2}$$

Для определения твердости методом вдавливания, как упоминалось выше, пользуются специальными машинами — прессами. Но кроме них имеется ряд небольших переносных приборов, позволяющих измерить твердость крупных отливок и поковок, которые неудобно подводить к прессу. Благодаря таким приборам измерение твердости методом вдавливания получило еще большее распространение и из стен лаборатории перешло в производственную обстановку.

¹ Ludwik, Baumaterialenkunde, H. 8. 9. 10, 1907.

ку — к станкам. Из многочисленных приборов этой группы мы опишем один прибор фирмы Польдихютте.

Прибор состоит из головки *b* (рис. 325), ввинчиваемой в оправку *a*. Пружинящие концы с головки удерживают стальной шарик *i*. Внутрь оправки вставлены боек *g* с заплечиком *h* и спиральная пружина *i*. В окно *d* головки *b* вставляется эталонный стержень *e* прямоугольного сечения. Твердость стержня известна и равномерна по всей длине. Если держать прибор в одной руке, подводя шарик к поверхности испытуемого тела, а другой рукой нанести удар по бойку *g*, то на испытуемой поверхности и на поверхности эталон-

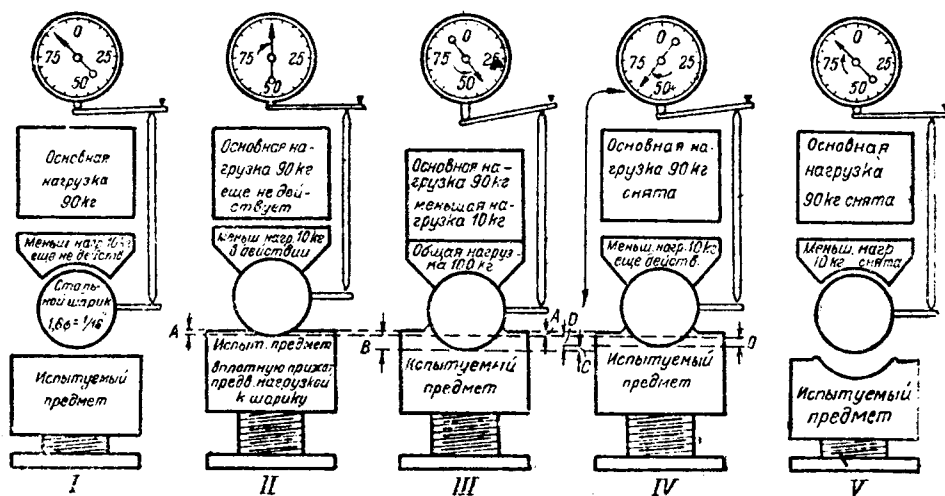


Рис. 326

ного стержня *e* остается по отпечатку. Обозначив силу удара *P*, мы можем написать для эталона:

$$H_e = \frac{P}{f_e} \text{ и } P = H_e f_e$$

и для испытуемого тела:

$$H_i = \frac{P}{f_i} \text{ и } P = H_i f_i,$$

откуда:

$$H_e f_e = H_i f_i \text{ или } H_i = H_e \frac{f_e}{f_i};$$

здесь: H_i — твердость испытуемого образца; H_e — твердость эталона (известная); f_i — площадь лунки на поверхности испытуемого образца; f_e — площадь на поверхности эталона.

Прибор Роквелла. За последнее время широкое распространение получил прибор Роквелла, работающий по тому же принципу, как прибор Бринеля, т. е. по принципу проникновения одного тела в другое под действием статической нагрузки. Но в отличие от способа Бринеля здесь измеряются не диаметр и площадь отпечатка, а глубина отпечатка. Прибор Роквелла состоит из неподвижной станины (рис. 326), на которой укреплены индикатор, рычаг с переменным грузом и масляный регулятор (регулирующий плавность приложения силы, а также скорость испытания), и подвижного столика, служащего подставкой для испытуемых образцов.

Индикатор градуирован на две шкалы. Красная *В* служит для определения твердости мягких материалов с приложением нагрузки в 100 кг посредством стального шарика диаметром 1,6 мм. Черная шкала *С* употребляется для более твердых материалов, которые испытываются алмазным наконечником под нагрузкой 150 кг.

При записи чисел твердости необходимо указать шкалу *В* или *С*, по которой производился отсчет твердости. Процесс испытания при обеих нагрузках один и тот же и состоит в том, что испытуемое тело подвергают предварительному давлению в 10 кг, при котором стрелка манометра устанавливается в нулевое положение (положения *I* и *II*, рис. 326). После этого прикладывают на некоторый промежуток времени нагрузки в 100 и 150 кг (положение *III*).

Стрелка индикатора, отклонившаяся под действием груза на некоторый угол, после снятия нагрузки возвращается обратно на некоторый угол, зависящий от упругих свойств тела, и показывает число твердости испытуемого предмета (положение *IV*). Затем опусканием столика тело освобождается от нагрузки, причем стрелка приходит в первоначальное положение (положение *V*). Продолжительность испытания занимает всего лишь 5—6 сек. Благодаря незначительности нагрузки и малым отпечаткам, прибором Роквелла можно пользоваться для определения твердости тонких пластинок, а также пустотелых предметов, имеющих толщину стенки в несколько миллиметров. Общий вид прибора Роквелла представлен на рис. 327.

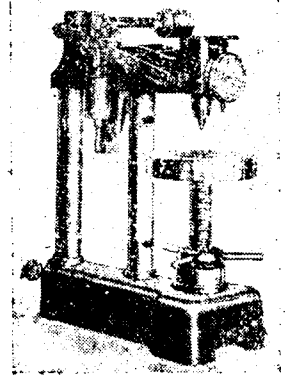


Рис. 327. Прибор Роквелла

Числа твердости по Роквеллу сравнимы с числами твердости по Бринелю. Зависимость в виде кривой дана на рис. 328.

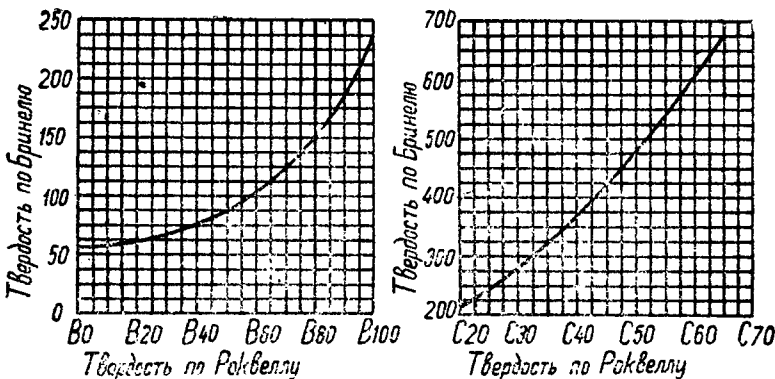


Рис. 328

Способ Роквелла значительно удобнее способа Бринеля при определении твердости таких материалов как закаленная сталь, инструменты и т. п. Благодаря тому, что этот прибор снабжен алмазным наконечником, большие твердости измеряются достаточно точно, и данные не искажаются деформацией стального шарика, как это имеет место при способе Бринеля.

