

1972

И. А. ОДИНГ

669

0-42

Д Е П

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

И. 7402

О Н Т И • М Е Т А Л Л У Р Г И З Д А Т • 1934

Проф. И. А. ОДИНГ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ

Л282061
М-7402

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
ЛЕНИНГРАД * МОСКВА * СВЕРДЛОВСК * 1934

АННОТАЦИЯ.

Книга „Современные методы испытания металлов“ представляет собой пособие для работников заводских лабораторий и исследовательских институтов и студентов вузов. В третьем издании заново переработан отдел макро- и микроскопических методов испытания металлов и дополнена глава, трактующая механическое испытание металлов при повышенной температуре.

Автор книги, И. А. Один г., профессор металловедения и руководитель крупной заводской лаборатории, сумел в сравнительно небольшой объем (20—22 печатных листа) включить очень большой материал, охватив все наиболее важные методы испытания металлов (термический анализ, структурный анализ, механические и технологические методы испытания и т. д.).

Ответственный редактор Н. А. Шаломиников.

Сдана в набор 1/VI 1934 г.

Формат 62X94.

Ленинград № 26534.

Изд. № 39/л.

Бум. л. 73/4.

Тираж 8000—авт. л. 18.

Технический редактор: М. А. Фещенко.

Подписана к печати 26/X 1934 г.

Тит. эк. в 1 бум. листе 110.592.

Заказ 2941.

В-я типография ОНТИ им. Евгения Соколовой. Ленинград, пр. Красных Командиров, 29.

ПРЕДИСЛОВИЕ К 3-му ИЗДАНИЮ.

В третьем издании этой книги значительной переработке подверглась глава о микроанализе сплавов. Большую помощь в этом отношении мне оказал А. Н. Юнаков.

Остальные главы были лишь просмотрены и каким либо существенным изменениям они не подвергались.

И. Одинг.

Октябрь 1934 г.
Ленинградский индустриальный
институт.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО 2-му ИЗДАНИЮ.

Второе издание выходит из печати с некоторыми дополнениями.

Глава II дополнена микрофотографиями наиболее часто встречающихся структур стали; к микрофотографиям даны краткие объяснения. Кроме того в этой главе введен параграф, трактующий о наиболее употребительных методах определения внутренних пороков, а также даны краткие описания новых типов микроскопов Цейсса и Лейтца. Глава III дополнена описанием изучения плотности сплавов. В главе IV расширено описание прессы Гагарина, получающего в данное время все большее распространение, ударной пробы, испытания на усталость и введен параграф об испытании механических свойств при высоких температурах. Наконец глава V дополнена описанием определения твердости по методу Роквелла и Виккерса, а глава VI — описанием метода больших чисел.

Приношу свою благодарность В. А. Андреевскому, А. П. Бокша, О. В. Одинг и С. П. Шихобалову за их помощь, оказанную при переработке этого издания.

И. Одинг.

Ленинград.
1931 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ К 1-му ИЗДАНИЮ.

За последние годы промышленность Запада расходует чрезвычайно большие средства на научно-исследовательскую работу и на содержание и оборудование собственных заводских лабораторий.

Мысль о необходимости иметь свои лаборатории для контроля обрабатываемого материала и выпускаемой продукции, а также и для разработки целого ряда научных вопросов, связанных с производством данного завода, начинает прививаться и у нас, и целый ряд заводов открывает интересующие их лаборатории.

Развитие этого начинания у нас, помимо материальных затруднений в получении требуемых приборов, в настоящее время тормозится еще отсутствием соответствующих лабораторных работников. Литература, трактующая об исследовании материалов, большей частью разбросана в различных научно-технических журналах, что еще более усложняет работу начинающих лаборантов.

Стремление собрать необходимые сведения, касающиеся испытания материалов, и этим помочь начинающим лабораторным работникам и послужило причиной составления этого труда. В своей работе автор исходил из того предположения, что читатель уже знаком с основами металлографии. Вопросы, касающиеся химического анализа металлов, в книге не затронуты ввиду их специального характера.

Считаю долгом выразить благодарность О. В. Одинг за ее помощь в области выборки иностранной литературы и студентам Л. Т. И.—И. Ф. Дмитриеву и Т. А. Лебедеву, разделившим со мною труд по корректуре рукописи.

Ленинград.
1927 г.

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

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. I.

ТАБЛИЦА I (Pirani)

Ватт на 1 см ²	Максимальная температура °C	Ватт на 1 см ²	Максимальная температура
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. I, имеют конечно лишь примерную точность и выведены для среднего качества тепловой изоляции печи в предположении, что температура внешней поверхности печи не превысит 100°С, когда температура рабочего пространства не превышает 1000°С.

Определив мощность W печи и зная напряжение V имеющейся 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. II. В этой таблице даны величины удельного сопротивления материалов при 20°, 100° и 1500°С.

ТАБЛИЦА II (Pirani)

№ по пор.	Материал	Температура плавления °С	Индиффер. атмосфера	Допускаемая предельная температура °С	Удельное сопротивление в омах (длина 1 м поп. сечения 1 мм ²)		
					20°	100°	1500°
1	Уголь	—	CO, H ₂ , N ₂	Свыше 3 000	90	55	50
2	Графит	—	CO, H ₂ , N ₂	Свыше 3 000	20	15	—
3	Уголья, пор.	—	—	Свыше 3 000	80 000	35 000	25 000
4	Вольфрам	3 390	H ₂	Свыше 3 000	0,055	0,33	0,49
5	Тантал	2 270	Вакуум	2 500	0,15	0,57	0,78
6	Молибден	2 570	H ₂	2 200	0,055	0,25	0,33
7	Иридий	2 350	N ₂ (чистый)	2 100	0,053	—	—
8	Платина	1 771	N ₂ , воздух	1 600	0,012	0,53	0,65
9	Силит	—	Воздух, N ₂ , H ₂ , CO	1 500	3 000— —7 500	1 500— —3 100	1 200— —3 000—
10	Нихром	1 550	H ₂ (CO, N ₂)	1 400	0,9	1,25	—
11	Железо	1 570	H ₂	1 400	0,1	1,2	—
12	Никель	1 450	H ₂ (CO, N ₂)	1 300	0,09	1,5	—

Сопротивление печи обычно рассчитывается при комнатной температуре (R_0) и при максимальной температуре печи (R_T). Разность этих сопротивлений $R_0 - R_T$ укажет величину добавочного сопротивления — реостата, которое необходимо включить перед печью. При этом, если $R_0 > R_T$, то реостат вводится постепенно с повышением температуры печи; если же $R_0 < R_T$, то наоборот реостат выводится, по мере того как печь разогревается.

Изоляционные и огнеупорные материалы, идущие на постройку электрических лабораторных печей, указаны в табл. III.

Необходимо принять во внимание, что при повышении температуры увеличивается электропроводность большинства материалов, перечисленных в табл. III.

б) Печи сопротивления с металлической обмоткой. Типичным представителем таких печей является печь системы Негеус'а, изображенная на рис. 1. Она состоит из фарфорового цилиндра r , на который накрута лента платиновой фольги толщиной около 0,007 мм. Применение платиновой фольги объясняется тем, что она дает большую поверхность соприкосновения с фарфоровым цилиндром, а это

ТАБЛИЦА III (Pirani)

Материалы	Температура плавления °C	Допускаемая температура °C	Примечание
Нитрид бора	> 3000	3000	
Карборунд	2540	—	
Оксид тория	> 3000	> 3000	
ZrO ₂	2900	2500	
Оксид алюминия (алунд)	2050	1800	
Алунд	2000	1800	
Оксид магния	2800	2200	Сильное испарение
Оксид бериллия	2450	2200	
Оксид кальция	2600	—	
Хромит	> 2000	1800	
Оксид хрома	2020	—	
Магнезит	1800	1700	
Оксид алюминия (диалунит)	1900	1750	
Шамот	1800	1700	
Марквардтова масса неглазир- ованная	1825	1750	
Марквардтова масса глази- рованная	1550	—	Глазурь испаряется
Кварцевое стекло	1700	1300	
Фарфор мейсенский	1750	1600	
неглазирванный	1650	1400	
глазирванный	—	1150	Глазурь плавится
Стекло	ок. 1100	1000	

обстоятельство дает более равномерный нагрев и позволяет легче регулировать температуру и уменьшает расход платины.

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

Печи Негеуса изготавливаются различных конструкций, смотря по заданию, и максимальная температура в рабочем пространстве без вреда для них доводится до 1300°C. Эту температуру следует считать предельной; нормальной же температурой при продолжительной работе следует считать температуру 1000—1100°C.

Печи обычно устанавливаются в станках, позволяющих передвигать и вращать самую печь (рис. 2).

По принципу Негеуса можно построить печь без применения столь дорогого материала как платина. Для более низких температур можно пользоваться никелиновой, реотановой, железной и т. п. обмоткой, для температур же, превышающих 600—700°C, эти материалы уже не пригодны, 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 индифферентным газом, например водородом и т. п. (см. табл. II). 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°C .

в) Угольные печи сопротивления. Еще большей простотой конструкции отличаются электрические печи, в которых фарфоровый цилиндр с металлической обмоткой заменен цилиндром, материал которого электропроводен. При пропускании тока через такой цилиндр последний разогревается и накаливается.

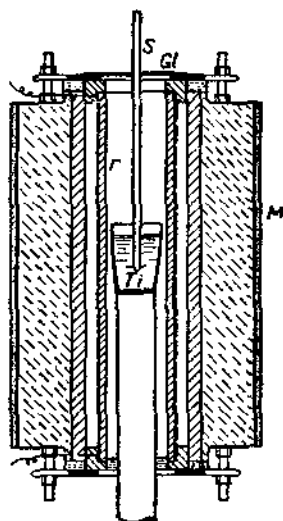


Рис. 1. Печь системы Heraeus'a.



Рис. 2. Печь системы Heraeus'a, изготовленная Термовлектро-прибором.

В качестве материала для изготовления таких цилиндров может служить силит, если температура печи не будет превышать 1400°C . Силит представляет собой патентованную 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 графитовыми цилиндрами. Эти печи имеют то преимущество, что максимальная температура нагрева для них повышается до 3000°C . Но эти печи имеют и некоторые недостатки, а именно: 1) при накаливании угольный или графитовый цилиндр постепенно сгорает и требует замены новым; 2) внутри цилиндра постоянно имеется наугле-

роживающая атмосфера, и 3) благодаря малому электрическому сопротивлению этих цилиндров печь требует ток низкого напряжения и большой силы; за неимением такого тока необходимо применять трансформатор. К неудобствам указанной печи следует еще отнести большой коэффициент расширения угля, что особенно становится заметным при работе с длинными цилиндрами.

Наиболее распространенным типом угольной электрической печи является так называемая криптольная печь (рис. 3). Здесь в качестве материала, через который пропускают ток, служит толченый уголь. Лучше всего применять толченый ретортный кокс или толченые угли вольтовых дуг. 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 шамотовыми цилиндрами *b* и *d*. 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. 3, потребляя 12 киловатт при 220 вольтах, развивала через 3—4 часа температуру в 1600°С.

К недостаткам этой печи следует отнести опять-таки науглероживающую атмосферу внутри печи, выгорание угля, который необходимо подсыпать, 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. 4. Железное ведро *a* обматывается смесью глины с шамотовой мукой *b*, как это указано на чертеже. Тигель обсыпается углем, и ток подводится двумя угольными стержнями. Работа с такой печью чрезвычайно проста.

Вообще же, что касается максимальной температуры, развиваемой в криптольных печах, то она всецело зависит от огнеупорности материала, из которого сделана самая печь. Поднять температуру без повреждения этих печей выше 1600—1700°С удастся редко.

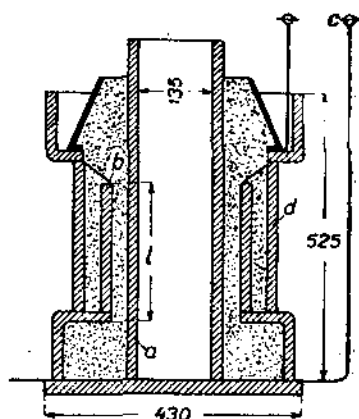


Рис. 3. Криптольная печь.

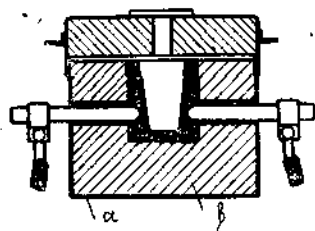


Рис. 4. Криптольная печь.

Для работ при высоких температурах—до 3300 С—можно принять печь типа, предложенного Тамманном. Одна из последних конструкций этой печи подробно описана Левенштейном.¹ Печь Тамманна является короткозамкнутой печью сопротивления, причем роль последнего выполняет угольный цилиндр. Устройство печи следующее. Полый угольный цилиндр *A* (рис. 5) 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, последние снабжена 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

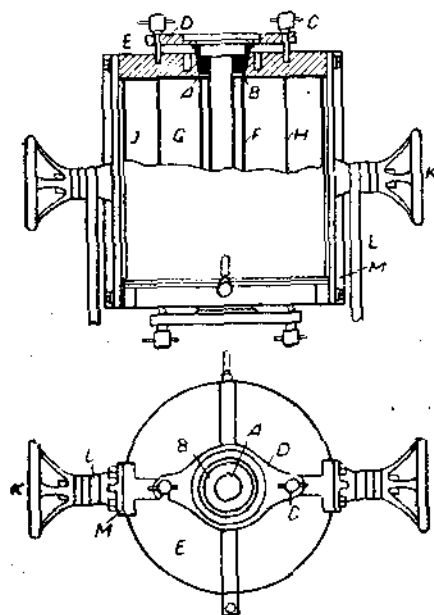


Рис. 5.

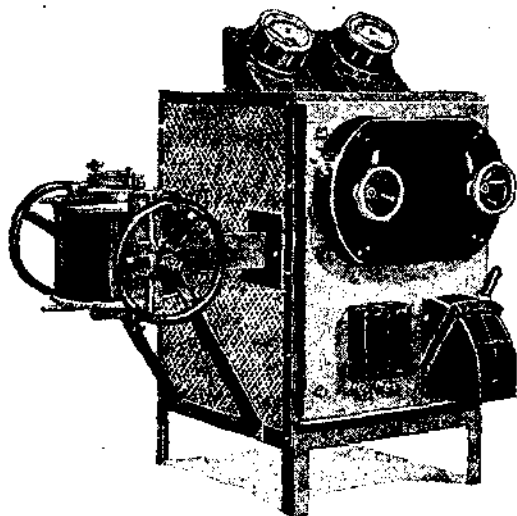


Рис. 6.

угольного порошка *G*, заполняющий пространство между ним и шамотным цилиндром *H*. Далее следует слой асбеста и, наконец — металлический кожух печи.

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

Фирмы Ruhstrat и Elektroschaltwerk строят печи этого типа, потребляющие для нагревания угольного цилиндра ток силою от нескольких сот до нескольких тысяч ампер при вторичном напряжении от 5 до 20 вольт. Регулирование нагрева такой печи произво-

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

дятся при помощи многоступенчатого трансформатора. Потеря энергии при этом управлении печью будет незначительная. На рис. 6 изображен общий вид этой печи.

г) **Печи с вольтовой дугой.** В случаях, когда необходимо получить температуру свыше 1800°C , применяются печи с вольтовой дугой. На рис. 7 изображена такая печь. Это печь системы Simonis'a для нагревания тигля с металлом.

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

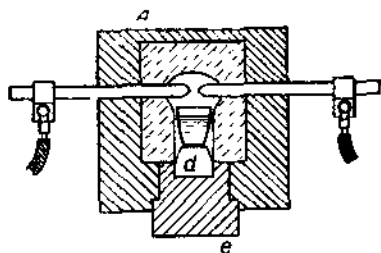


Рис. 7. Печь с вольтовой дугой.

Вся печь изготавливается из хорошего огнеупорного материала. Введенные в печь два угля образуют вольтову дугу, которая и производит нагрев рабочего пространства печи.

д) **Вакуум-печи.** Большое распространение получают за последнее время электрические вакуум-печи. На рис. 8 изображена такая печь системы Arsem'a.

Нагревающийся цилиндр представляет собой трубу, полученную от спиральносвернутой графитовой пластинки. Длина этого цилиндра равна 350 мм при диаметре в 50 мм и толщине стенок 5—10 мм.

Изолятором тепла служит кольцеобразный ящик *K* из графита, наполненный графитовым порошком. Ток подводится к контакту *B* при помощи трубы *r*, охлаждаемой водой. Деталь *A* указывает конструкцию соединения трубы, подводящей ток, с внешними стенками. Плотность, необходимая здесь, чтобы препятствовать проникновению воздуха, достигается свинцовой прокладкой *S*. Изоляторами тока служат фибровые прокладки *F* и *G*.