Прибор Виккерса. Прибор Виккерса, с одной стороны, имеет по сравнению с прибором Бринеля то же преимущество, что и

и удобно измеряется при помощи микроскопа, прикрепленного на шарнире к станине прибора. Прилагаемая к прибору таблица позволяет по величине отпечатка определять число твердости, приведенное эмпирически к числу твердости Бринеля. Небольшая величина вдавливания алмазной пирамиды позволяет на этом приборе определять твердость очень тонких деталей. На рис. 331 представлен график для пересчета чисел твердости по Бринелю, Роквеллу, Виккерсу и т. д.¹

2. Метод царапания

Определение твердости методом царапания является наиболее старым способом. Метод этот долгое время являлся лишь сравнительным и заключался в определении местоположения нового тела по своей твердости в каком-либо выбранном ряду. Наиболее распространенным рядом являлась шкала твердости Мооса:

1. Тальк	}	Можно нанести царапины ногтем
2. Каменная соль (или гипс)		
3. Известковый шпат	}	Твердость медной монеты
4. Плавленый шпат		
5. Апатит	}	Твердость железа
6. Полевой шпат (ортоклаз)		
7. Кварц	}	Твердость оконного стекла
8. Топаз		
9. Корунд	}	Царапает стекло
10. Алмаз		

Если, например, испытуемое тело оставляет царапины на всех минералах, кончая полевым шпатом, а кварц оставляет царапину на испытуемом теле, то последнее относится к 6-й ступени по твердости.

Мартенс сконструировал прибор, который позволяет производить более точное определение твердости по методу царапания. Прибор состоит (рис. 332) из козырька *a* с подвешенным грузом *b* и

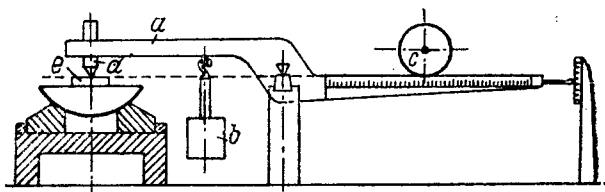


Рис. 332

передвижным грузом *c*, который позволяет изменять силу давления алмазного острья *d* на поверхность испытуемого тела *e*. Этим прибором можно определять твердость двумя способами: или измерять вполне определенным грузом ширину царапины, нанесенной на поверхность алмазом, или подыскивать тот груз, который вызовет царапину вполне определенной ширины. Первый способ быстрее, при втором же нужно на полированную поверхность испытуемого тела нанести ряд царапин при различных нагрузках, и затем, измерив их ширину и построив кривую зависимости ширины царапин от нагрузки, определить ту нагрузку, которая вызывает царапину требуемой ширины. Для измерения ширины царапины служат специальные микроскопы и приборы.

3. Склероскоп Шора

Склероскоп Шора был впервые описан в 1907 г.² Идея метода его работы заключается в том, что на поверхность испытуемого тела

¹ Metal Progress, 1939, окт., т. 36, № 4, стр. 378.

² American Machinist, Nov., 1907.

падает с определенной высоты стальной боек, в конце которого вделан небольшой алмаз. Боек ударяется о поверхность испытуемого тела, и по высоте отскакивания судят о твердости материала. Строго говоря, таким способом определяется не только твердость, но характеризуются и упругие свойства испытуемого тела и бойка. Поэтому, например, по методу Шора каучук является более «твердым» материалом, нежели чугун, что совершенно не согласуется с нашими общими понятиями о твердости вообще.

Однако этот прибор все же получил довольно большое распространение. Им широко пользуются для определения однородности материала, контроля термической обработки и т. д. Особенно ценные услуги оказывает склероскоп при контроле закалки стали.

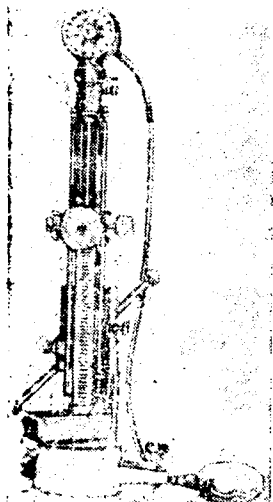


Рис. 333. Склероскоп Шора

Проверка твердости закаленных изделий по методу Бринеля не дает положительных результатов, так как, во-первых, как уже упоминалось выше, при испытании очень твердых тел результаты получаются неправильные, а, кроме того, изделия, закаленные при слишком высоких температурах (перегретые), указывают большую твердость, нежели изделия, закаленные при нормальных температурах. И если судить по результатам шариковой пробы, то трудно бывает говорить о правильности произведенной закалки. Иные результаты дает склероскоп. Указывая не только твердость, но и упругие свойства испытуемого тела, склероскоп чувствителен к перегревам стали, которые развивают в материале большую хрупкость. Поэтому при испытании склероскопом образцов стали, закаленных нормально и с перегревом, первые укажут большую твердость, чем вторые.

Склероскоп имеет вид, изображенный на рис. 333. Он состоит из градуированной трубки и устройства на верхнем конце ее приспособления для освобождения стального бойка посредством сжатия резиновой груши. Боек падает по стеклянной трубке на положенный снизу образец и отскакивает назад, причем наивысшая точка, которой при этом отскакивании достигает боек, может быть определена по делениям стеклянной трубки: чем выше отскакивает боек, тем тверже материал. Вторичным нажатием резиновой трубки боек поднимается в свое первоначальное положение в верхнюю часть аппарата. Стеклянная трубка может быть перемещаемая в вертикальном положении, так что на таком приборе можно испытывать образцы высотой до 200 мм.

При испытании больших предметов, например валцов, стеклянная трубка с соответствующей оправой вынимается из штатива и ставится вертикально на то место, которое желают испытать. При этом трубка удерживается, например, левой рукой, пока правая управляет резиновой грушей.

Прибор сам по себе чрезвычайно удобен, без труда переносится с места на место и позволяет быстро производить испытания без порчи изделия. Чувствительность его настолько велика, что при ударе бойка два раза по одному месту второе показание будет больше первого. Это явление необходимо учитывать, и при испытании после каждого удара передвигать изделие или прибор.

Новая модель склероскопа Шора имеет более тяжелый боек, который падает с небольшой высоты (около 18 мм). Высота отскока улавливается специальным приспособлением и непосредственно отсчитывается по циферблату, по которому движется стрелка.

4. Маятниковый прибор Герберта

Большое распространение получил прибор для определения твердости, сконструированный Гербертом.¹ Прибор представляет собой дугообразный маятник, опорой которого служит рубиновый или стальной шарик диаметром в 1 мм (рис. 334). Вес всего прибора 2 или 3 кг. Испытуемый предмет закрепляется в специальных тисках, которые позволяют устанавливать испытываемую поверхность горизонтально с достаточной точностью. Маятник снабжен шестью винтами, регулирующими его центр тяжести и скорость качания. Небольшой же диск, находящийся в центре маятника, служит для перемещения центра тяжести прибора относительно его точки опоры, т. е. для изменения длины маятника.

Дуговой уровень, укрепленный в верхней части маятника и снабженный делениями, служит для получения отсчетов числа твердости.

При помощи маятника Герберта можно определять твердость путем определения времени десяти полных качаний.

Чем мягче материал, тем глубже входит в него шарик и тем ближе радиус кривизны подходит к радиусу шарика, что и обуславливает меньший период качания. Испытание производится следующим способом. Осторожно без удара устанавливают маятник на гладкую горизонтальную поверхность испытуемого образца, выводят перышком его из положения равновесия на некоторый угол, приблизительно соответствующий 10—20 делениям шкалы (для мягких материалов угол наклона берется меньший), и предоставляют ему возможность свободно качаться. Со второго или третьего качания берут отсчет для нескольких качаний секундомером. Время 10 качаний служит мериллом твердости T . Чем больше времени требуется для одного качания, тем тверже материал. Для получения сравнимых результатов перед испытанием маятник регулируют на горизонтальной плоскости стекла эталона.

Во-первых, устанавливают его в устойчивом положении регулированием четырех горизонтальных винтов и вертикальными винтами—так, чтобы период качания его был равен 10 сек. для стального шарика и 8,8 сек. для рубинового. Длину маятника устанавливают так, чтобы центр тяжести лежал между центром шарика и точкой опоры. Стандартной длиной считается положение его центра тяжести на 0,1 мм ниже центра шарика, что достигается опусканием диска на 2 оборота ниже нулевого положения.

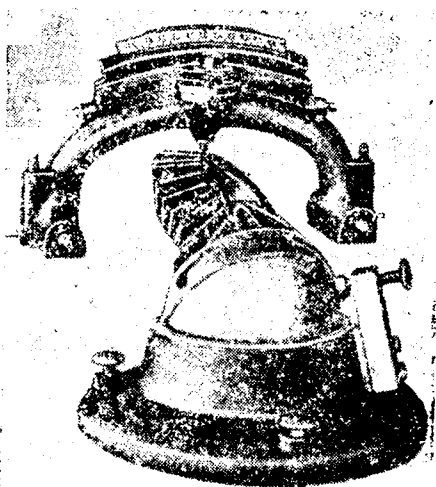


Рис. 334. Прибор Герберта

¹ Werkstattstechn., № 2, 1924.

Определение твердости по времени имеет большую связь с определением твердости по методу Бринеля, а именно:

$$H = 10 T \text{ при } T > 3,33;$$

$$H = 0,3 T^2 \text{ при } T < 3,33.$$

Помп и Швейниц предложили следующие формулы:

$$H = 10 T \text{ для } H > 450;$$

$$T = 0,081 H + 7,6 \text{ для } H < 450.$$

Большим преимуществом маятника является то, что он не оставляет почти никаких следов после испытания и требует для испытания площадку в 1 мм.

5. Прибор Кесснера

Все вышеописанные методы испытания твердости не дают возможности судить об обрабатываемости материала резцами. Исключение составляет, может быть, метод определения твердости по Герберту, но этот метод требует еще проверки и разработки.

Что же касается наиболее распространенного определения твердости по способу Бринеля, то он совершенно не характеризует обрабатываемости материала резцами. Например, твердость по Бринелю алюминия — 38, литого железа — 100, но обработка алюминия представляет значительно большие трудности, чем железа. И таких примеров много. Поэтому вполне понятны стремления целого ряда исследователей выработать такой метод испытания твердости, который отвечал бы запросам цехов, обрабатывающих металлы снятием стружки. Этот вопрос становится еще более важным и крайне необходимым с введением рационализации производства, хронометража и т. п., когда необходимо для выработки общего плана знать способность того или иного применяемого материала обрабатываться резцами. Обычно с такими запросами обращаются в лабораторию, которой часто бывает трудно дать вполне определенный ответ.

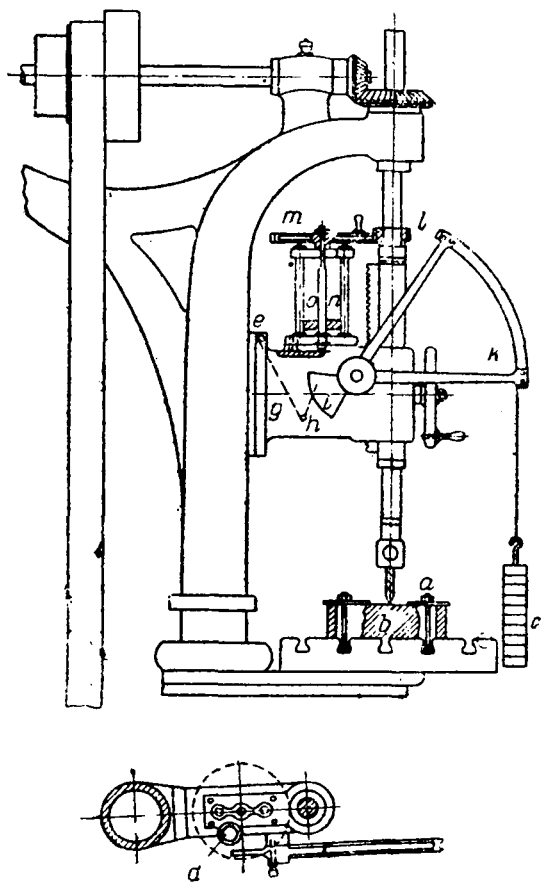


Рис. 335

Большим вкладом в разрешение этого сложного вопроса следует считать работу Кесснера,¹ предложившего характеризовать «твердость обработки» как способность материала поддаваться сверлению. Для

¹ Kessner, Forschungsarbeiten, № 208, 1918.

этого Кесснер сверлом определенного диаметра, углами резания и т. п., при вполне определенном давлении и числе оборотов сверлит испытуемый материал и мерил твердости обработки считает глубину проникновения сверла за 100 оборотов.