Печь потребляет около 15 киловатт и развивает температуру до 3100°C . На рис. 9 изображена вакуум-печь Обергоффера.¹

е) **Печи высокого внутреннего давления.** Наряду с вакуум-печами за последнее время большое распространение получают электриче-

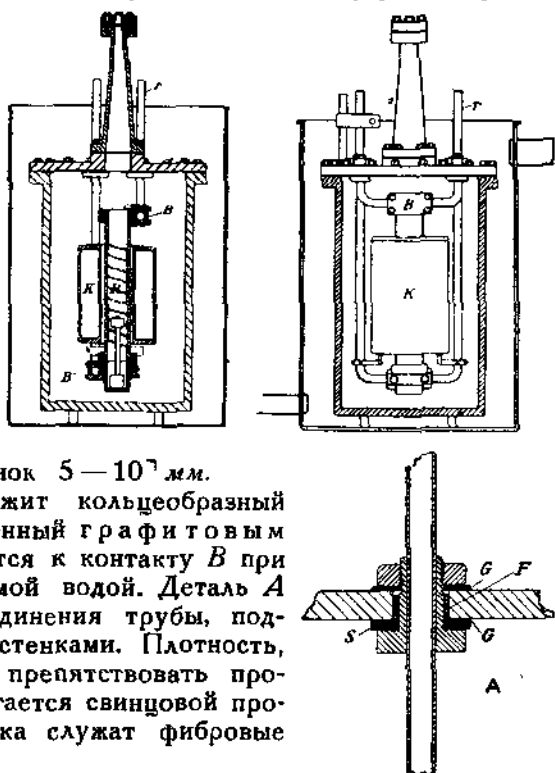


Рис. 8. Вакуум-печь.

¹ Stahl und Eisen, 1927.

ские печи, работа которых должна происходить под большим внутренним давлением. Такой печью пользовался Greenwood в 1912 г. при определении испарения ряда металлов при давлении в 50 атмосфер.

На рис. 10 изображена такая печь. Она состоит из стального цилиндра, покрытого крышкой. Плотность достигается свинцовой кольцевой прокладкой. Электроды сделаны из графита. Один из них покрыт медью и припаян к трубке *F*, охлаждаемой водой. Другой электрод соединяется помощью стальных пластин с чугунной футеровкой, которая в свою очередь соединяется при помощи медных

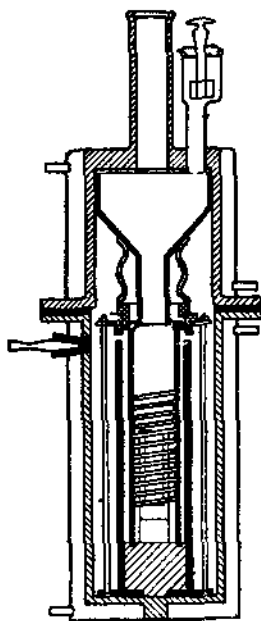


Рис. 9. Вакуум-печь Обергоффера.

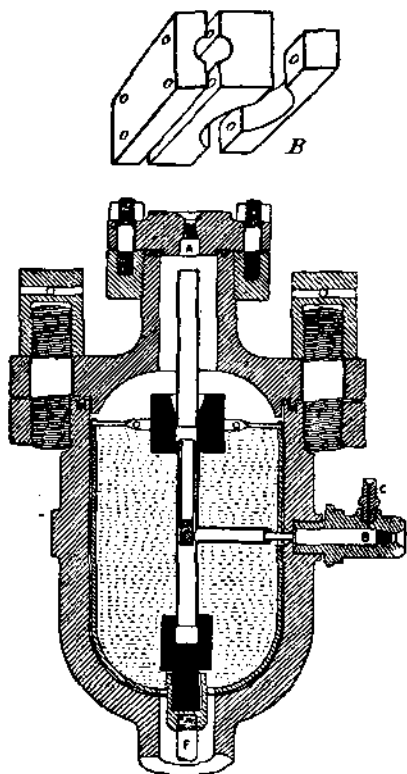


Рис. 10. Печь высокого внутреннего давления.

частей со стальным цилиндром. В отверстия *A* и *B* 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 интересно поэтому развитие за последние 10 лет электри-

ческих печей другого типа — индукционных, работающих на токах высокой частоты.¹

На рис. 11а изображена такая печь. Тигель *b* окружен обмоткой *a*, представляющей собой медную несколько сплюснутую трубку. Через такую обмотку пропускается переменный ток большой частоты — 1000 до 20 000 периодов в секунду. Благодаря такой большой частоте в металле, заложенном в тигле, образуются больших значений паразитные токи, которые разогревают его и расплавляют. Разогревающийся при этом обмотка охлаждается пропусканием через нее воды. Как видно, устройство такой печи весьма простое. Значительно сложнее оборудование для получения тока высокой частоты. Это оборудование может состоять из одного генератора при

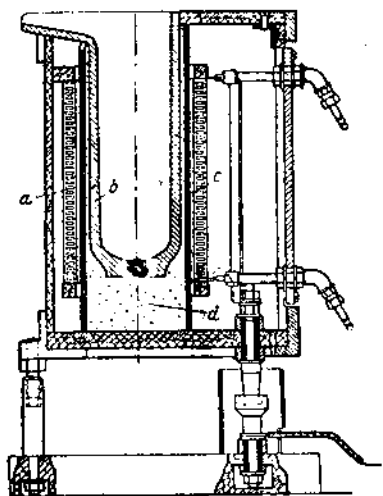


Рис. 11а. Высокочастотная печь.

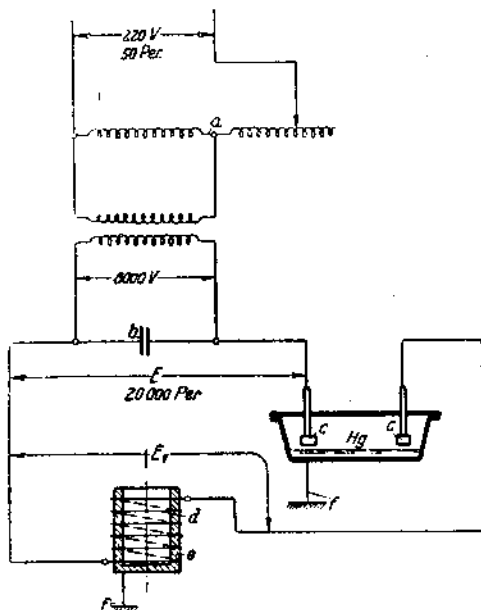


Рис. 11б. Схема приборов высокочастотной печи.

сравнительно низком числе периодов или же из агрегата приборов: трансформатора, конденсатора и прерывателя.

На рис. 11б представлена схема таких приборов для преобразования тока напряжением 220 вольт и частотой 50 периодов в ток напряжением 8000 вольт и частотой 20 000 периодов.

Совершенство работы таких печей гарантирует широкое распространение их в самом ближайшем будущем.

2. Приборы для измерения температур.

а) **Оптические пирометры.** Впервые термический анализ стали произведен русским инженером Д. К. Черновым, причем температура определялась им не при помощи каких-либо приборов, а на-глаз,

¹ Chem. Met. Engg. 19, стр. 115/6 (1918); Trans. Am. Elektrochem. Soc., 35 стр. 69 (189), ('919). Chem. Met. Engg., 20, стр. 381/2 (1919); Iron Age. 103 — стр. 1294/5 (1919); Clem. 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 In., т. II, 1925 E. T. Z., № 7, стр. 225/6. 1925.

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. После того 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 ввести в большую ошибку при определении оттенка цвета каления. Кроме того для определения температуры по цвету каления необходим большой опыт.

Насколько своеобразны определения температуры по цвету каления можно судить по прилагаемой табл. IV, 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.

ТАБЛИЦА IV.

Цвета каления.

Температура °C	F. Rapatz ²	O. Wawzziniok ³
600	Темнокоричневое	—
650	Коричневато-красное	—
700	Темновинное	Темнокрасное
750	Вишневое	—
800	Светловишневое	Темновишневое
850	Красное	—
900	Светлокрасное	Светловишневое
950	Красножелтое	—
1000	Желтое	Светлокрасное
1050	Светложелтое	—
1100	Беложелтое	Оранжевое
1150	—	—
1200	Белое	Лимонножелтое
1250	—	—
1300	—	Светложелтое

В данное время температура определяется исключительно термометрами и пирометрами, и лишь в редких случаях, когда нет под рукой такого прибора, прибегают к помощи невооруженного глаза.

Термометры применяют главным образом для измерения небольших температур, не превышающих 200—250° C. Хотя эти приборы

¹ Изд. „Зап. Русск. Техн. О-ва“, июль, стр. 399 — 440, 1868 г.

² F. Rapatz, Die Ede'stäh'e, 1925.

³ O. Wawzziniok, Handbuch des Materialprüfungswesens, 1923.

изготавливаются и для измерения более высоких температур: стеклянные со ртутью — до 400°C , кварцевые со ртутью — и до 700°C и кварцевые с оловом — даже до 1000°C , но широкого практического применения они все же не получили благодаря своей дороговизне, быстрой порче и целому ряду неудобств в работе. Для измерения высоких температур общее распространение получили так называемые пирометры, которые в зависимости от метода работы разбивают на 2 группы: 1) пирометры оптические и 2) пирометры контактные.

Действие оптических пирометров основано на измерении энергии лучеиспускания; приборы же второй группы 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, измеряющих температуру. 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°C , для световых — около 600°C . 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 = 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 , излучаемым 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.

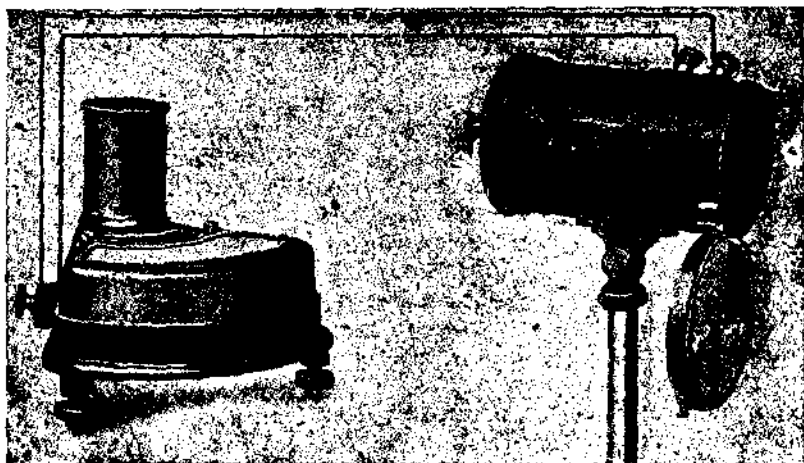


Рис. 12. Пирометр Фери.

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.

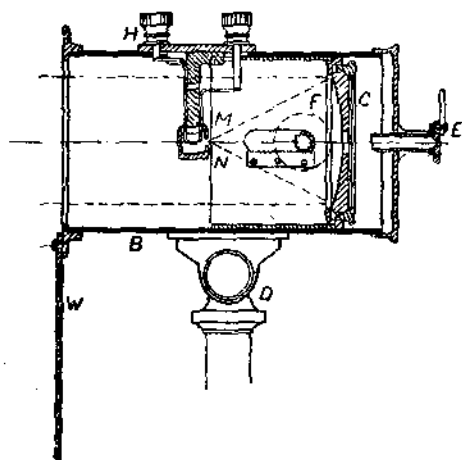


Рис. 13. Пирометр Фери.

Пирометр Фери. Из радиационных пирометров наиболее распространенным типом является пирометр Фери, который изготовляется в нескольких конструкциях. На рис. 12 и 13 представлено устройство наиболее распространенной конструкции этого пирометра.

Пирометр состоит из трубки B , внутри которой помещено позолоченное зеркало C , имеющее отверстие для наблюдения через окуляр E . Тепловые лучи, отражаясь от этого зеркала, собираются в фокусе и здесь нагревают железо-константановую термопару, ¹ электродвижущая сила которой будет тем больше, чем больше нагреется спай

¹ См. отдел о термоэлектрических пирометрах.

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 в температурах при измерении температуры в 1000°C , изменяя расстояние трубки пирометра от печи в пределах от 1 до 20 м.

Тепловым пирометром Ферри возможно измерять очень большой интервал температур — от 600° до 2000°C . При этом при измерении высоких температур пользуются ослабляющими приспособлениями, чтобы не повышать слишком сильно температуру спаев термопары. Обычно эти пирометры снабжаются двумя шкалами, из которых одна дает отсчет от 600° до 1400°C , а другая — от 1000° до 2000°C .

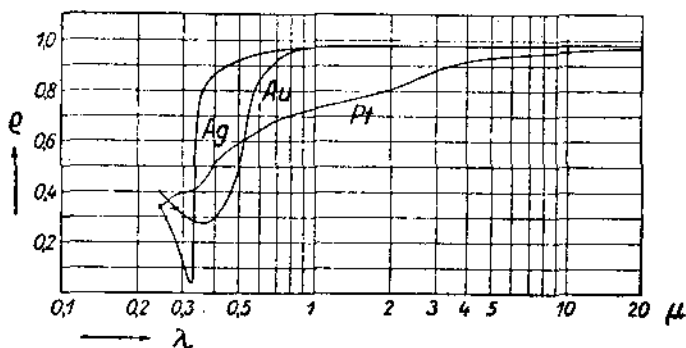


Рис. 14. Изменение коэффициента отражений в зависимости от λ .

Точность измерения температур пирометром Ферри довольно высока и погрешность обычно не превышает 1%.

На правильность измерения температур пирометром Ферри, большое влияние имеет состояние поверхности отражения вогнутого зеркала С. Для того чтобы нагревание спаев 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 золота одинаков для лучей с длиной волны, большей $0,8 \mu$ (рис. 14).

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.

Ардометр. Слабым местом в пирометре Ферри 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.

На рис. 15 изображен такой прибор фирмы Сименс и Гальске, названный ардометром. Действие этого прибора понятно из чертежа.

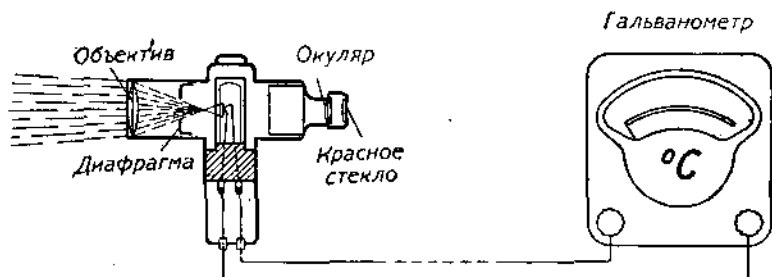


Рис. 15. Ардометр (Сименс-Гальске).

Но если пирометр Ферри 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

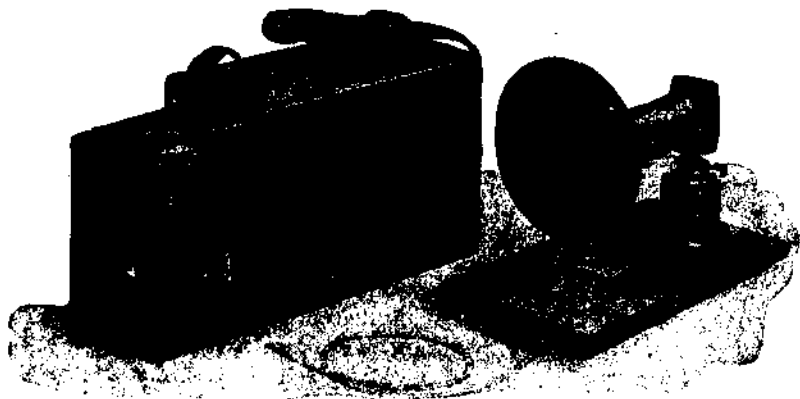


Рис. 16. Пирометр Ваннера

поглощаются меньше. Это обстоятельство вносит некоторую погрешность в этот прибор при измерении температур различных тел.

Пирометр Ваннера.¹ Пирометр Ваннера принадлежит к числу наиболее распространенных типов световых пирометров. На рис. 16 представлен полный комплект всех приборов этого пирометра, выполненного в последние годы.

¹ Wanner, Annalen der Phys., 4. Folge, Bd. L. стр. 141—157, 1900.

На рис. 17 дана схема оптики трубки пирометра. Одна из щелей a освещается измеряемым объектом L , а другая b — нормальным эталоном, в качестве которого здесь служит шестивольтовая 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 обычно-

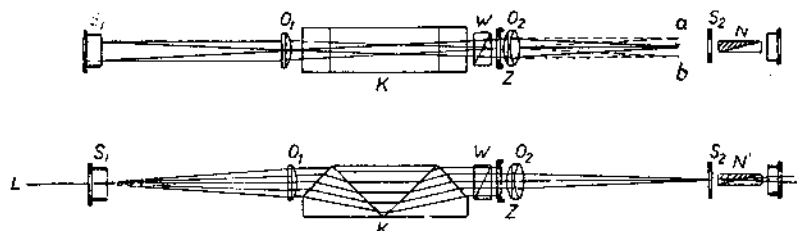


Рис. 17. Оптика пирометра Ваннера.

венные и необыкновенные, поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях.

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 собирательную 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 никелеву 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. 18). Поворачивая окуляр на определенное число градусов, легко привести яркость обеих половин круга к полному совпадению. Отсчитав затем угол поворота окуляра, находим соответствующую температуру.

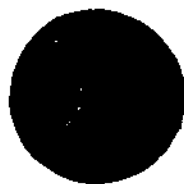


Рис. 18.