Достаточно, конечно, вспомнить, что обработка сверлом не тождественна с обработкой резцом или наждачным камнем, чтобы прийти к заключению, что и эта проба далеко не разрешила задачу в полном объеме. Материал, который хорошо сверлится, может создавать большие затруднения при обработке его на токарном станке. Так, свинец, который легко поддается резанию, почти совершенно не поддается обработке на шлифовальных камнях. Кроме того трудность обработки того или иного материала может быть обусловлена переменной скорости резания, величины подачи, глубины резания и т. д. Вообще на результат обработки влияет так много факторов (по Тейлору девять факторов)¹, что учесть их все одним каким-либо методом является чрезвычайно трудно выполнимой задачей.

Метод, предложенный Кесснером, разрешает эту задачу в первом приближении, и данные, которые получаются в результате этого испытания, хотя и имеют лишь сравнительное значение, все же дают возможность с большой уверенностью ориентироваться в этом сложном вопросе.

Для испытания по методу Кесснера можно приспособить любой сверлильный станок (рис. 335). Сверло *a* прижимается к испытуемому образцу *b* помощью постоянного груза *c*. Опускание сверла во время работы фиксируется поворотом барабана *d*, связанного при помощи гибкой нити *e* с рычагом *i—k*. Число оборотов сверла регистрируется следующим образом: на шпинделе станка насажено зубчатое колесо *l*, сцепленное с зубчаткой *m*, которая вращает винт *n*. Вращением винта *n* подымается или опускается державка *o*, несущая карандаш. Комбинациями движения в вертикальном направлении карандаша и вращением барабана *d*, на который надевается бумага, зарисовываются кривые, подобно тем, которые изображены на рис. 336. Нормальный вид имеет кривая *V*: некоторый перелом *A* объясняется тем, что сверло не сразу работает по всей кромке, а требуется сперва пройти некоторую глубину. Кривая *III* показывает, что более глубокие слои обрабатываются (сверлятся) труднее наружных. Кривая *IV* относится к материалу с наружной твердой коркой. Переломы кривых *I* и *II* указывают на неоднородность материала: в первом случае — твердая часть, во втором — мягкая.

Для оценки способности материала обрабатываться снятием стружки по таким кривым необходимо отбросить влияние различных случайных факторов, как это указано пунктиром на рис. 336. Масштабом качества чаще всего принимают угол, образованный кривой с осью абсцисс.

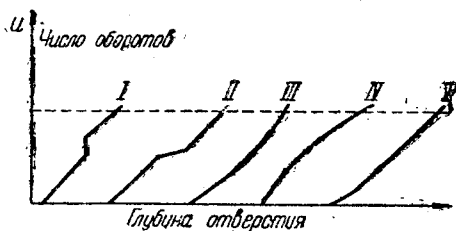


Рис. 336

¹ Тейлор, Искусство резать металлы.

ГЛАВА IX

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЫ

1. Испытание на загиб и закручивание

Технологическими пробами называются испытания, выявляющие способность металла принимать определенные деформации или воздействия, подобные тем, которые металл должен претерпевать при его обработке или в условиях дальнейшей его службы в виде из-

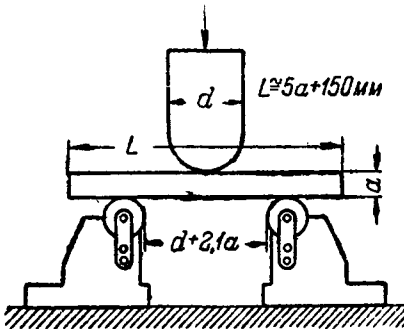


Рис. 337. Технологическая проба на загиб (ОСТ)

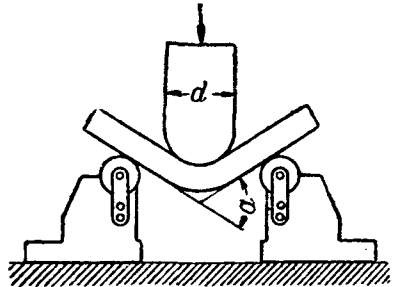


Рис. 338. Проба на загиб до определенного угла (ОСТ)

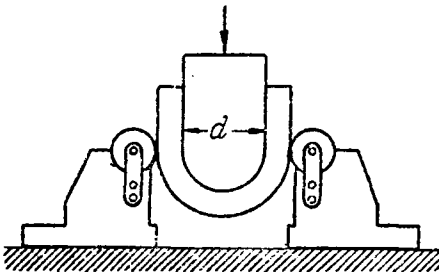


Рис. 339. Проба на загиб до параллельности сторон (ОСТ)

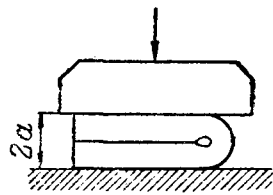


Рис. 340. Проба на загиб вплотную (ОСТ)

делий. Кроме того, к числу технологических проб относят и такие способы испытания металлов, которые производятся в цеховых условиях и приблизительно характеризуют то или иное свойство металла.

Технологические пробы, выявляющие пластичность металла, регламентированы в Общесоюзном стандарте (ОСТ 1682—1697). К числу их относится проба на загиб (рис. 337), которая имеет следующие разновидности:

- 1) загиб до определенного угла (рис. 338),
- 2) загиб вокруг оправки до параллельности сторон (рис. 339),
- 3) загиб вплотную, т. е. до соприкосновения сторон образца (рис. 340).

Тот или иной вид загиба оговаривается в технических условиях в зависимости от назначения материала.

Для производства пробы на загиб применяются прессы, тиски с закругленными губками и т. п., причем обязательным условием при производстве пробы является плавность нарастания усилия на образец. Признаком того, что образец выдержал пробу, служит отсутствие в нем после загиба трещин, надрывов, расслоений или излома.

Пробе на загиб подвергаются также и трубы.

Однако один лишь угол загиба, который чаще всего и служит масштабом качества при этой пробе, не дает меры пластичности металла. Большую роль здесь играет величина отношения между толщиной планки и радиусом кривизны оправки.

Действительно, пусть l будет длина нейтрального слоя, a — толщина планки и ρ — радиус кривизны (расстояние от центра круглой оправки до нейтрального волокна); тогда, если l_1 — длина вытянутого волокна, можно написать (рис. 341):

$$\frac{l_1}{l} = \frac{\rho + \frac{a}{2}}{\rho} \quad \text{или} \quad l_1 = l \frac{\rho + \frac{a}{2}}{\rho}$$

и далее относительное удлинение:

$$E = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{\rho + \frac{a}{2}}{\rho} - 1 = \frac{a}{2\rho},$$

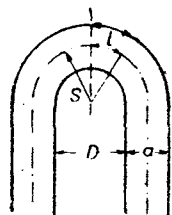


Рис. 341.
Проба на
перегиб
(ОСТ)

т. е. величина напряжения зависит от толщины планки и радиуса кривизны. Отношение обеих этих величин дает удобный масштаб для определения надежности материала. Для употребительных на практике соотношений Мартенс¹ дает следующую таблицу:

$D : a$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\rho : a$	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
E	1,00	0,67	0,5	0,40	0,33	0,28	0,25

Тетмайер предложил считать масштабом качества величину 100 э. Если представить себе, что закругление дошло до полукруга и внутренние стороны пробного бруска сошлись вплотную, так что $\rho = 0,5a$, то

$$E_{\max} = 100 \frac{a}{2 \cdot 0,5 a} = 100,$$

и если брусок вообще не переносит никакого изгиба, т. е. $\rho = \infty$,

$$E_{\min} = 100 \frac{a}{l \infty} = 0.$$

Таким образом предложенный Тетмайером масштаб качества может быть обозначен как величина изгиба:

$$Q = 50 \frac{a}{\rho}$$

и заключается между величинами 0 и 100.

Но хотя угол изгиба не может служить мерой истинного напряжения материала, он все же имеет известное значение для суждения

¹ А. Мартенс, Испытание строительных материалов, пер. Шафранко, т. II, 1910.

о качестве материала и именно тогда, когда изгиб с самого начала проходит вокруг оправки. Именно — чем больше угол изгиба, тем большая длина пробного бруска принимает участие в напряжении и тем большая вероятность, что в пределах этой части найдется такое место в бруске, которое может послужить причиной появления поперечной трещины. А так как обнаружение таких мест и составляет цель пробы и при этом можно исследовать непосредственно, не имеется ли в материале таких мест, которые могут послужить причиной образования трещин, то весьма целесообразно при правильном выборе требовать, чтобы во всех случаях угол изгиба доходил до 180° .

При изготовлении пробных планок необходимо на тех местах, где впоследствии произойдет изгиб, закруглить кромки радиусом около $\frac{1}{4} a$; иначе на острых гранях легко появляются трещины, которые характеризуют не плохое качество материала, а неправильно приготовленный образец.

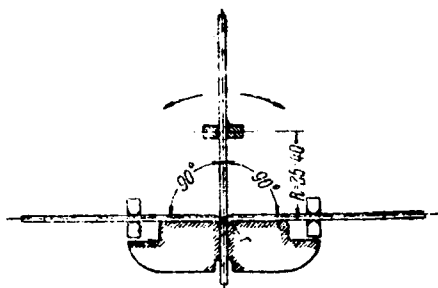


Рис. 342. Проба на навивание проволоки (ОСТ)

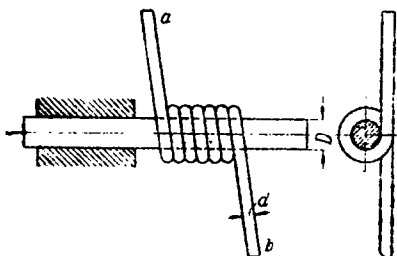


Рис. 343

Особые технологические пробы разработаны для испытания пластичности проволок. К числу их относятся пробы на скручивание, перегиб (рис. 342) и навивание (рис. 343). При оценке способности проволоки скручиваться устанавливают число скручиваний на 360° до разрушения проволоки длиной 200 мм. При испытании на перегиб устанавливают число перегибов до разрушения проволоки. Загиб производится попеременно в правую и левую стороны на 90° со скоростью не более 60 перегибов в минуту. За один перегиб считается загиб на 90° и разгиб на 90° .

Проба на навивание состоит в том, что проволока навивается плотно прилегающими витками по винтовой линии на цилиндр определенного диаметра. Оценкой этой пробы служит отсутствие на проволоке после навивания расслоений, трещин, надрывов и т. п.

Для испытания пластичности листового материала, применяемого для штамповки, вытяжки и т. п., широкое применение получила проба на продавливание по Эриксену. Эта проба производится на специальном приборе, изображенном на рис. 344.

Испытуемый образец помещается между матрицей *a* и пуансоном *b* и плотно прижимается винтом *c* к матрице *a*. Прижатие осуществляется поворотом маховика *d*, который насажен на винт *e*, скрепленный защелкой *g* с винтом *c*. Осуществив прижатие, отжимают защелку *g*. В таком положении деталь *c* служит уже гайкой для винта *e*. Вращая теперь маховик *d*, производят вдавливание в испытуемый материал пуансона *b*. При этом следят в зеркало *h* за появлением первой трещины в испытуемом образце. С появлением трещины вдавливание прекращают и по измерительному кольцу *i*, одно деление ко-

торого соответствует перемещению винта e на 0,01 мм, определяют глубину вдавливания, вызвавшую трещину в испытуемом материале.

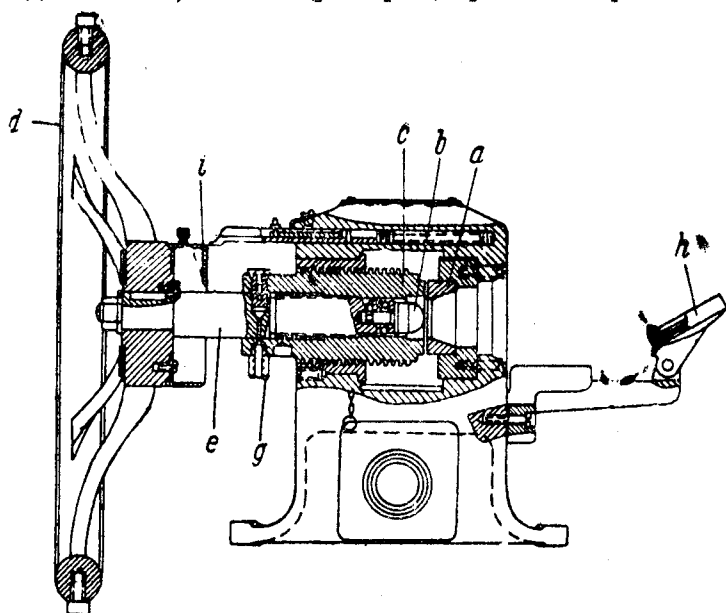


Рис. 344. Прибор Эриксона

В табл. 32 даны соотношения между размерами образцов, пуансонов и матриц.

Таблица 32

Толщина листа мм	Размеры сторон квадратных об- разцов	Диаметр пуансона мм	Диаметр отверстия в матрице, мм
До 1	10—20	3	8
» 1,5	20—30	8	11
» 1,5	30—70	14	17
Не более 2	70—90	20	27
2—4	70—90	14	27

2. Кузнечные пробы

Кузнечные пробы производятся в горячем и в холодном виде. Наиболее распространенной является проба на раздачу.