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

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

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

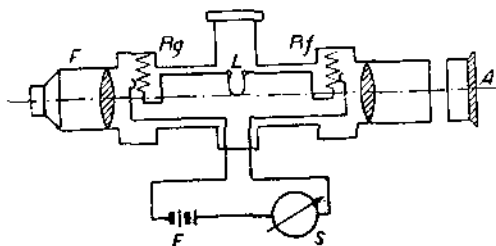


Рис. 19. Пирометр Гольборна и Курльбаума.

Пирометр наводится на такое пламя, и, наблюдаемые в трубку 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 распространённых пирометров, как пирометр Ваннера, следует отнести и пирометр Гольборна и Курльбаума.¹ Он состоит

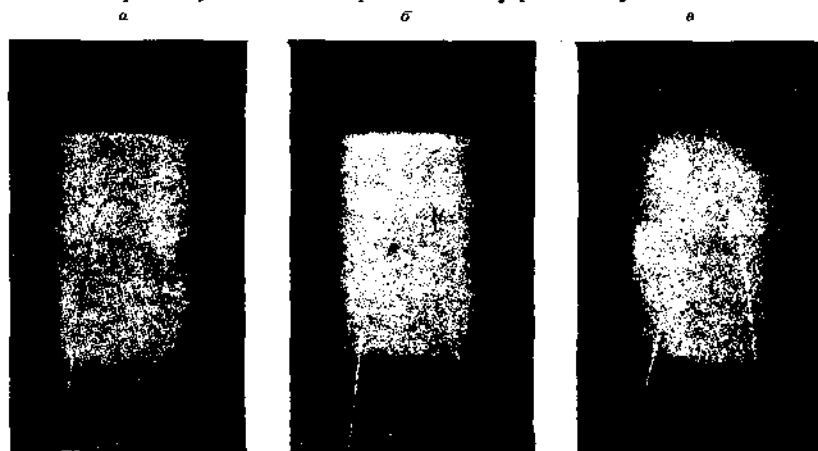


Рис. 20. Измерение температур пирометром Гольборна и Курльбаума.

(рис. 19) из зрительной трубки, внутри которой помещена лампочка накаливания L , так что волосок ее лежит как раз посреди поля зрения. Перед трубкой помещается стекло, окрашенное окисью меди и пропускающее исключительно красные лучи.

Направив трубку на источник света, мы увидим красное поле и на нем черный волосок лампы накаливания (рис. 20а). Пропуская через лампу электрический ток от аккумулятора E и регулируя его

¹ Annalen der Phys., 10, 225—241, 1903.

силу при помощи реостата R_g (грубо) и R_f (точно), мы начнем накачивать волосок лампы до тех пор, пока не получим полного совпадения свечения поля и нити (рис. 20б). Если сила тока будет больше требуемой, то накал нити будет больше, и она будет нам казаться светлее общего фона (рис. 20в).

Сила тока измеряется миллиамперметром S , и по ней судят о величине измеряемой температуры. Обычно шкала миллиамперметра проградуирована уже и в градусах.

Пирометр Н. Tinsley и $С^\circ$. В пирометрах Гольборна и Курльбаума вся аппаратура, как-то: пирометрическая трубка, регулировочный реостат, амперметр и аккумулятор, состоит из отдельных частей. Фирма Н. Tinsley и $С^\circ$ в Лон-

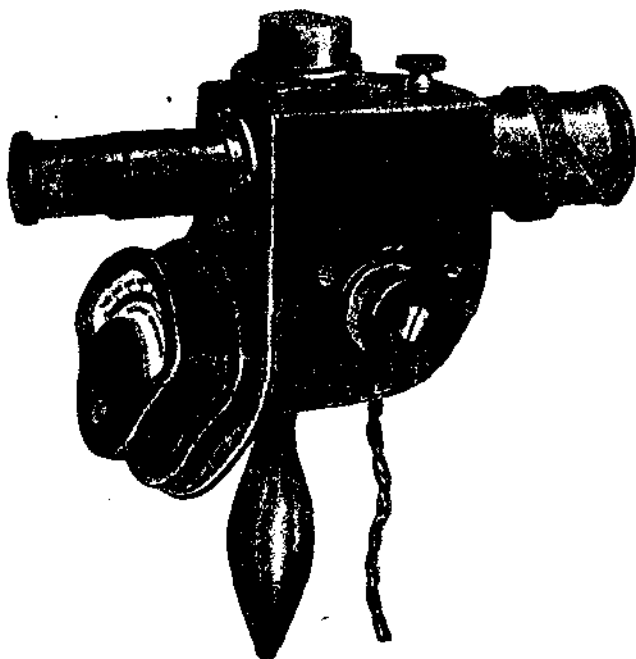


Рис. 21. Пирометр Tinsley.

доне выпустила пирометр (рис. 21), в котором регулировочный реостат и амперметр прикреплены непосредственно к пирометрической трубке.

Кроме того пирометр имеет интересную схему соединения. Эта схема изображена на рис. 22 и представляет собой мостик, одну

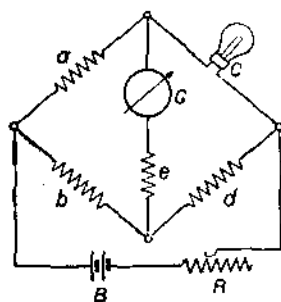


Рис. 22. Схема соединения пирометра Tinsley.

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 значению сопротивления нити лампочки накаливания. Это обстоятельство дает шкалу с более равномерными и крупными делениями. Но, с другой стороны, этот способ 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 при порче лампочки и замене ее новой.

Пирометр Б. Селиванова. В 1925 г. Б. Селиванов¹ описал свой пирометр для измерения высоких температур, названный им пироскопом. Прибор основан на определении точки погасания световых лучей, испускаемых раскаленным объектом.

На рис. 23 представлен пироскоп Б. 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 вычерненной 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 отвинчивают ручку *к*. Жидкость необходимо подобрать соответствующую

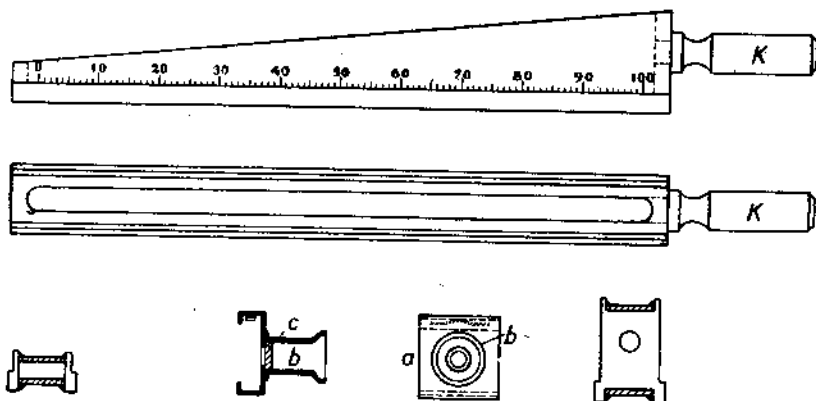


Рис. 23. Пироскоп Б. Селиванова.

щей густоты и ручку ввинтить обратно так, чтобы не оставить воздушных пузырьков. Из жидкостей для наполнения прибора пригодны те, которые не изменяют свою окраску 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 неизменяющуюся в течение долгого времени, и требуют только однократной градуировки.

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 при-

¹ Техника и производство, № 4—5, стр. 101—107, 1925.

бора, и в определенной точке шкалы объект внезапно перестает быть различным, если только жидкость была выбрана надлежащей плотности. Соответствующее положение индекса характеризует температуру объекта. Подбором плотности 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 Foote и Fischer'a. В этом пирометре, как и в пирометре Ваннера, накал нити лампочки остается неизменным. Между объективной линзой и лампочкой накаливания (рис. 24 и 25) установлен клинообразный диск, 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. На-

блюдаемая картина при этом та же, что и в пирометрах Гольборна и Курльбаума. Угол поворота диска укажет значение измеряемой температуры.

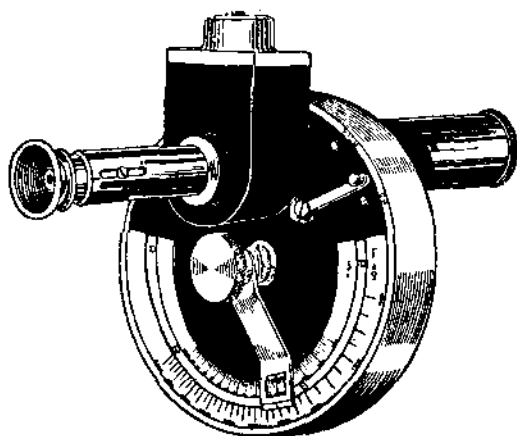


Рис. 24. Пирометр Foote и Fischer'a.

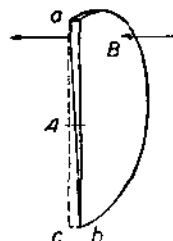


Рис. 25. Клин-пирометра Foote и Fischer'a.

6) Электрические пирометры сопротивления. Действие электрических пирометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления металлов в зависимости от температуры.

По данным Holborn'a,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	0,392
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.

¹ Annalen der Physik, 4, 59, стр. 145—169, 1919.

- 2) Температурный коэффициент должен быть по возможности больше.
- 3) Сопротивление, соответствующее определенным температурам, не должно меняться со временем.
- 4) Изменение сопротивления в зависимости от температуры должно происходить плавно, без скачков и т. д.

Из всех материалов 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°C (критическая температура Ni).

Область применения платиновых пирометров сопротивления распространяется на интервал температур от -200° до $+900^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах эти пирометры быстро изнашиваются, а после многократного нагрева платиновой проволоки выше 900° ее электрическое сопротивление сильно меняется.



Рис. 26. Пирометр сопротивления.

Самый пирометр сопротивления, или как его здесь называют, термометр, состоит (рис. 26) из тонкой ($d = \text{около } 0,3 \text{ мм}$) 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 металлической 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. 27.

Пирометр r_4 составляет одну из ветвей мостика Уитстона. Ток получается от батареи В. 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 удобнее 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

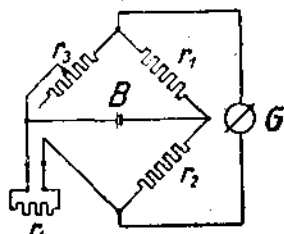


Рис. 27. Измерение температур пирометром сопротивлением.

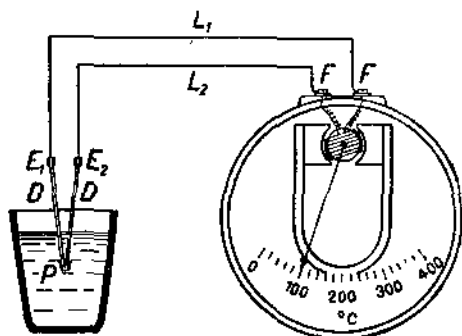


Рис. 28.

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°C) и серы (445°C).

в) Термоэлектрические пирометры. Действие термоэлектрического пирометра основано на следующем явлении: если взять две проволоочки D_1 и D_2 (рис. 28) из различных металлов или сплавов и соединить (сварить, скрутить) с одной стороны концы их (P), то при погружении этого спаянного конца P в среду высокой температуры на других концах E_1 и E_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 L_1 и L_2 концы E_1 и E_2 соединяются с зажимами F_1 и F_2 милливольтметра или гальванометра, стрелка которого будет отклоняться от нулевого положения на тот или иной угол в зависимости от величины разности потенциалов концов E_1 и E_2 .

При выборе материала проволок для изготовления такого пирометра или, как его еще 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.

Выполнение первого требования необходимо для измерения температур с достаточной степенью точности. Второе требование не выполняется при использовании материалами, которые в интервале измеряемых температур сами претерпевают превращение, сопровождаемое критической температурой. Для примера укажем, что по данным Данпескера¹ пара никель-кобальт имеет остановку при -26° и $+813^{\circ}\text{C}$, а пара кобальт-никелин — при температуре -79° и $+450^{\circ}\text{C}$.

Третье требование — долговечность службы термопары — является наиболее важным. При высоких температурах материал термопары окисляется, и она приходит в негодность. Температура до 400°C на применяемые в технике металлы в этом отношении почти не действует. Но уже при более высоких температурах — например, при 450°C — заметно начинает окисляться медь, при 500° — железо, при 600° — константан, при 800°C — более или менее все неблагородные металлы. Платина, не изменяясь, выдерживает температуру до 1200°C , после которой начинается ее распыливание, а это обстоятельство сильно влияет на значение развиваемой электродвижущей силы.

Ниже приводятся значения электродвижущей силы в mV , развиваемой на каждые 100°C 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 . . .	$+4,70$

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°C . Термопара изготавливается из проволок диаметром $0,5$ — $3,0 \text{ мм}$. Верхний предел измеряемой температуры считается 400°C , так как выше начинается сильное окисление меди. Нижний предел измеряемой температуры считают до -250°C .

Серебро-константан. Эта пара развивает примерно такую же электродвижущую силу, как и медно-константановая. Но ввиду того что здесь легко окисляемая медь заменена серебром, верхний предел измеряемых температур выше и равен около 650°C .

Железо-константан. Железо-константановая термопара развивает весьма большую электродвижущую силу — около $5,2 \text{ mV}$ на каждые 100°C , причем для более высоких температур ЭДС повышается до $6,0$ — $6,5 \text{ mV}$ на 100°C . По сообщению Hoffmann'a и Schulze² такая термопара с диаметром проволок в $0,5 \text{ мм}$, работая в течение года при 600°C , продолжала показывать температуру с точностью $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

¹ Ann. der Phys., 42, стр. 1504, 1913.

² E. T. Z., стр. 427, 1920.

Для более высоких температур применяют проволоки более толстые — диаметром от 2 до 4 мм. Следует отметить, что при применении железа с большим содержанием углерода кривая зависимости температуры претерпевает некоторый перегиб при 700—750°C — температуре превращения перлит-аустенит.

Никель-нихром. Никель-нихромовые термопары применяются для измерения температур и выше 900°C. Фирмой Сименс и Гальске выработана нормальная термопара этого типа, и для нее дается следующая зависимость между температурой и электродвижущей силой:

0°C	0 mV	600°C	19,5 mV
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°C. Hoskins предложил изготавливать термопары с большей ЭДС, состоящие из хромеля и алюмеля, причем эти сплавы 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 С.

Нихром-константан. Нихром-константановая термопара применяется в тех случаях, когда необходимо получить возможно большую электродвижущую силу. Эта термопара развивает в среднем около 7,5 mV на каждые 100°C в интервале температур 0—900°C.

Платина-платиноиридий. Эта термопара в настоящее время совершенно вытеснена никель-нихромовой ввиду ее многих недостатков: малой электродвижущей силы (при 1000°C всего 12,6 mV), расплавления иридия при температурах выше 1000°C и т. д. Следует отметить, что она имеет за собой много заслуг в изучении состояния железо-углеродистых и других сплавов, так как является первым типом термопары, предложенным Le Chatelier.

Платина-платинородий. Платино-платинородневая термопара является одной из наиболее употребительных термопар и предложена впервые Le Chatelier (1887 г.). Этой термопарой возможно измерять чрезвычайно большой интервал температур — от 0 до 1600°C, хотя при продолжительной работе не следует превышать температуру в 1200°C. Следует отметить, что ЭДС и продолжительность службы чрезвычайно чувствительны к чистоте металлов термопары. W. C. Heraeus дает для своих термопар (платина, платина + 10% родия) следующую зависимость:

0°C	0 mV	°C	mV
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
900	8,43		

Эти термопары изготавливаются обычно в виде проволочек диаметром 0,5 мм, один из концов которых заваривается 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 Pt 1 м—Pt Rh термопары при комнатной температуре и при диаметре проволок 0,5 мм достигает

платина	0,55 ом,
платинородий	0,90 „

На рис. 29 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 проста, но для получения точных результатов необходимо провести ее 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

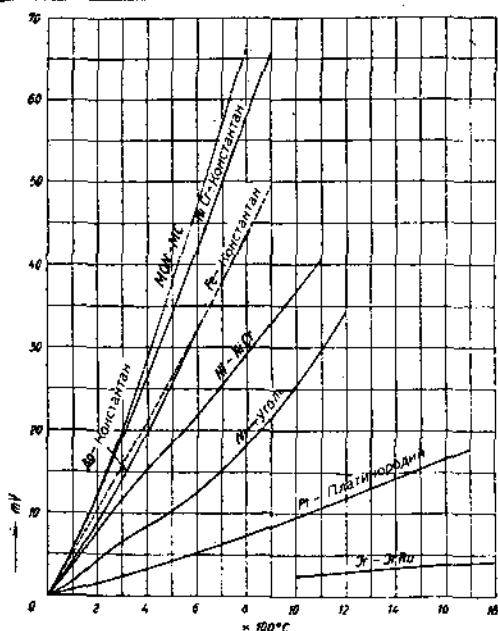


Рис. 29.

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 и за временем. В результате получают кривую $[f(mV, Z) = 0]$ зависимости: изменения электродвижущей силы термопары, — время. Эта кривая будет иметь перегиб (см. методы определения критических температур). 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. 29.

Более точные результаты такой градуировки получаются 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 должны быть покрыты слоем вещества, предохраняющего их от окисления. В маленьких тиглях при расплавлении небольшого количества металла результаты получаются менее точные, лучше применять тигли вместимостью 100 см³ и более. Ниже перечислены металлы и их температуры плавления, которые применяются для градуировки термопар:

	°C		°C		°C
Ртуть . .	— 38,89	Свинец . .	+ 327,4	Золото . .	+ 1063
Олово . .	+ 231,84	Цинк . . .	+ 419,4	Медь . . .	+ 1033
Висмут . .	+ 2 1,0	Сурьма . .	+ 630,0	Палладий . .	+ 1557
Кадмий . .	+ 320,9	Серебро . .	+ 960,5	Платина . .	+ 1764

При градуировке пирометра методом сравнения его с эталонным пирометром необходимо стремиться получить пространство с одинаковой 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 малоомными 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 термолару, сопротивление которой пусть будет равно 2,6 ом. Электродвижущая сила пусть будет равна 15 mV. Если милливольтметр потребует для

такого показания 0,5 mV, то его сопротивление будет равняться 30 омам. 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 ома до 3,6 ома. Тогда гальванометр покажет всего

$$15 \frac{30}{30 + 3,6} = 13,4 \text{ mV,}$$

т. е. на 0,4 mV меньше — это составляет 3%. Ошибка при 1500° достигает 45°C.

Если же внутреннее сопротивление гальванометра было больше, например — 300 ом, 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°C при температуре в 1500°C.

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 спая 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 спаينного (т. е. среды) и свободных концов термопары. Обычно пирометры градуируются при температуре свободных концов 0° или 20°C. В практике же при недостаточно строгом надзоре температура свободных концов достигает 100°C и даже выше. Поэтому необходимо или принять 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 $(t^{\circ} - t_1^{\circ}) s$, где s — некоторый коэффициент, зависящий от формы кривой температуры mV.

С некоторым приближением коэффициент α может быть взят из следующей таблицы: ¹

Pt — Pt Rh		Cu — константан		Железо — константан		Хромель	Алюмель
						Ni — Ni Cr	
Т	С	Т	С	Т	С	Т	С
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 способа вычисления 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°С. Целый ряд фирм изготавливают 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 показания 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 термопар, как например никромовых, 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.

¹ Bureau of Standards. Techn. Paper, № 170, p. 55.

Для дорогих термопар, как например платина-платинородиевой, изготовление компенсационных проводов из платинородия обошлось бы весьма дорого. Поэтому здесь применяют различные патентованные сплавы, дающие одинаковую зависимость T° , mV как и Pt—Pt Rh термопара.

W. C. Heraeus дает компенсационные провода, изготовленные из медноникелевых сплавов, причем несколько близка электродвижущая сила этих проводов к ЭДС Pt—Pt Rh термопары видно из следующих данных: ¹

$T^{\circ}C$	Pt—Pt Rh		Компенсационный провод	
0	0	mV	0	mV
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. 30 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.

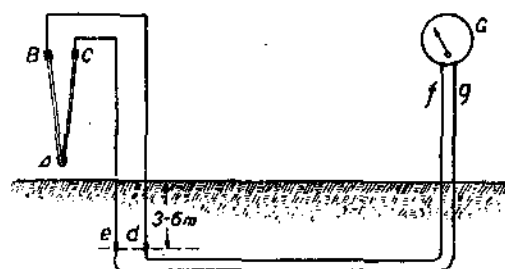


Рис. 30. Установка с компенсационными проводами.

Таким образом при помощи компенсационных проводов можно отвести 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 $20^{\circ}C$.

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 параллельно ² 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 от температуры свободных концов: изменение добавочных сопротивлений

¹ G. Keinhath, Elektrische Temperaturmessgeräte, S. 16, 1923.

² Bureau of Standards, Foote, Scientific Paper 292, S. 12.

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 проволочек термопары и арматуры, которая изолирует эти две проволочки от соприкосновения друг с другом и является защитительной оболочкой от механического воздействия. Кроме того арматура должна быть так сконструирована, чтобы удобно было обращаться с пирометром. Конструкция арматуры зависит от того, в каких условиях будет работать пирометр. Для работы в лабораториях арматура делается легкой; пирометр же, который предназначен для работы в цехах, имеет порой весьма тяжелую арматуру в зависимости от характера работ.

На рис. 31 изображены пирометры, изготовляемые Термоэлектроприбором. 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 проволочек.

Для работы в цехах ставят более тяжелую арматуру. На рис. 32 изображен пирометр, предназначенный для измерения температуры в соляной ванне закалочной мастерской. Термопара одета в специальные фарфоровые трубочки для электрической изоляции проволочек. Поверх этого одеты два железных чехла; внутренний тонкий и наружный с более толстыми стенками. Причина, почему одеваются два чехла, заключается в следующем: когда испортится наружный чехол, расплавленная соль проникнет в промежуток между двумя чехлами; это обнаружится тем, 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 ее без повреждения было бы трудно.

Измерения электродвижущей силы термопары производится двумя методами:

- 1) непосредственным отсчетом показаний гальванометра,
- 2) методом потенциометра.

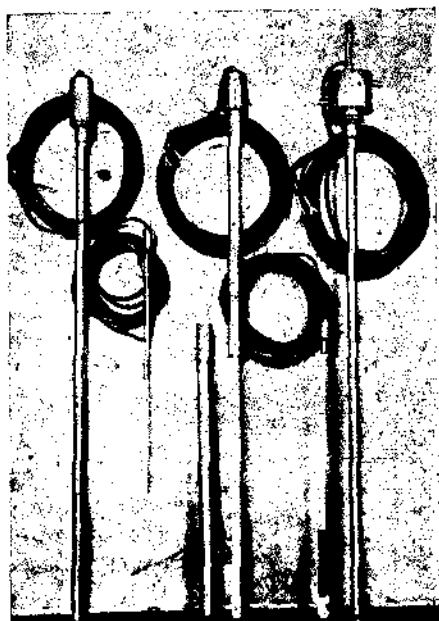


Рис. 31. Термоэлектрические пирометры Термоэлектроприбора.

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. 33) с привинченными к нему железными полюсными башмаками, между которыми для усиления магнитного поля вставляется железный сердечник. При этом образуется равномерное магнитное поле напряжения от 400 до 1500 градусов. В промежуток между железными полосами, башмаками и сердечником вставляется катушка. При прохождении через катушку электрического тока она отклоняется от своего нулевого положения.

Магнит изготавливается из вольфрамовой или хромовой стали. За последнее время начали применять кобальт-хромовую сталь, которая дает значительно большую коэрцитивную (задерживающую) силу.

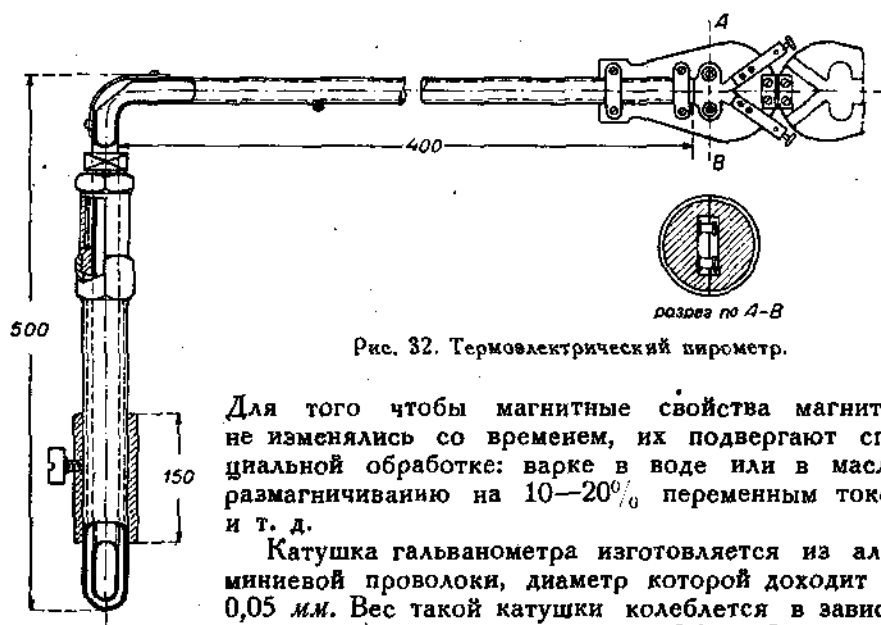


Рис. 32. Термoeлектрический вирометр.

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.

Такая 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 стрелку его 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:

$$M = \frac{2H \cdot i \cdot l \cdot r \cdot n}{9810} \text{ см.}$$

Этому моменту противодействует крутящий момент спиральных пружинок или подвеса. Для него мы имеем:

$$M_{\text{пр}} = \frac{J}{L} \cdot E \cdot \varphi,$$

где J — момент инерции сечения пружинок,
 L — длина пружинок,
 E — модуль упругости материала пружин,
 φ — угол кручения.

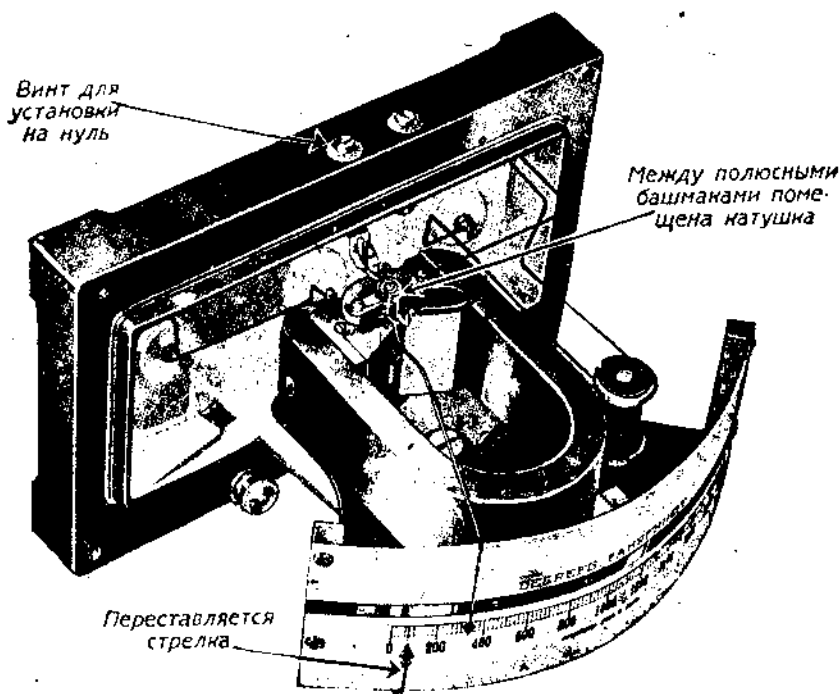


Рис. 33. Милливольтметр.

При равновесии, когда катушка остановится, оба момента равны, т. е.

$$M = M_{\text{кр}}$$

или

$$\frac{2H \cdot i \cdot l \cdot r \cdot n}{9810} = \frac{J}{L} \cdot E \cdot \varphi.$$

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:

$$i = \frac{e}{R_t + R_p + R_g}$$

и подставляя, получим:

$$\frac{2l \cdot r \cdot n}{9810} \cdot \frac{H \cdot e}{R_t + R_p + R_g} = \frac{J}{L} \cdot E \cdot \varphi.$$

Для угла отклонения гальванометра:

$$\varphi = \frac{2 \cdot l \cdot r \cdot n}{9810} \cdot \frac{L}{J} \cdot \frac{H \cdot e}{E (R_t + R_p + R_g)}.$$

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°C (зимой) до 25°C (летом), а иногда в еще более широких пределах. 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; кроме них 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.

Эти недостатки послужили причиной того, что в Америке начали усиленно пользоваться другим 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, высчитывающую электродвижущую силу термопары помощью потенциометра.

2. Измерение электродвижущей силы термопары потенциометром можно производить по нескольким схемам. Наипростейшая схема изображена на рис. 34. 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 0.

Тогда:

$$x = E \frac{R_{AC}}{R_{AB}}.$$

Как видим, в этом уравнении x совершенно не зависит от сопротивления самой термопары.

Lindeck¹ предложил несколько иную схему (рис. 35). Здесь G — опять чувствительный нуль-гальванометр, r — некоторое постоян-

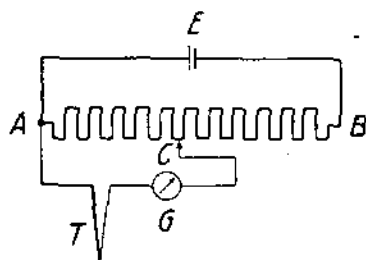


Рис. 34.

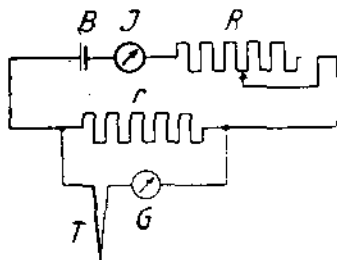


Рис. 35.

ное 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.

Большим недостатком этого метода является то обстоятельство, что ЭДС нельзя отсчитать непосредственно и ее приходится высчитывать. Для устранения этого недостатка предложено несколько видоизменить способ пользования схемой рис. 34. Для этого подбирались определенные сопротивления R_{AC} , которые приводили стрелку гальванометра G к нулю, когда термопара имела температуру например 700° , 800° , 1000° С 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° С, 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 высчитывается и уменьшаются неизбежные ошибки измерения милливольтметром благодаря его неточности. Действительно положим, что точность показа-

¹ Lindeck-Rohbe, Z. f. J. S. 244, 1899 und S. 293, 1900.

ния гальванометра составляет $\pm 1\%$ и что нулевое положение его соответствует 1000°C , тогда

при шкале	$800-1200^\circ \text{C}$	ошибка $\pm 2^\circ \text{C}$	т. е. $0,2\%$
" "	$900-1100^\circ \text{C}$	" $\pm 1^\circ \text{C}$	" $0,1\%$
" "	$950-1050^\circ \text{C}$	" $\pm 0,5^\circ \text{C}$	" $0,05\%$

от измеряемой температуры.

Регистрирующие пирометры. Для регистрации температур к милливольтметру пристраивается часовой механизм, который приводит в движение барабан с натянутой на нем бумагой. Стрелка милливольтметра снабжается графитовым штифтом, который скользит по движущейся бумаге. Движением стрелки и бумаги на последней зарисовывается кривая: температура — время. Такие самопишущие приборы строятся разнообразных конструкций, но обладают 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 остальное время стрелка не касается бумаги. Этим приспособлением в значительной степени увеличили чувствительность прибора. Запись получается пунктирная, но все же чувствительность оказывается мала, и 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 чрезвычайно облегчают работу, давая полную картину температурного режима печей, что в свою очередь позволяет сознательно отнестись к успехам и неполадкам термической обработки, для которой температура и скорости охлаждения и нагрева являются решающими факторами всей операции.

Такие приборы строятся для одновременной записи нескольких кривых, и к ним можно предъявлять 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 минуты.

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

и целого ряда физических свойств как-то: электропроводности, магнитных свойств, объемных изменений 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 значения этих температур, возможно 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, руководствуясь ими, возможна рациональная постановка приготовления металлических сплавов 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 этот термический эффект улавливается приборами, измеряющими температуру.

Поясним это примерами.

Возьмем какое-либо тело, например красную медь, которая в пределах температур от 0° до 1000°C не испытывает никаких превращений. Нагреем эту медь до $800\text{--}900^\circ\text{C}$ и будем ее охлаждать в среде, температура которой остается постоянной, например на воздухе.

Охлаждение будет идти по уравнению:

$$t - t_0 = (T - t_0) \cdot e^{\frac{-c}{ms}z} \quad (1)$$

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 dt образец теряет количество теплоты, равное $msdt$. Эта теплота передается 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, и 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 получили бы кривую, началом которой было бы значение $T - t_0$ на оси Y , и ось X служила бы асимптотой (рис. 36 I, кривая бб).

Рассмотрим теперь охлаждение какого-либо образца, претерпевающего превращение. Здесь следует различать три случая: первый — превращение происходит в 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. 36 I (сплошная). По оси Y отложена температура, по оси X — время. В интервале температур b с имеет место превращение, вызывающее перелом кривой. Температуры b с будут критические температуры. Обозначим через k количество выделяющейся новой фазы из 1 : нашего сплава, обозначим далее dk количество выделившейся новой фазы за период падения температуры на dt и через l обозначим 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 (1) 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:

$$\text{tg } \mu_1 = \frac{dt}{dz} = -\frac{c}{m} \frac{T'' - t_0}{s}.$$

Для участка же ниже b :

$$\text{tg } \mu_2 = \frac{dt}{dz} = -\frac{c}{m} \frac{T'' - t_0}{s - l \frac{dk}{dt}},$$

где T'' — критическая температура.

Значение $\lg \mu_2$ будет тем меньше, чем ближе участок bc и стало быть — чем больше значение $\frac{dk}{dt}$.

II. Превращение происходит при некоторой постоянной температуре. Кривая охлаждения для этого случая изображена на рис. 36 II. Участок bc параллелен оси X , $\lg \mu_2 = 0$ 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:

$$0 = -c(T' - t_0) dz + mdk$$

и интегрируя найдем:

$$c(T' - t_0) z_0 = mlk;$$

$$z_0 = \frac{mlk}{c(T' - t_0)}.$$

Следует отметить, что практически весьма трудно получить в 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 же фаза будет отдавать тепло стенкам прибора, и температура ее будет поэтому несколько ниже. А эту температуру и указывает прибор.