Проба на раздачу заключается в том, что плоский брусок ударами молотка раздается вширь и вдоль; при этом заранее предписывается, во сколько раз ширина b_1 или длина l_1 должны превзойти первоначальную b или l и во сколько раз толщина a , должна быть меньше прежней толщины a . Испытание продолжается до тех пор, пока не появятся трещины на ребрах. Расплющенный во время испытания образец должен иметь по возможности повсюду одинаковую толщину. Масштабом для суждения о качестве материала рекомендуется применять при раздаче вширь (m) или при вытягивании вдоль (D) следующие значения:

$$m = \frac{b_1}{b} \cdot 100 \text{ или } D = \frac{l_1}{l} \cdot 100.$$

Для заклепочного материала применяется проба на осадку. Чаще всего эта проба производится над цилиндром, высота которого равна двум диаметрам. Осадка производится при светлокрасном калении до появления трещин, и масштабом для суждения о качестве материала принимают величину осадки.

Кроме этих проб к группе кузнечных относят также и пробы на раздачу отверстия (дыры) при помощи конусообразной оправки, пробу на сварку материала и, наконец, испытание на ковкость материала, состоящее в выковывании острых предметов; в этом случае поверхность должна получиться цельной и не должно быть признаков расслоения материала.

3. Разные испытания

Число разновидностей технологических проб весьма велико. В технических условиях можно встретить целый ряд весьма своеобразных проб, и число их еще увеличится, если принять во внимание те методы испытания, которые применяются непосредственно в производстве. В качестве примеров, характеризующих разнообразие этих проб, ниже приводится описание некоторых из них.

а. Испытание стальных шариков. Пейтц построил прибор для сравнительных исследований упругости и твердости стальных шариков для шариковых подшипников. Испытуемые шарики (рис. 345), следуя друг за другом по желобку, падают на ровную твердую плиту под известным углом. От этой плиты определенной упругости и твердости шарики отскакивают на различную высоту и на своем пути должны перепрыгнуть через поставленное на соответственной высоте препятствие, если они пригодны для своего назначения. Таким простым методом, идея которого имеет много общего с идеей испытания твердости по Шору, отсортировываются непригодные и не отвечающие своему назначению шарики.

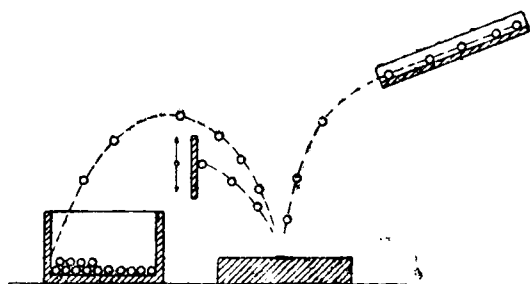


Рис. 345.

б. Определение температуры закалки по изломам. Для грубого определения температуры закалки стали пользуются способом, предложенным Меткалфом, заключающимся в том, что берут брусок испытуемой стали (например квадратного сечения 15—20 мм), слегка надрезают его на 8—10 частей длиной около 15 мм и нумеруют эти части. Затем брусок подвергают нагреву таким образом, чтобы один конец был нагрет до белого каления, а другой оставался еще темным (около 500°). Нагретый брусок закалывают и после окончательного охлаждения разламывают по надрезанным сечениям. Наиболее мелкий, фарфоровидный излом будет характеризовать собой правильно закаленную часть. При известном навыке легко устанавливается цвет каления этой части.

в. Определение температуры заковки при помощи компаса. Для получения полной заковки стали, как известно, необходимо нагреть ее до области твердого раствора. При этом магнитное железо α переходит в немагнитное λ . Этим обстоятельством пользуются для определения надлежащей температуры заковки. Исчезновение магнитных свойств определяется компасом, к которому подносят нагретое изделие. При этом следует принять во внимание, что этот способ пригоден только для твердых сортов стали (инструментальных) и неприменим для мягких. Кроме того, закалочные клещи должны быть изготовлены из немагнитного материала, дабы они не оказывали влияния на стрелку компаса.

г. Определение по удельному весу количества вольфрама, содержащегося в стали. Вольфрам, как известно, обладает большим удельным весом, нежели железо и сталь. Удельный вес последней можно принять равным 7,8, удельный же вес вольфрама 18. В среднем можно считать, что 1% W увеличивает удельный вес стали на $i = 0,05$. Этим обстоятельством пользуются для грубого определения количества вольфрама в стали. Для этого необходимо возможно точнее взвесить куски стали или изделие на воздухе и затем погруженными в воду. Тогда удельный вес выразится:

$$g_x = \frac{g_m}{g_m - g_u},$$

где g_x — искомый удельный вес испытуемого тела, g_m — вес испытуемого тела на воздухе, g_u — вес испытуемого тела в воде.

Процентное содержание вольфрама определится из выражения:

$$w\%_0 = \frac{g_x}{i}.$$

д. Определение сорта стали по искре. Чрезвычайно простым и быстрым способом для грубого распознавания сортов стали является проба по искре.

Испытуемый кусок стали подводится к вращающемуся наждачному диску, и по виду отделяющихся искр можно в грубых чертах судить о сорте стали.

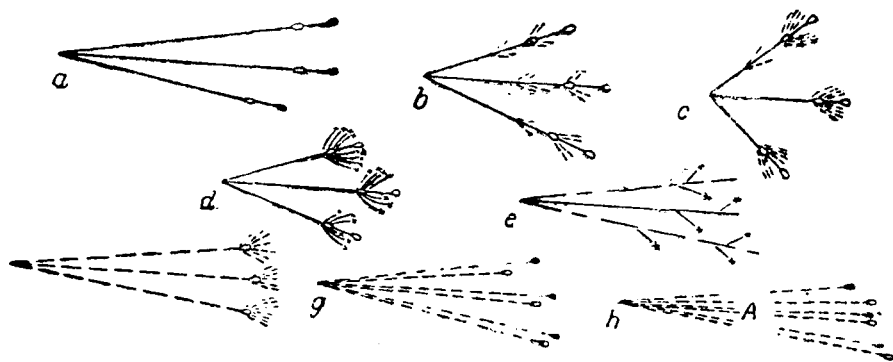


Рис. 346

Этот метод значительно уточняется, если окружить наждачный диск темным футляром, так как в темноте характер искр улавливается легче, нежели при дневном свете. Полезно также иметь заготовленные образчики определенных сортов стали. Тогда, сравнивая искры испытуемого куска с искрами известных образчиков, легко остано-

виться на примерном сорте. При этом следует всматриваться в весь пучок искр, а также улавливать характер каждой искры в отдельности.

Для мягкого железа искра имеет вид прямой линии, на концах которой имеются две капли (рис. 346, а), первая из которых — светлого каления, вторая же — темнокрасная. Вся искра светлая. Пучок искр продолговатый и длинный.

При увеличении содержания углерода от первой капли начнут отделяться новые искры (рис. 346, б), светлые. Пучок короче и шире.

В твердых сортах углеродистой стали от первой капли отделяется целый сноп светлых искр (рис. 346, в). Пучок еще короче и шире.

В марганцовистых сортах стали на концах искр, отделяющихся от первой капли, наблюдаются звездочки (рис. 346, д). Вид пучка зависит от содержания углерода.