III. Превращение сопровождается переохлаждением. Кривая охлаждения этого случая примет вид, изображенный на рис. 36 III. Сплав, превращение которого (например затвердевание) должно происходить при температуре b''' , переохлаждается до температуры b' . Здесь появляется новая фаза, вызывающая выделение теплоты. Поэтому температура сплава начинает быстро расти до b''' , и в дальнейшем кривая принимает вид кривой рис. 36 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).

б) 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 $b\beta$ будет прямой, проходящей через начало координат (рис. 37 I).

В случае же превращения, совершающегося в каком-либо интервале температур, эта прямая примет вид кривой, изображенной на рис. 37 I (сплошная). При температуре b скорость охлаждения уменьшится и зафиксирована отклонением bb' от направления участка 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 температур.

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. 37 II).

Если процесс сопровождается явлением переохлаждения, то выделение теплоты вызовет на кривой петлю, которая пойдет влево от оси y (ось T), причем некоторый момент скорости охлаждения будет иметь отрицательное значение, т. е. температура образца будет повышаться, а не уменьшаться. Это обстоятельство переместит точку b влево от оси T (рис. 37 III).

в) Кривая: температура — обратное значение скорости охлаждения.

$$f\left(T, \frac{dz}{dT}\right) = 0.$$

Такая кривая охлаждения была впервые построена Osmond'ом при изучении температур превращения сталей. 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:

$$T = y \quad \text{и} \quad x = \frac{dz}{dT},$$

то имеем:

$$x = \frac{1}{my},$$

т. е. кривая $a\beta$ является гиперболой, асимптоты которой служат осями координат (рис. 38 I).

При превращении, происходящем в некотором интервале температур, кривая примет вид, изображенный на рис. 38 I (сплошная).

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. 38 II.

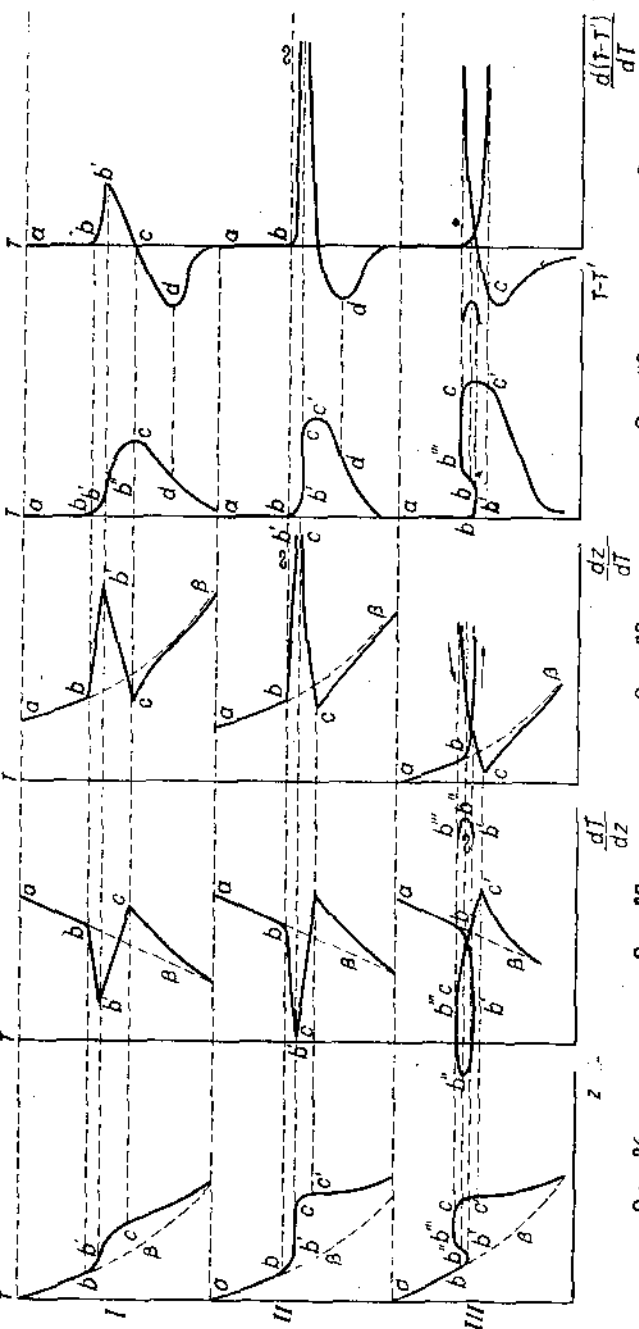
Если же процесс превращения сопровождается явлением переохлаждения, то, как мы видели выше, скорость охлаждения $\frac{dT}{dz}$, переходя через нулевое значение, становится отрицательной. Величина же, обратная $\frac{dz}{dT}$, должна в этом случае пройти значение бесконечности. Кривая для этого случая изображена на рис. 38 III.

г) Кривая: температура — разность температур образца и эталона.

$$f(T, T - T') = 0.$$

Исследуя критические температуры стей, Roberts-Austen предложил

кроме температуры T испытуемого образца определять также температуры T' эталона, который охлаждался или нагревался в оди-



наковых условиях с испытуемым образцом. В качестве эталона служит какой-либо материал, не претерпевающий никаких изменений в интервале исследуемых температур.

Затем на основании данных опыта им строилась кривая зависимости температуры образца и разности температур образца и эталона при данной температуре. Кривые, построенные этим методом, изображены на рис. 39 I, II и III.

Кривая $a\beta$ (рис. 39 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. 39 I (сплошная).

Если же превращение будет происходить при некоторой постоянной температуре, участок кривой bc' (рис. 39 II) будет перпендикулярен оси T .

Явление переохлаждения будет характеризоваться выгибом $bb'b''$, кривой abc (рис. 39 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 Rosenhain'ом, Эта кривая строится на основании значений кривой $f(T, T-T')=0$, подобно тому, как кривая

$$f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0$$

строится на основании данных кривой $f(T, z)=0$.

В обоих случаях абсциссы кривых Rosenhain'a и

$$f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0$$

являются угловыми коэффициентами касательных кривых Roberts-Austen'a и $f(T, z)=0$.

При построении кривых по методу Rosenhain'a по одной оси как всегда откладываются значения температуры T , а по другой откладываются разности температур $d(T-T')$, приходящиеся на определенные и равные интервалы dT .

В случае, когда образец не претерпевает превращения, кривая *Rosenhain'a* *ab* сольется с осью *T*, так как $T - T' = 0$ (рис. 40 *I*).

Если же превращение протекает в течение некоторого интервала температур, кривая примет вид, изображенный на рис. 40 *I*. $\frac{d(T - T')}{dT}$

будет иметь максимум при температуре *b*, наиболее крутого подъема кривой *Roberts-Austen'a*.

При максимуме же этой последней ее угловой коэффициент меняет знак, переходя через нуль, что соответствует точке *c'* кривой *Rosenhain'a*.

В случае если превращение происходит при постоянной температуре (рис. 40 *II*) или же сопровождается явлением переохлаждения (рис. 40 *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 $f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0$ 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 избегнут в последних двух кривых, которые, так же как и две предыдущие, называются дифференциальными кривыми: Так как нагревание и охлаждение испытуемого образца и эталона производится 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 намечаются тогда быстрым увеличением этой разницы. Внешняя среда оказывает здесь одинаковое влияние как на эталон, так и на испытуемый образец, а так как критические точки намечаются 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. 28 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.

При нахождении 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. 41.

Здесь a является испытуемым образцом, b — эталоном. Обе термомпары соединяются с гальванометрами g_1 и g_2 , как это указано на рис. 41. 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 Roberts-Austen'a или Rosenhain'a.

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. 41, 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.

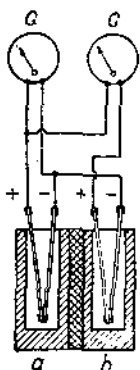


Рис. 41.
Схема установки для дифференциальной записи.

Несоблюдение этого правила повлечет за собой увеличение разности ($T - T'$), что может затенить картину испытания.

Дифференциальный метод определения критических температур применяется главным образом при исследовании сплавов в твердом виде. Был сделан ряд предложений пользоваться этим методом при исследовании сплавов в жидком состоянии, для чего требуются специальные тигли, перегороденные на две части, все же результаты получались не вполне удовлетворительные.

К дифференциальному методу прибегают главным образом в тех случаях, когда превращение сопровождается небольшим термическим эффектом. Этот метод чрезвычайно чувствительный и четко выявляет такие превращения, которые обычным методом были бы замечены. Не 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 первый взгляд весьма простой операцией, скрывает в себе очень много тонкостей, с которыми необходимо считаться и которые необходимо предвидеть.

ТАБЛИЦА V.

Материалы, применяемые при плавлении металлов:

Металл	Материал тигля	Материал, предохраняющий от окисления	Индифферентная атмосфера
Na	Иенское стекло до 860°	вазелин	H ₂
K	Железо	керосин	—
	Иенское стекло	"	та же
	Железо	—	—
Ca	Иенское стекло с асбестом или магниезней	—	CO ₂ , N ₂ , H ₂ , вакуум
Ba, Sr	То же, что для Ca	—	—
Mg	В качестве тигля и предохраняющего слоя смесь: 300 : BaCl ₂ , 100 : NaCl, 150 : KCl	—	—
	Графитовый тигель, выложенный внутри магниезней	KCl, NaCl	H ₂
	Фарфор для сплавов магния	только для сплавов	—
	Стекло для невысоких температур	KCl, LiCl	—
Al	Фарфор при Al-сплавах. Иенское стекло — хуже	KCl, NaCl	H ₂ и N ₂
B	Расплавлять в порошке В	B ₂ O ₃	H ₂
C	Уголь или графит	2BaCl ₂ + KCl	H ₂ и N ₂
Si	Марквардтова масса	—	H ₂ и N ₂
Si	Магнезитовая футеровка	—	—
	Уголь — при невысоких температурах	—	—
	Графит с футеровкой Al ₂ O ₃	2BaCl ₂ + KCl	H ₂ , N ₂
U, W, Mo, Cr	Магнезитовая футеровка	—	—
	Магнезитовый тигель не пористый	—	—
	При малом содержании Cr — марквардтова масса	—	—
Mn	Фарфор при быстрой работе	только не угольным порошком	H ₂
	Лучше магниезня	—	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	2BaCl ₂ + KCl	—
	Магнезитовая футеровка	морская соль	—
Co	Как и для железа; фарфор не годится	NaNO ₃ и MnO ₂	H ₂ и N ₂
		гипс	—
Ni	Как и для железа	как железо	H ₂ и N ₂
Pt	Все материалы, не содержащие углерода	—	—
		стекло	—
Cu	Уголь, графит, фарфор, окись алюминия, магниезня	KCl + NaCl, BaCl ₂ , морская соль, растворяет окиси	H ₂
		B ₂ O ₃ + бура; KCN, NaNO ₃ + MnO ₂ , гипс.	светильный газ
		Толченый древесный уголь	—

Металл	Материал тигля	Материал, предохраняющий от окисления	Индифферентная атмосфера
Ag	Никелевые сосуды Железные сосуды Уголь Фарфор	KCl + NaCl KCN —	H ₂ — CO ₂ светильный газ
Au Zn	Любой тигель Иенское стекло Графит Графитовый тигель	как при Ag KCl + NaCl морская соль NH ₄ Cl + ZnCl ₂ NaNO ₃ + MnO ₂ гипс, угольный порошок KCl + NaCl KCl + LiCl вазелин + бензин угольный порошок	любая N ₂ светильный газ — H ₂ N ₂ CO ₂
Ca, Hg	Иенское стекло Графит Фарфор	порошок KCl + NaCl KCl + LiCl вазелин + бензин угольный порошок	— H ₂ N ₂ CO ₂
Pb, Bi Sn, Sb	Графит	бура	H ₂
Pb, Bi Sn, Sb	Уголь	стекло при высоких температурах KCl + NaCl	N ₂
As, P	Магнезит Магнезитовый тигель Графит	KCl + LiCl, KCN угольный порошок BaCl ₂ B ₂ O ₃ бура и угольный порошок	CO ₂ N ₂ H ₂ —
Te, Se S	Так же как As и P Так же как As и P	— —	— —

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. V¹ указаны материалы, которые применяются для изготовления тиглей и служат предохраняющим от окисления слоем при расплавлении различных металлов.

Как видно из табл. V, материалами, предохраняющими испытуемый сплав от окисления, большей частью служат различные соли. Этими же солями пользуются и при работе с соляными ваннами. Весьма часто бывает удобнее производить нагрев не в воздушном пространстве, а например, в расплавленных солях. Соль расплавляют в тигле и, поддерживая в ней требуемую температуру, производят термическую обработку. При выборе солей необходимо во-первых руководствоваться ее химическим составом, дабы не изменить состав

¹ W. Guertler, Metalltechnischer Kalender, стр. 317, 1925 г.

испытуемого сплава (например KCN — науглероживает железо и т. д.), и во-вторых — температурой плавления соли. В приводимых ниже табл. VI и VII указана температура плавления некоторых солей и их эвтектических смесей.

ТАБЛИЦА VI.
(Landolt-Börnstein).

№ по порядку	Соль	Темпер. плавлен. °C	№ по порядку	Соль	Темпер. плавлен. °C	№ по порядку	Соль	Темпер. плавлен. °C
1	LiCl	610	12	LiNO ₃	253	23	Na ₂ SiO ₃	1 088
2	NaCl	801	13	NaNO ₃	310	24	NaBO ₂	966
3	KCl	780	14	KNO ₃	338	25	KBO 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	1 075	29	KBr	750
8	MnCl ₂	650	19	MgSO ₄	1 120	30	NaClO ₃	302
9	PbCl ₂	495	20	CaSO ₄	1 360	31	KClO ₃	334
10	SnCl ₂	250	21	K ₂ CrO ₄	980			
11	CaF ₂	> 1 300	22	K ₂ Cr ₂ O ₇	395			

ТАБЛИЦА VII.
(Landolt-Börnstein).

Температура плавления эвтектики некоторых солей.

№ по порядку	I компонент	Вес %	Мол. %	II компонент	Вес %	Мол. %	Темпер. плавлен. °C
1	BaCl ₂	22,25	—	NaCl	77,75	—	635
2	Ba ₂ CO ₃	50,0	—	Na ₂ CO ₃	50,0	—	690
3	Na ₂ CO ₃	65,3	—	NaCl	34,7	—	620
4	Na ₂ 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	1 128
11	CaSiO ₃	—	21	NaSiO ₃	—	79	932
12	CuCl	53,4	66	KCl	46,6	34	136
13	CuCl	—	73	NaCl	—	27	314
14	K ₂ Cr ₂ O ₇	—	72	KCl	—	28	366
15	KCl	—	57	KF	—	46	605
16	K ₂ SO ₄	—	29	KCl	—	71	690
17	KCl	—	40	LiCl	—	60	352
18	KF	—	59,5	NaF	—	40	700
19	KNO ₃	—	64	LiNO ₃	—	36	132
20	KNO ₃	—	50,5	NaNO ₃	—	49,5	218
21	MgSO ₄	—	40	K ₂ SO ₄	—	60	747
22	NaBO ₂	—	42	B ₂ O ₃	—	58,5	648
23	NaNO ₃	—	50	LiNO ₃	—	50	208
24	MnCl ₂	—	30	PbCl ₂	—	70	408
25	MnCl ₂	—	46	SrCl ₂	—	54	500
26	MoO ₃	—	75	Na ₂ MoO ₄	—	25	499
27	NaBO ₂	—	64	Na ₂ SiO 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

Вышеописанный метод определения критических температур наблюдением за показанием пирометра и за секундомером не отличается большой точностью, так как трудно бывает уловить всевозможные небольшие колебания температур. Поэтому сейчас все испытания по определению критических температур производятся при помощи специальных регистрирующих пирометров, ведущих запись кривых охлаждения или нагревания световым лучем на фотографической бумаге. Благодаря этому запись получается чрезвычайно четкой и наносится на бумагу без малейшего трения. В качестве измерительных приборов применяются зеркальные гальванометры

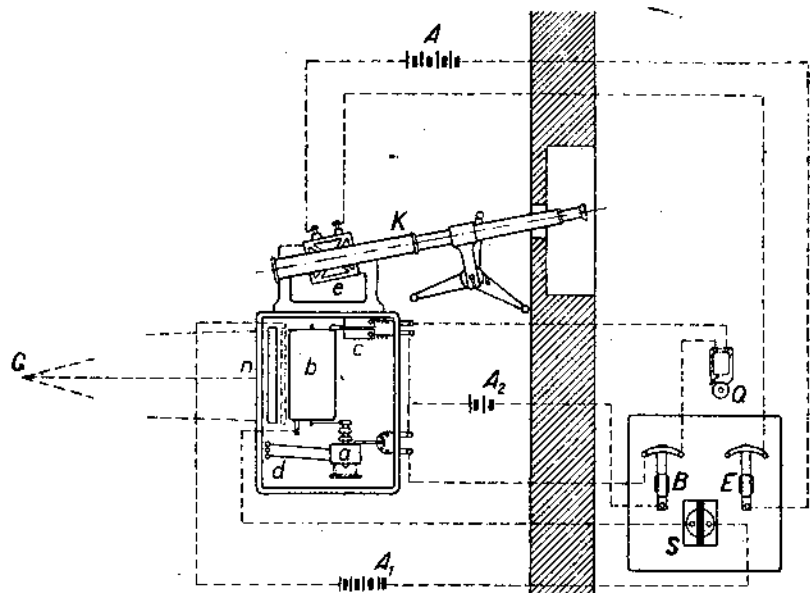


Рис. 42. Пирометр Н. С. Курнакова.

большой частью системы д'Арсонваля, обладающие большой чувствительностью.

В настоящее время имеются приборы, производящие запись по одной из следующих кривых:

$$f(T, z) = 0, f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0, f(T, T - T') = 0.$$

Ниже мы рассмотрим некоторые наиболее совершенные приборы, производящие автоматическую запись термических кривых.

ж) Регистрирующий пирометр академика Н. С. Курнакова. Регистрирующий пирометр Н. С. Курнакова,¹ построенный в 1904 г., является и до сего времени одним из точнейших и чувствительнейших регистрирующих пирометров. Прибор помещается в темной комнате и состоит (рис. 42) из часового механизма *a*, который приводит во

¹ Известия СПб. Политехнического ин-та, том I, вып. 1, вып. 1—2, стр. 183, 1904.

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 0,5, 1,0, 4,0, или 24 часа за один оборот.

Термопара присоединяется помощью медных проводов к зеркальному гальванометру G . Гальванометр имеет два зеркала: одно — неподвижное и второе — подвижное, прикрепленное к рамке, вращающейся в зависимости от электродвижущей силы, развиваемой термопарой.

В фонаре e горит электрическая лампочка, пучек света которой 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).

Если теперь одеть на барабан светочувствительную фотографическую бумагу и пустить барабан вращаться, то светящиеся точки без трения запишут на фотографической бумаге кривые, вид которых будет зависеть от комбинации движения точек и барабана. Конечно запись будет видна лишь после проявления.

Размеры барабана таковы, что его можно обернуть бумагой размером 20×32 см.

На рис. 43 изображены кривые записи прибором Н. С. Курнакова. Линия a получена лучами, отраженными от неподвижного зеркала. Барабан с бумагой совершал движение по направлению оси OY , поэтому при неподвижном зеркале лучи опишут прямую $aa \parallel OY$. Кривая 1 получена движением барабана и вторым зеркалом гальванометра G . Критическая температура при 100 и 512°C здесь ясно выражена, но критические точки при 250 — 275°C 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 дифферен-

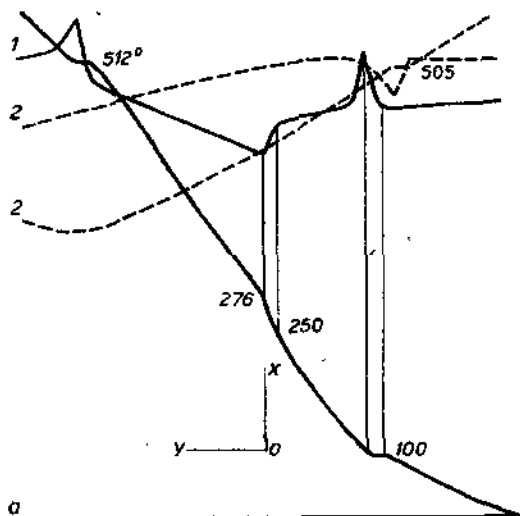


Рис. 43. Кривые записи пиrometerом Н. С. Курнакова.

циальному методу. Для этого ко второму зеркальному гальванометру G_2 присоединяют комбинированную термопару (рис. 41), 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. 43).

На рис. 44 даны еще несколько кривых, записанных на приборе Н. С. Курнакова.

Как было сказано выше, вся аппаратура прибора находится в темной комнате, управление же прибором совершается в соседней светлой комнате от распределительного щита D (рис. 42). Зрительная трубка K позволяет следить за температурой испытуемого образца, не входя

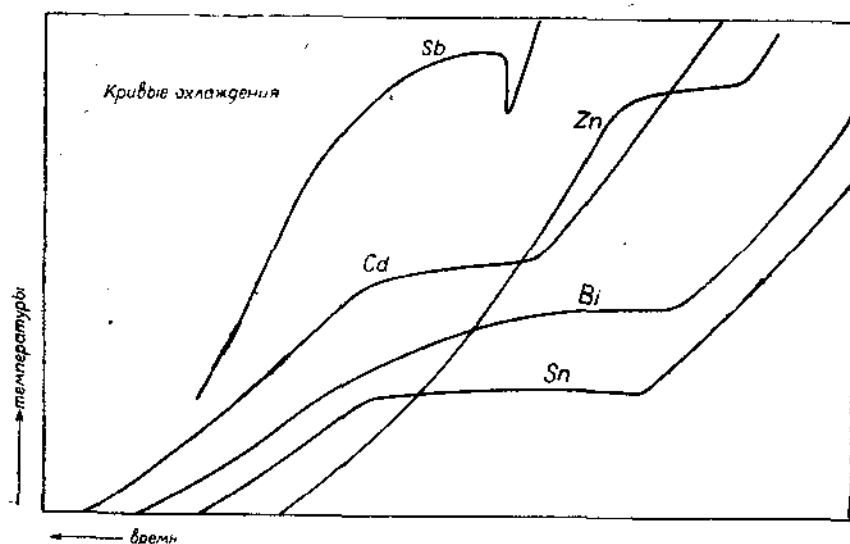


Рис. 44. Кривые записи пирометром Н. С. Курнакова.

в темную комнату. Эта трубка направлена на подвижное зеркало гальванометра G . Зеркало же не только отражает направленные на него лучи от фонаря, но отражает деления шкалы S' , помещенной под барабаном и освещаемой красным светом. Наблюдая из светлой комнаты показание 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 подается сигнал звонком Q . Лаборант, замыкая контакт B , может остановить часовой механизм, не входя в темную комнату.

Зеркальные гальванометры типа д'Арсонава, применяемые для этого прибора, весьма чувствительны и обычно при пользовании $Pt - PtRh$ термопарой весь барабан покрывается при $250 - 270^\circ C$, т. е. 1 мм на бумаге соответствует $1,0 - 1,2^\circ C$ при расстоянии гальванометра от бумаги в 1,7 м. Для работы в области более высоких температур можно или вводить между гальванометром и термопарой

добавочное сопротивление, от чего уменьшится точность отсчета, так как 1 мм на бумаге будет соответственно больше $1,0^{\circ}\text{C}$, или же, чтобы не понижать точности, применять способ компенсации, предложенный также Н. С. Курнаковым.

Способ компенсации заключается в следующем. Положим, мы работаем с термопарой Pt—PtRh, зависимость ЭДС которой от температуры указана на стр. 32. Положим далее, что мы хотим работать в области $700\text{--}900^{\circ}\text{C}$. 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: например для нашего случая соответствующей 700°C . Тогда при 700°C гальванометр покажет 0°C и дальнейшие отсчеты будут в пределах $700\text{--}950^{\circ}\text{C}$. Схема включения противоэлектродвижущей силы указана на рис. 45. 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

$$r = \frac{eR}{E}.$$

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 точней способа включения добавочного сопротивления, но следует заметить, что здесь необходимо следить за

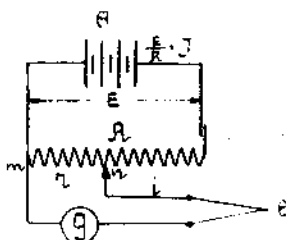


Рис. 45. Схема включения противозлектродвижущих сил.

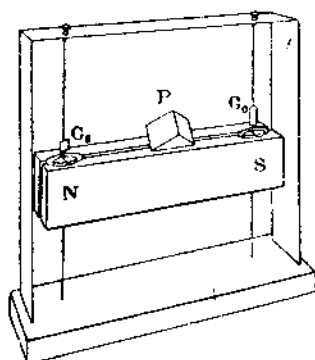


Рис. 46. Пирометр Le Chatelier — E. Saladin.

значением E аккумулятора, так как изменение E повлечет за собой изменение показания гальванометра.

в) **Регистрирующий пирометр Le Chatelier — E. Saladin.** Регистрирующий пирометр Le Chatelier — E. Saladin¹ служит для записи

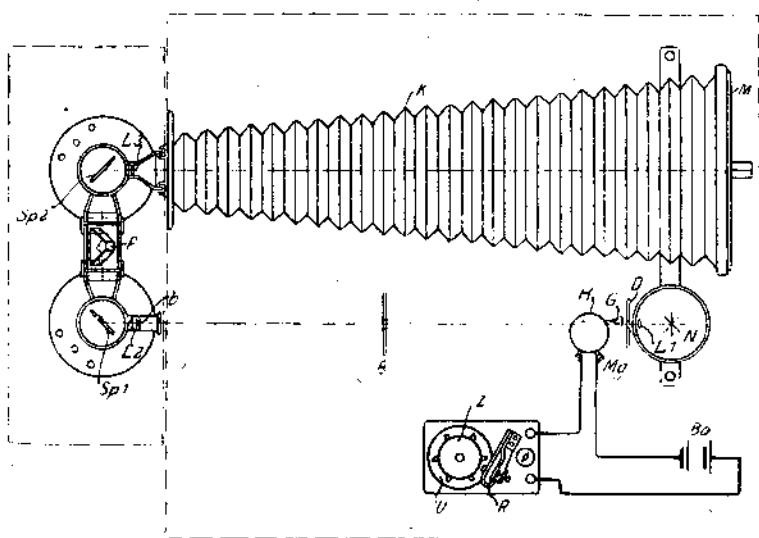


Рис. 47. Пирометр Le Chatelier — E. Saladin.

кривой $(T, T - T') = 0$. Он состоит из двойного зеркального гальванометра G_1 и G_0 (рис. 46) Sp_1 и Sp_2 (рис. 47), к которому прикрепляется деревянный светонепроницаемый ящик, имеющий небольшое

¹ Revue de Métallurgie, № 2, 1904; The Iron and Steel Metallurgist and Metallographist, № 3, 1904.

отверстие ($d = 1 \text{ мм}$) для пропуска луча света от лампы N . Тонкий луч света, пройдя отверстие и линзы L_1 и L_2 , падает на зеркало гальванометра Sp_1 . Отразившись от зеркала, луч проходит призму P ,

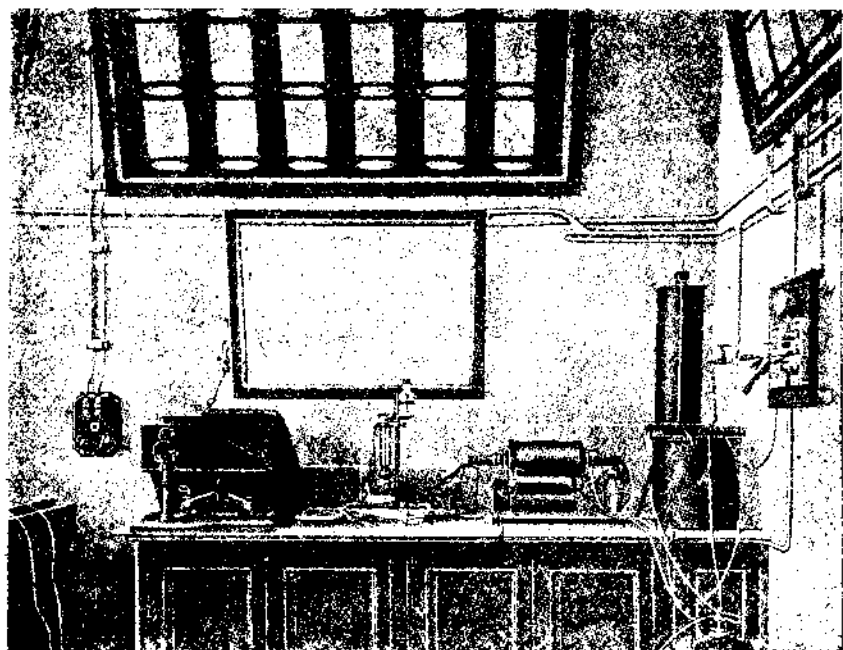


Рис. 48. Общий вид пирометра Le Chatelier — E. Saladin.

вновь отражается от зеркала гальванометра Sp_2 и, проходя опять через линзу L_3 , падает на светочувствительную пластинку или бумагу M , вложенную в кассету.

На рис. 48 дана фотография прибора Saladin'a. Проследим теперь, как происходит запись кривой.

К гальванометру Sp_2 присоединяется термопара, измеряющая T ; к гальванометру же Sp_1 присоединяется термопара, измеряющая $T - T'$, где T' — температура эталона. До тех пор пока $T - T' = 0$, зеркало гальванометра Sp_1 не будет двигаться. С изменением T зеркало гальванометра Sp_2 будет менять свое положение, и луч зарисует при этом на светочувствительной бумаге участок Oa (рис. 49).

В момент превращения скорость изменения T будет очень мала; поэтому зеркало гальванометра Sp_2 почти остановится на месте. Разность же температур $T - T'$ будет увеличиваться, и зеркало галь-

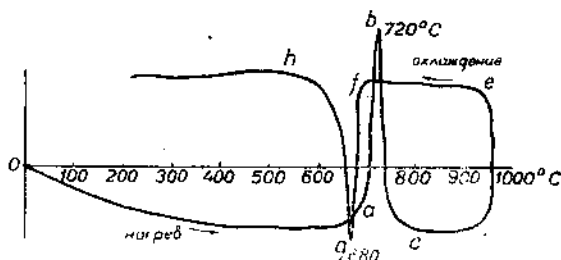


Рис. 49. Кривая записи пирометра Le Chatelier — E. Saladin.

ванометра Sp_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 Le Chatelier—Saladin получил очень большое распространение благодаря своей компактности. Он не требует специальной темной комнаты, его можно установить на солидном фундаменте в любом помещении лаборатории. Установка и градуировка этого прибора чрезвычайно проста, а точность его

измерения достаточно велика. К недостаткам этого простого прибора следует отнести то обстоятельство, 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 Dejean'a.** В 1905 г. Dejean¹ воспользовался пирометром Saladin'a для записи кривой

$$f\left(T, \frac{dT}{dz}\right) = 0.$$

Здесь уже отпала необходимость в эталоне. Достаточно иметь испытуемый образец и две обыкновенные термопары. Следует отметить, что это обстоятельство в значительной степени упрощает и удешевляет термический анализ, так как

подогнать образец к эталону (изготовить полуцилиндр — см. рис. 41) задача довольно сложная.

Одна термопара включалась Dejean'ом (рис. 50) как обычно в гальванометр G_a прибора Saladin'a. Вторая же включалась в индукционный гальванометр, рамка которого имеет две самостоятельные обмотки одну — приключенную к термопаре и вторую — присоединенную к зажимам гальванометра G_0 прибора Saladin'a. 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_0 . Однако индуцированный ток второй обмотки получает значение лишь при быстрых движениях рамки, т. е. при закалке образца и т. п. скоростях охлаждения достаточной величины.

¹ Revue de Métallurgie, стр. 701, 1905.

4. Диаграммы состояния.

а) **Типы диаграмм состояния.**¹ Для построения диаграмм состояния, например сплавов из двух компонентов, необходимо произвести термический анализ (найти критические температуры) для целого ряда этих сплавов различного химического состава. Затем, взяв систему прямоугольных координат и откладывая по оси Y температуру, а по оси X — процентное содержание в сплаве одного из компонентов, наносят найденные критические точки. Соединяя эти точки сплошными линиями, получают диаграмму состояния данных сплавов.

Диаграммы состояния имеют различный вид в зависимости от того, образуют ли оба компонента механическую смесь, химическое соединение, твердые растворы, обладают ли они аллотропией и т. д. Поэтому различают четыре основных типа диаграмм состояния:

Тип I. Сплав из двух компонентов при затвердевании распадается на механическую смесь чистых компонентов, которые не образуют ни химических соединений, ни твердых растворов и не обладают аллотропией.

Диаграмма состояния для этого случая изображена на рис. 51. По линии t_1C выпадает ком-

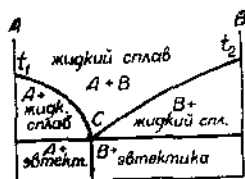


Рис. 51.

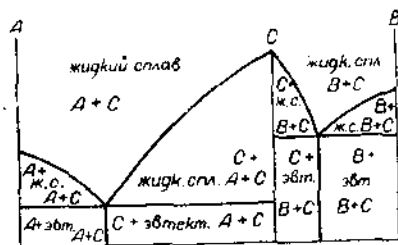


Рис. 52.

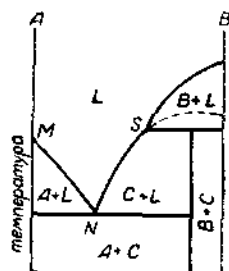


Рис. 53.

понент A , по линии t_2C — компонент B . Точка C — эвтектическая.

Тип II. Сплав из двух компонентов образует химическое соединение. Здесь необходимо различать два случая: 1) компоненты и химические соединения выделяются при застывании сплава в чистом виде (рис. 52); 2) компоненты и химические соединения не могут плавиться без разложения (рис. 53).

В первом случае диаграмма представляет собой двойную диаграмму I типа для компонентов $A-C$ и $C-B$, где C — образующееся химическое соединение. Во втором случае разложение химического соединения G происходит до его плавления. В результате получаем диаграмму с переходной точкой.

Тип III. Сплав из двух компонентов дает при застывании твердые растворы в неограниченных отношениях.