В хромовых сортах стали цвет искры красноватый. Пучок длинный. Искра иногда с разрывом и с характерно отделяющимися звездочками (рис. 346, е).

Вольфрамовая сталь имеет искру темнокрасную и не сплошную, а пунктирную (черточки) со светлой каплей на конце (рис. 346, ф). При испытании необходим сильный нажим.

Хромовольфрамовая быстрорежущая сталь средней твердости имеет двойную искру: тонкую — темнокрасную и толстую — кирпично-красную (рис. 346, г). Искра прерывается (черточки) со светлыми каплями на конце. Пучок длинный. При сильном нажиме от капли отделяются отдельные искры. Быстрорежущая твердая сталь имеет такую же искру, как и сталь средней твердости, с той лишь разницей, что искра имеет разрыв А (рис. 346, h).

е. Метод больших чисел.¹ При исследовании какого-либо фактора обычно ведут испытания таким образом, чтобы вся обстановка опыта оставалась постоянной, и тогда, изменяя один этот фактор, определяют интересующие свойства. Например, желая изучить влияние содержания углерода в стали на ее механические свойства, можно изготовить целую серию сталей, которые различались бы по содержанию углерода, и затем построить кривые зависимости механических свойств от содержания углерода. Но в этих испытаниях нам пришлось бы приложить большие усилия, чтобы сохранить полное постоянство данных опыта: способ приготовления стали, состав стали в отношении посторонних примесей, отливку, ковку, термическую обработку и т. п. факторов, которые так же, как и содержание углерода, сильно влияют на механические свойства стали. И даже в том случае, если бы удалось преодолеть все эти трудности и получить в результате плавную кривую изменения свойств, результаты нашего исследования представляли бы собою лишь частный случай, и этими результатами не всегда могло бы воспользоваться производство металлургического завода.

Изучение влияния какого-либо фактора можно произвести в более широком масштабе, пользуясь методом больших чисел. Этот метод представляет собой метод статистики и состоит в том, что влияние какого-либо фактора изучают рассмотрением результатов испытаний очень большого числа образцов, полученных в обычной обстановке.

По такой первоначальной таблице составляют кривую повторяемости. Для этого данные первоначальной таблицы распределяют по классам. Например, если какое-либо свойство меняется от значения

¹ K. D a e v e s, St. u. Eisen, № 3 и № 4. 1925. Internat. Kongress Materialprüf. S., 551—57. Amsterdam. 1927.

1 до 100, то можно данные первоначальной таблицы рассортировать на десять классов: в I классе будут свойства 1—10, во II—11—20 и т. д.

Определив сосредоточенность каждого класса, т. е. сколько из испытанных образцов отнесено в тот или иной класс, можно построить кривую повторяемости. Для этого в системе координат по ординате откладывают в некотором масштабе количество образцов, а по абсциссе — классы или свойства образцов (рис. 347).

Кривая повторяемости обычно имеет один или несколько максимумов. Характер этой кривой позволяет сделать целый ряд важных заключений. Если такая кривая вытянута, то это указывает на большое «рассеивание» результатов испытаний. Тогда, чтобы получить четкий максимум, приходится уменьшать число классов, расширяя при этом интервал свойств каждого класса. Площадки *dea* и *cfg* указывают, например, на количество неудовлетворительных (не принятых) образцов, если, например, технические условия заданы с допусками.

Если на кривой наблюдаются два максимума (рис. 348), то это обстоятельство указывает, что, исследуя один фактор, мы еще не

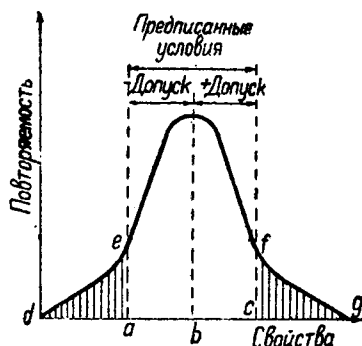


Рис. 347

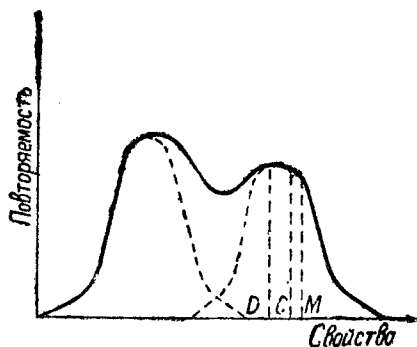


Рис. 348

приняли во внимание второй, который также влияет на изучаемые свойства. В этом случае кривая сосредоточенности может быть представлена в виде двух кривых (указаны пунктиром).

Кривые могут быть симметричными и несимметричными.

Причина несимметрии может состоять в следующем. Предположим, что мы исследовали свойство электропроводности и получили симметричную кривую сосредоточенности. Если воспользоваться теми же данными испытаний, т. е. по оси абсцисс откладывать не электропроводность, а величину, ей обратную, — сопротивление, то кривая повторяемости примет несимметричный вид. Этим удастся иногда воспользоваться для получения симметричной кривой сосредоточения, откладывая по абсциссе не величину x , а ей обратную $\frac{1}{x}$.

Для того чтобы можно было сравнить несколько кривых, нужно их строить по равному числу испытаний или же на ординату наносить не число образцов, а процент от общего числа их образцов.

Из кривых повторяемости можно определить несколько важных величин. Например, среднее арифметическое значение M (рис. 348) всех испытаний определится как ордината центра тяжести Σ площади кривой повторяемости, положение которого определяется весьма

просто. Затем можно определять центральное значение C . Это значение делит площадь диаграммы на две равные части; при симметричной кривой распределения это значение совпадает со средним арифметическим значением M . Наконец, по этой кривой определяется наибольшая сосредоточенность D , указывающая то значение, которое встречается при испытании чаще всего. Вообще метод больших чисел особенно удобен при разработке результатов большого числа испытаний, и очень часто данные этого метода позволяют характеризовать качество материала различных поставщиков, ход какой-либо операции термической обработки и т. п., являясь большим подспорьем для лабораторий, производящих массовые контрольные испытания.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Макроанализ	5
1. Изготовление макрошлифов и их травление	5
2. Проявление линий сдвигов в наклепанном железе	11
Глава II. Микроанализ	16
1. Микроскоп	16
а. Оптика микроскопов	16
б. Разрешающая способность объективов	17
в. Увеличение микроскопа	18
г. Световые фильтры	20
д. Осветительные аппараты, штативы	21
е. Типы микроскопов	23
2. Микроанализ	29
а. Выбор места взятия пробы для шлифа	30
б. Изготовление шлифа	31
в. Травление	39
г. Методика изучения микроструктуры	60
д. Определение величины зерна	80
Глава III. Рентгенографический анализ структуры металлов	96
1. Рентгеновские лучи	96
2. Свойства рентгеновских лучей	98
3. Отражение рентгеновских лучей	101
4. Метод Дебай-Шеррера	103
5. Расшифровка Дебай-диаграммы	105
6. Расшифровка интенсивности линий	107
7. Методы съемки рентгенограмм Дебая	110
8. Пример расчета рентгенограммы	112
9. Задачи рентгеноанализа	114
10. Примеры рентгенограмм	114
11. Определение величины кристаллитов	118
Литература	119
Глава IV. Термический анализ	120
1. Электрические лабораторные печи	120
а. Материал печей	120
б. Печи сопротивления с металлической обмоткой	122
в. Угольные печи сопротивления	123
г. Печи с вольтовой дугой	125
д. Вакуум-печи	125