Диаграмма состояния для этого случая (рис. 54) состоит из двух линий: верхняя — линия ликвидуса и нижняя — линия солидуса. По линии ликвидуса при охлаждении начинают появляться первые

¹ Здесь дается общая картина основных типов диаграмм состояния без подробного их разбора, который обычно приводится в курсах металлографии.

кристаллы твердого раствора; при температурах же, соответствующих линии солидуса, происходит окончательное затвердевание сплава. Этот тип диаграммы может принять вид, изображенный на рис. 55, с максимумом или минимумом C , как это изображено на рис. 56.

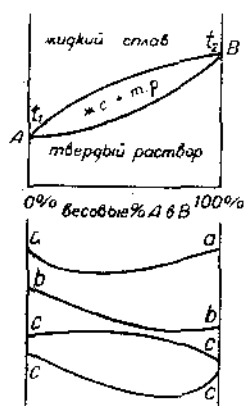


Рис. 54.

Тип IV. Сплав из двух компонентов дает при застывании твердые растворы в ограниченных отношениях.

Диаграмма состояния для этого случая изображена на рис. 57. Линии AC и CB —

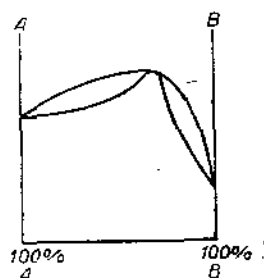


рис. 55.

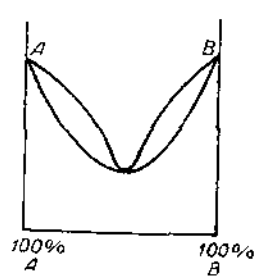


Рис. 56.

линия ликвидуса, линии AD и BE — линии солидуса, линия DE — линия температур застывания эвтектики, в данном случае состоящая из механической смеси двух твердых растворов, концентрации которых при различных температурах будут характеризовать кривые DF и EG .

Мы рассмотрели 4 основных типа диаграмм состояния, подразумевая при этом, что во всех случаях растворимость компонентов в жидком состоянии неограничена, т. е. компоненты дают вполне однородные жидкие растворы. Кроме таких основных случаев диаграммы состояния целого ряда сплавов представляют собой комбинации из этих основных диаграмм.

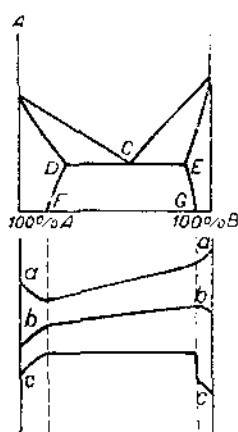


Рис. 57.

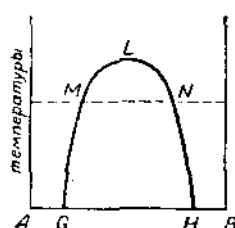


Рис. 58.

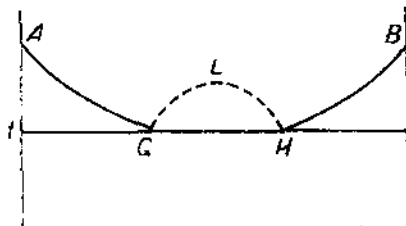


Рис. 59.

В случае же, если растворимость в жидком виде обоих компонентов ограничена, то можно построить кривую насыщения GLH (рис. 58), которая характеризует пределы растворимости обоих компонентов. Все точки, лежащие вне кривой $GMLNH$, отвечают ненасыщенным жидким растворам. Все точки, лежащие на этой кривой, отвечают насыщенным жидким растворам. Все же точки, лежащие внутри этой кривой, отвечают механическим смесям двух насыщенных растворов.

Один из видов диаграммы состояния для этого случая изображен на рис. 59. По линии AG выпадет компонент A , по линии GH застынет эвтектика состава G . Здесь GLH — кривая насыщения. Все сплавы, имеющие концентрации в пределах от G до H , при охлаждении, начиная с кривой насыщения, образуют смесь двух насыщенных растворов. По мере охлаждения эти два насыщенных жидких раствора будут все время изменять свой состав, следуя по кривой насыщения; насыщенный раствор B в A по кривой LG , а насыщенный раствор A в B по кривой LH . При температуре GH оба эти раствора будут иметь концентрацию G и H .

Далее при температуре GH будет выделяться в твердом виде тело B из раствора H , т. е. тело с более высокой температурой плавления. Раствор H будет беднеть телом B , приближаясь по составу к раствору G . Достигнув общей концентрации G , жидкий раствор застынет весь при этой же температуре GH в эвтектическую смесь.

Диаграммы состояния для тройных сплавов. Диаграммы состояния для сплавов из трех компонентов уже не помеща-

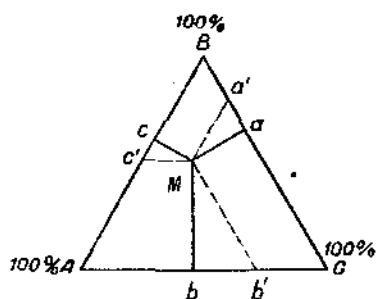


Рис. 60.

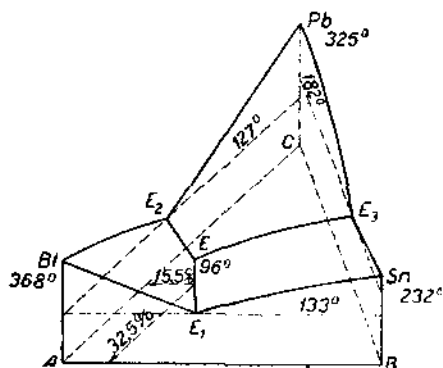


Рис. 61. Диаграмма состояния сплавов Pb, Sn и Bi.

ются в плоскости и поэтому строятся в пространстве. Принцип построения следующий: в вершинах равностороннего треугольника разместим три компонента A , B , C ; на сторонах этого треугольника отложим процентные содержания каждого компонента, как это указано на рис. 60. Как известно, всякая точка, взятая внутри треугольника, обладает тем свойством, что сумма перпендикуляров, опущенных из нее на все стороны, равна высоте треугольника. Поэтому, если известны две из координат точки M , то третья определится сама собой. Таким образом всякую точку внутри треугольника можно рассматривать, как точку, отвечающую какому-либо составу тройного сплава. Например точка M отвечает сплаву состава $Ma\%$ тела A , $Mb\%$ тела B и $Mc\%$ тела C .

Если вывести теперь ординату температур в пространстве, то мы сможем построить диаграмму состояния для тройных сплавов, как это изображено на рис. 61. Это диаграмма состояния для тройных сплавов Pb, Sn и Bi. Из вершин треугольника ABC к плоскости треугольника восстановлены перпендикуляры, на которых нанесены значения температур. В результате получилась трехгранная призма, на гранях

которой помещаются диаграммы двойных сплавов. Эта призма сверху ограничена кривыми плоскостями, характеризующими температуры начала застывания (или конец расплавления) сплавов Pb, Sn и Bi. Точка *E* соответствует тройной эвтектике с температурой плавления в 96°C.

Такую пространственную диаграмму можно изобразить и на плоскости. Для этого в призме через определенное число градусов Цельсия проводят секущие плоскости параллельно плоскости *ABC* и находят линии пересечения этих секущих плоскостей с кривыми поверхностями пространственной диаграммы. Проектируя затем эти линии пересечения на плоскость треугольника *ABC*, получаем ряд так называ-

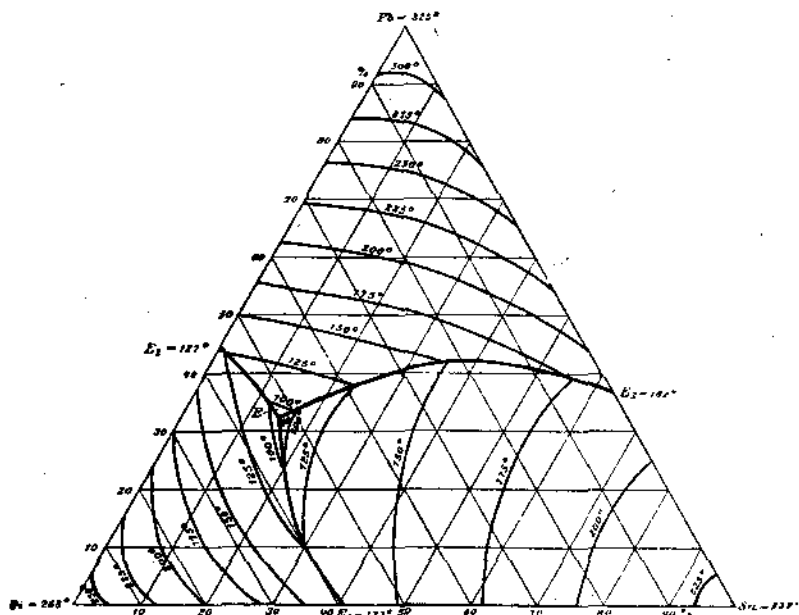


Рис. 62.

емых изотерм. Такая диаграмма для сплавов Pb, Sn и Bi изображена на рис. 62, причем здесь интервал между секущими плоскостями взят в 25° C.

б) Диаграммы состояния некоторых бинарных сплавов. Железо-углерод. Часть первого построения диаграммы для сплавов железа с углеродом принадлежит Roberts-Austen'у, опубликовавшему свои работы в 1897 и 1899 гг.¹ Но уже в 1900 г. эта диаграмма существенно изменяется Н. W. Bakhuis Rozeboom'ом,² который рассмотрел и изменил ее с точки зрения правила фаз.

После этих пионеров диаграммой занимался целый ряд исследователей, труды которых привели ее к тому виду, который изображен на рис. 63.

Большое значение железо-углеродистых сплавов для техники привлекает к работе над этими сплавами большинство ученых металло-

¹ Alloys Research Committee. Roberts-Austen. 4-е и 5-е сообщ.

² Zeitschr. f. phys. Chem. XXXIV, S. 437, 1900.

графов, заставляя изыскивать все более мощные методы исследования этих сплавов. В лице А. Westgreen^{а¹} и Е. Wever^{а²} железо-углеродистые сплавы имеют первых исследователей, применивших к ним рентгеновские лучи.

Медь-цинк. На рис. 64 изображена диаграмма состояния медно-цинковых (латунных) сплавов, построенная на основании работ Shepherd^{а³} и Tafel^{а⁴} и дополненных Carpenter^{ом} и Edward^{ом}

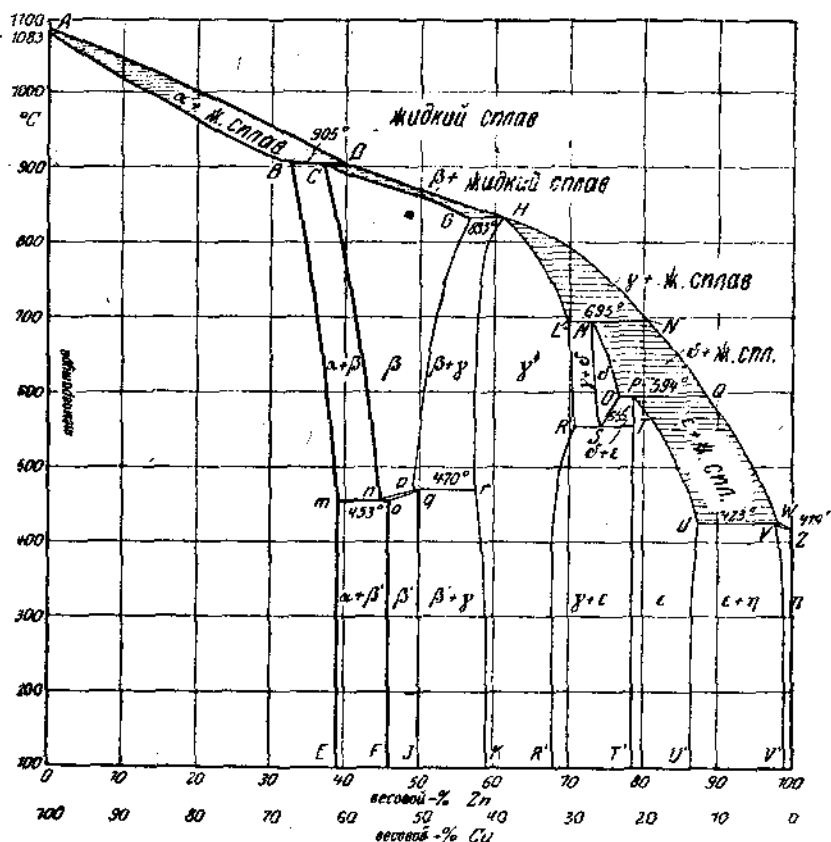


Рис. 64. Диаграмма состояния сплавов медь-цинк.

ds^{ом}.^⁵ Эти сплавы различного состава (до 50% Zn) широко применяются как в литом, так и в ковном и прокатном виде.

Медь—олово. На рис. 65 представлена диаграмма состояния медно-оловянных (бронзовых) сплавов, исправленная работами Bauer^а и Vollenbruck^{а⁶} Среди прочих поправок эти исследователи нашли

¹ Journal Iron and Steel Inst., 103, p. 303, 1921; 109, p. 159, 1924; Zeitschrift f. Phys. Chem. 102, p. 1, 1922.

² Zeitschr. f. Elektrochem. 30, S. 376, 1924.

³ J. Phys. Chem. Bd. 8, p. 421, 1904.

⁴ Metallurgie, Bd. 5 S. 349, 1908.

⁵ Intern. Z. f. Metallographie, Bd 1, S. 156, 1911 und Bd. 2, S. 139, 1912.

⁶ Mitt. Materialpr.-Amt. Bd. 40, S. 181, 1922.

Sander'a и Meissner'a.¹ Предел насыщения цинком твердого раствора γ выше 250°C требует еще проверки; по работам Bauer'a предел этот лежит около 40% Zn.

³Сплавы, содержащие до 15% цинка, идут главным образом на отливки. Кроме того они ковки как в горячем состоянии, так и в холодном виде.

Алюминий—магний. Диаграмма состояния алюминий-магневых сплавов изображена на рис. 68, согласно работам Boudouard'a² и Grube³ и дополнениям Hanson'a и Gayler.⁴

Твердые растворы α образуют основу сплавов, известных под названием дуралюминия; твердые растворы δ —основу для сплавов

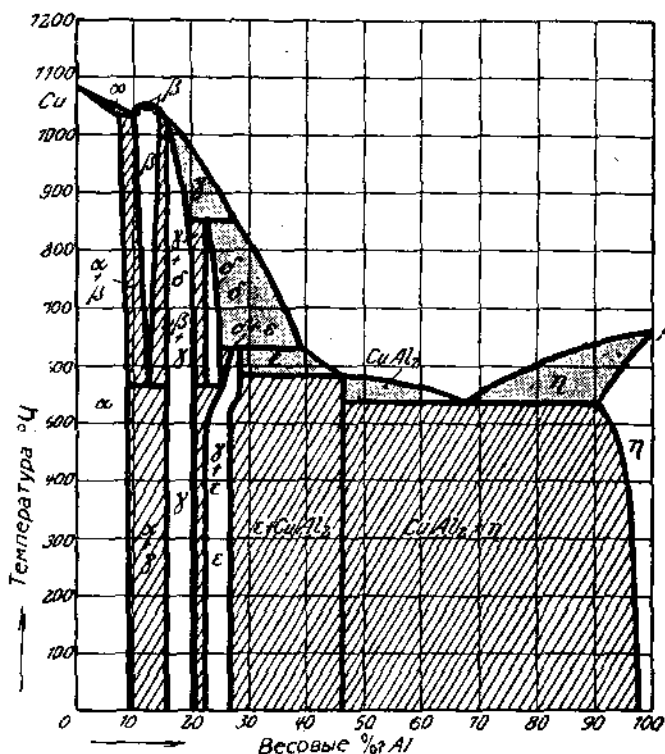


Рис. 66. Диаграмма состояния сплавов медь-алюминий.

известных под названием электрометалл и магналиум. Все эти легкие сплавы хорошо коуются в горячем и холодном виде.

Алюминий—кремний. Диаграмма состояния сплавов алюминия и кремния построена (рис. 69) согласно работам Fraenkel'я.⁵ Целый ряд исследователей⁶ корректировали ее относительно предела насы-

¹ Z. Metallkunde, S. 385, 1922.

² Compt. rend. Bd. 132, стр. 1325, Bd 133, стр. 1003, 1901.

³ Z. anorg. Chem. Bd. 45, стр. 225, 1905.

⁴ J. Inst. of Metals, Bd 2, стр. 201, 1920.

⁵ Z. anorg. Chem. Bd 58, стр. 154, 1908.

⁶ 1) Crochraleski. Z. angew. Chem. стр. 494, 1918; 2) Hanson u. Gayler. I. Inst. of. Metals, стр. 321, 1921; 3) Guillet, „Revue Met.“ стр. 303 1922; 4) Wetzels u. Kanarsky, Metallbörse, стр. 2704, 1922.

щения кремнием твердого раствора α и результаты их колеблются от 0,5 до 1,5% Si. Эвтектическую точку, согласно работам Ras-sow'a¹, следует считать при 13,8% Si.