е. Печи высокого внутреннего давления	126
ж. Высокочастотные печи	126
2. Приборы для измерения температур	128
а. Оптические пирометры	129
б. Электрические пирометры сопротивления	136
в. Термоэлектрические пирометры	137
г. Терморегуляторы	150
3. Методы определения критических температур	151
а. Кривая: температура — время	151
б. Кривая: температура — скорость охлаждения	153
в. Кривая: температура — обратное значение скорости охлаждения	154
г. Кривая: температура — разность температур образца и эталона	156
д. Кривая: температура — производная разности температур образца и эталона по температуре	156
е. Определение критических температур	157
ж. Регистрирующий пирометр академика Н. С. Курнакова	159
з. Регистрирующий пирометр Ле Шателье — Саладена	165
и. Прибор Дежана	167
4. Методика построения бинарных диаграмм состояния	167
Глава V. Другие физические методы исследования металлов	171
1. Электропроводность	171
2. Испытание магнитных свойств	175
а. Общие сведения	175
б. Некоторые методы магнитных измерений	180
в. Определение изменения магнитных свойств при нагревании и охлаждении	189
3. Дилатометрия	190
а. Первый тип дилатометра Шевенара	191
б. Второй тип дилатометра Шевенара	192
в. Универсальный прибор Эссера-Обергоффера	193
4. Термоэлектрический метод	195
5. Метод электродвижущих сил растворения	196
6. Изучение плотности сплавов	197
7. Коррозионные испытания	200
Глава VI. Дефектоскопия	206
1. Визуальный метод	206
2. Керосиновая проба	207
3. Акустический способ	207
4. Рентгеновский метод	208
5. Электрометрический метод	209
6. Магнитный метод	210
7. Индукционный метод	212
8. Пондеромоторные индикаторы	213
9. Термоэлектрический метод	214
Глава VII. Методы испытания механических свойств	216
Введение	216
1. Испытание на растяжение	216

а. Диаграмма растяжения	216
б. Определение сжатия поперечного сечения и относительного удлинения	220
в. Временное сопротивление разрыву	227
г. Определение пределов текучести, упругости и пропорциональности	227
д. Зажимы	231
е. Машины для испытания на растяжение	232
2. Испытания на сжатие, изгиб, кручение и срез	233
а. Сжатие	233
б. Изгиб, кручение и срез	240
в. Величина пластической деформации, обуславливающая предел текучести при сжатии, изгибе и кручении	244
3. Испытание динамической нагрузкой	247
а. Растяжение и сжатие	247
б. Изгиб	249
4. Испытание на усталость	254
5. Машины для испытания усталости металлов	259
а. Машина, работающая на изгиб	259
б. Машина, работающая на растяжение — сжатие	262
в. Машина для испытания на ударную усталость	264
6. Испытание механических свойств при высоких температурах	265
а. Температура	269
б. Деформация	269
в. Нагрузка	269
г. Время	269
7. Быстрые методы изучения ползучести металлов	270
а. Общее	270
б. Метод Бейли и Робертса	270
в. Метод Помпа и Дамена	271
г. Метод Гатфильда	272
8. Испытание на износ	272
Глава VIII. Испытание твердости	275
1. Метод вдавливания	275
2. Метод царапания	283
3. Склероскоп Шора	283
4. Маятниковый прибор Герберга	285
5. Прибор Кесснера	286
Глава IX. Технологические пробы	288
1. Испытание на загиб и закручивание	288
2. Кузнечные пробы	291
3. Разные испытания	292
а. Испытание стальных шариков	292
б. Определение температуры закалки по изломам	292
в. Определение температуры закалки при помощи компаса	292
г. Определение по удельному весу количества вольфрама, содержащегося в стали	293
д. Определение сорта стали по искре	293
е. Метод больших чисел	294

Редакторы:

И. А. Сировский и Л. Я. Либерман

Подписано в печать 29/1 1944 г.

Уч.-изд. л. 27,25

Печ. л. 18 $\frac{3}{4}$ + 1 вкл.

Зн. в 1 п. л. 59400

Л25618

Тираж 10.000

Заказ. 499.

Цена 30 руб.

Типография Металлургиздата
Москва, Цветной бульвар, 30

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
48	23-я сверху, реактив 21, 5-я колонка	(Fe_4W_2)	$(\text{Fe}_4\text{W}_2)\text{C}$
49	5-я сверху, реактив 24, 2-я и 3-я колонки	Красная кровяная соль $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ КОН Вода	Красная кровяная соль $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ КОН Вода
		1—4 г 10 мл	1—4 г 10 100 мл
54	18-я снизу, реактив 62, 2-я колонка	Профильтровать и добавить к HNO_3 (уд. вес 1,32)	Профильтровать и добавить HNO_3 (уд. вес 1,32)
		60 ,	60 ,
100	24-я снизу	$\lambda_\beta = 1,889 \text{ \AA}$	$\lambda_\beta = 1,389 \text{ \AA}$
111	1-я снизу	$2\theta_{\min} > \psi$	$2\theta_{\min} < \psi$
127	4-я снизу	Это оборудование может состоять из одного генератора при сравнительно низком числе периодов или же из агрегата приборов: трансформатора, конденсатора и прерывателя.	Источником тока высокой частоты служит машинный или ламповый генератор или же прерыватель. Кроме того, установка требует применения трансформатора, конденсатора и других приборов.
164	5-я снизу	на стр. . . .	на стр. 140
166	Рис. 198	Общий вид пирометра Ле Шателье-Саладена	Кривые записи пирометра Ле Шателье-Саладена
167	Рис. 199	Кривые записи пирометра Ле Шателье-Саладена	Общий вид пирометра Ле Шателье-Саладена
182	23-я снизу	$\frac{I'}{F \mu}$	$\frac{I'}{F' \mu'}$
188	24-я сверху	$W = W_g + W_f = W - \left(i^2 r - \frac{e^2}{R} \right)$	$W_{ж} = W_g + W_f = W - \left(i^2 r - \frac{e^2}{R} \right)$
275	23-я сверху	$h = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$	$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$