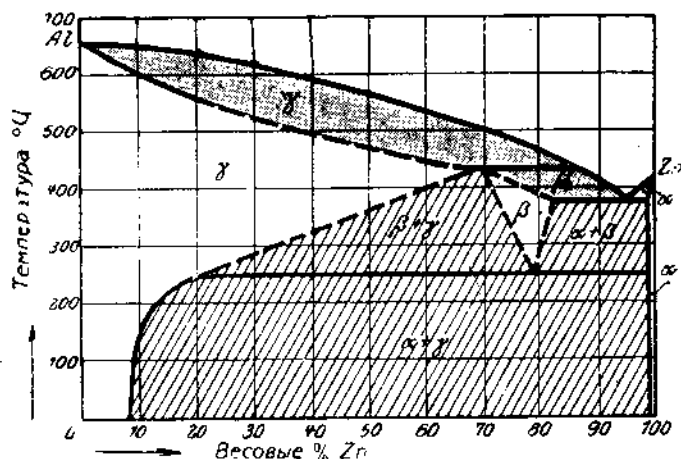


Рис 67. Диаграмма состояния сплавов алюминий-цинк.

Термически обработанные алюминиевые отливки, содержащие до 20% Si, так называемые силумины, получают все большее распространение.

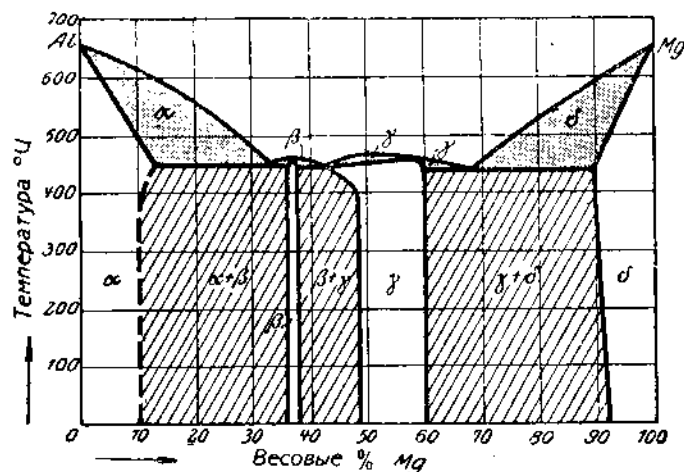


Рис 68. Диаграмма состояния сплавов алюминий-магний.

Олово—свинец. Диаграмма состояния этих сплавов изображена на рис. 70, согласно работам Rosenhain'a и Tucker'a,² Degens'a³ и исправлениям Mazotto.⁴

¹ Z. Metallkunde, стр. 106, 1923.

² Philos. Trans., стр. 89, 209, 1908.

³ Z. anorg. Chem., Bd. 63, стр. 207, 1909.

⁴ Intern. Z. f. Metallographie, стр. 289, 1911.

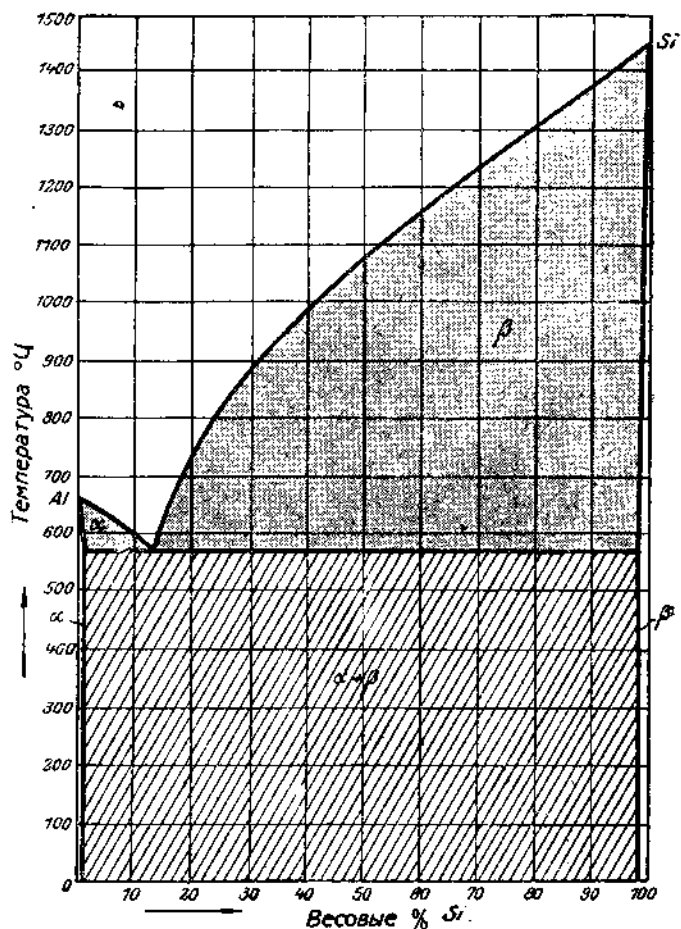


Рис. 69. Диаграмма состояния сплавов алюминий-кремний.

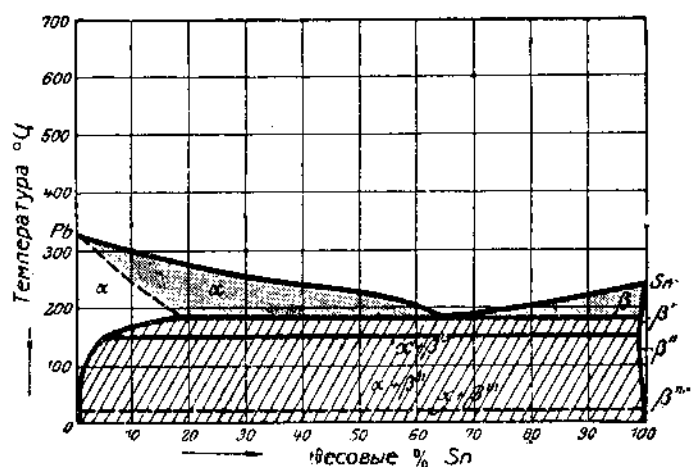


Рис. 70. Диаграмма состояния сплавов олово-свинец.

Сплавы олова и свинца образуют основу для целого ряда мягких припоев.

Олово — сурьма. Диаграмма построена (рис. 71) согласно работам Williams¹ и Константинова и Смирнова.² Сплавы,

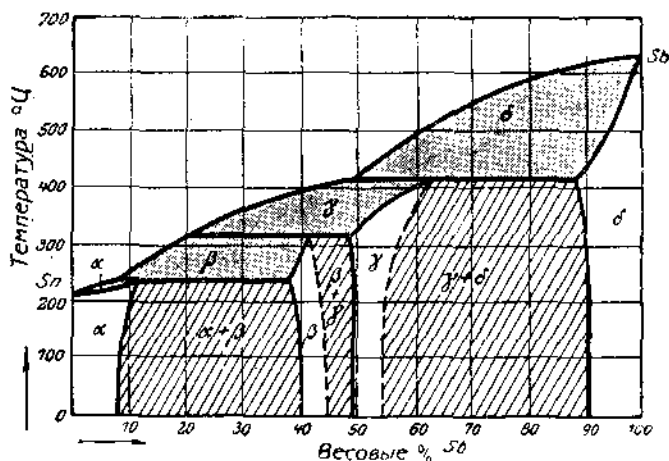


Рис. 71. Диаграмма состояния сплавов олово-сурьма.

содержащие до 20% Sb, широко применяются для заливки подшипников, а также и в полиграфическом производстве.

Свинец — сурьма. Диаграмма свинцово-сурьмяных сплавов изображена на рис. 72 согласно работам Gonterman.³ Более позднее

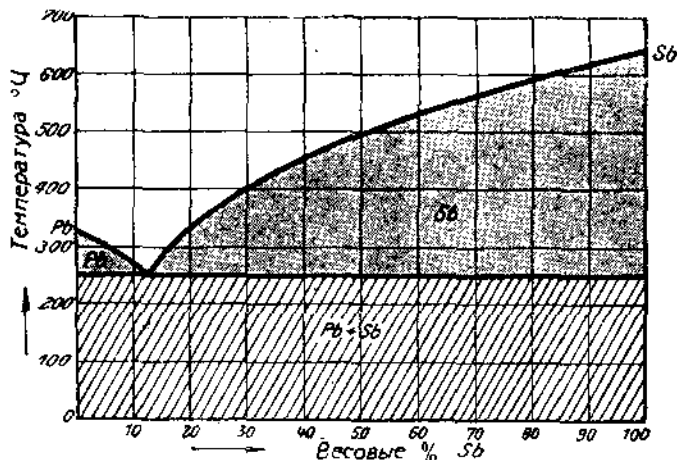


Рис. 72. Диаграмма состояния сплавов свинец-сурьма.

исследование Dean⁴ указало на образование твердого раствора сурьмы в свинце до 3% Sb.

¹ Z. anorg. Chem., Bd. 55, стр. 12, 1907.

² Intern. Z. f. Metallographie, стр. 152, 1912.

³ Z. anorg. Chem. Bd. 55, стр. 419, 1907.

⁴ J. of the Am. Chem. Soc. Bd. 45, стр. 1687, 1923.

Эти сплавы, содержащие до 20% Sb, широко применяются для заливки подшипников и отливки типографского шрифта, стереотипов и т. п.

Свинец—барий. Сплавы, содержащие до 5% бария, начинают применяться в качестве антифрикционных сплавов. На рис. 73 изоб-

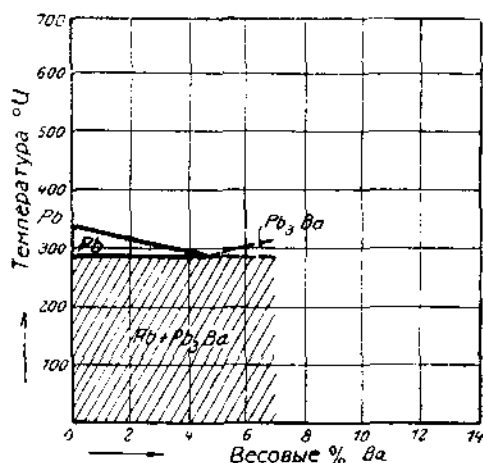


Рис. 73. Диаграмма состояния сплавов свинец-барий.

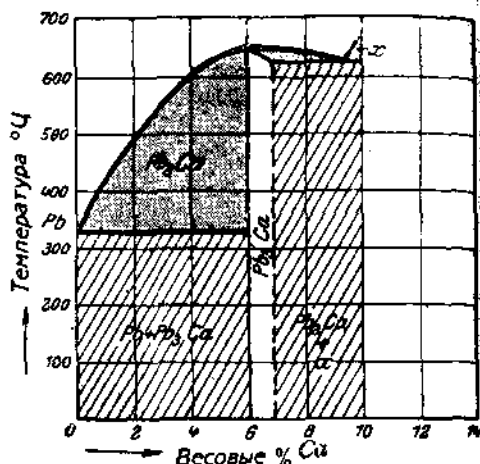


Рис. 74. Диаграмма состояния сплавов свинец-кальций.

ражена диаграмма по работам Czochralski и Rassow'a¹, Cowan Simpkins и Hiers'a.²

Свинец—кальций. Свинцовокальциевые сплавы, содержащие до 3% Ca, также начинают получать применение в качестве антифрикционных сплавов.³ На рис. 74 представлена диаграмма состояния этих сплавов, доведенная до 10% Ca. Диаграмма построена по исследованиям Dou'ski.⁴

¹ Z. Metallkunde, стр. 337, 1920.

² Chem. and Met. Eng., стр. 118, 1921.

³ Czochralski, Die Lagermetalle, 1925.

⁴ Z. anorg. Chem., Bd. 57, стр. 210, 1908.

ГЛАВА ВТОРАЯ.

МАКРО- И МИКРОАНАЛИЗ.

1. Микроскоп.

а) **Оптика микроскопов.** Конструкции микроскопов, применяемых для исследования металлических сплавов, весьма различны. В каждом микроскопе различают статив и оптические части. Стативы бывают весьма разнообразны по своей величине, массивности и различным имеющимся у них приспособлениям. Ниже будет описано устройство некоторых наиболее распространенных типов металлографических микроскопов, сейчас же мы коснемся наиболее важной детали микроскопа — его оптики.

Совершенство изображения, даваемого микроскопом, зависит в первую очередь, от степени коррекции объектива. Главными недостатками изображения, даваемого простой некоррегированной линзой, являются сферическая и хроматическая аберрации.

Сферической аберрацией называется несовпадение в одном фокусе центральных и краевых лучей (рис. 75). Лучи $PARa$ и

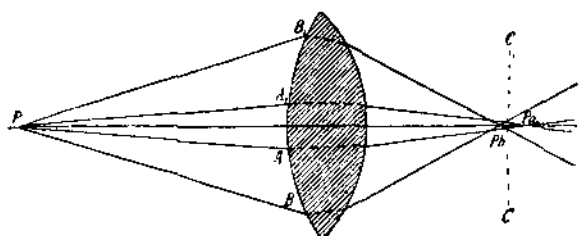


Рис. 75.

PA_1Pa , расположенные близко к оптической оси, дают изображение в точке Ra , тогда как краевые лучи $PBPb$ и PB_1Pb дают изображение в точке Pb .

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

Хроматическая аберрация является следствием того, что лучи различного цвета имеют неодинаковые показатели преломления. Так как фиолетовые и голубые лучи являются наиболее сильно преломляющимися, то они дают изображение ближе к линзе, чем красные, преломляющиеся слабее.

Вследствие хроматической аберрации детали изображения оказываются окаймленными радужными каемками.

Устранение как сферической, так и хроматической аберраций достигается тем, что объективы делаются составными из нескольких линз, причем отдельные линзы изготавливаются из разных сортов стекла, обладающих различными показателями преломления. По степени коррекции объективы подразделяются на апохроматы и ахроматы.

В ахроматах достигнуто совпадение в одном фокусе зеленых и красных лучей, т. е. части спектра, наиболее интенсивно воздействующей на человеческий глаз. Хотя фиолетовая часть спектра при этом дает цветную кайму, кайма эта практически незаметна (при небольших увеличениях) вследствие малой чувствительности глаза к лучам с короткой длиной волны. Совершенно иные отношения получаются при фотографировании: как известно, фотографическая пластинка лучше всего реагирует на фиолетовую часть спектра, остающуюся в ахроматах неисправленной.

В этом случае необходимо употреблять пластинки специально чувствительные к длинноволновой части спектра (ортохроматические и панхроматические) и кроме того задерживать мешающие фиолетовые лучи помощью светофильтров (зеленого или желтого).

Апохроматы можно считать практически свободными от явлений сферической и хроматической аберрации, но они обладают другими недостатками, в которых необходимо отдавать себе отчет при употреблении этих объективов.

Прежде всего изображения, даваемые лучами разных цветов, несмотря на то, что они, вследствие уничтожения хроматической аберрации, лежат в одной плоскости, получаются разной величины, что опять-таки обуславливает собой появление цветных каемок вокруг изображения. Борьба с этим явлением достигается употреблением специальных так называемых компенсационных окуляров, обладающих тем же недостатком, но в обратную сторону. Соединение апохромата с компенсационным окуляром представляет собой прекрасно исправленную систему, дающую возможность достигать хорошей резкости изображения при самых больших увеличениях.

Другим недостатком, от которого не свободен апохромат, является кривизна поля изображения, практически выражающаяся в том, что одновременное получение резкого изображения в центре и на краю поля зрения невозможно. Недостаток этот выступает тем резче, чем больше поле изображения, т. е. при малых увеличениях; при рассматривании такого изображения в микроскоп приходится все время слегка вращать микрометрический винт, в зависимости от того, какую часть поля зрения рассматривают. Чрезвычайно неприятен этот недостаток при проектировании изображения и фотографировании. В этом случае следует употреблять окуляры, исправляющие кривизну поля изображения, так называемые проекционные. Для непосредственного рассматривания проекционные окуляры непригодны.

Многие фирмы в настоящее время выпускают в продажу полуапохроматы. По своей конструкции эти объективы приближаются к апохроматам, но в состав их введены линзы из флуорита. Благодаря этому достигается лучшая степень устранения оптических недостатков.

Главнейшими характеристиками объективов, отличающими их друг от друга, являются фокусное расстояние и апертура.

Фокусное расстояние обыкновенно указывается на самом объективе. Увеличение, даваемое объективом, связано с фокусным расстоянием зависимостью:

$$v = \frac{\Delta}{f_{об}},$$

где v — увеличение;

Δ — оптическая длина тубуса, т. е. расстояние между главными фокусами объектива и окуляра;

$f_{об}$ — фокусное расстояние объектива.

Для примерного суждения о величине увеличения, даваемого объективом, можно пользоваться вышеприведенной формулой, беря вместо Δ — механическую длину тубуса, т. е. расстояние между глазной линзой окуляра и местом прикрепления объектива.

Механическая длина тубуса также указывается на самом объективе. При пользовании объективом необходимо всегда тубус выдвигать на указанную длину, так как другая длина тубуса сводит на нет коррекцию объектива.¹

Апертура объектива является одной из важнейших характеристик объектива. Если S (рис. 76) светящаяся точка и ab — 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.

Как будет видно в дальнейшем современная оптика стремится к максимальному увеличению апертуры объективов. Увеличение это возможно, вообще говоря, двумя путями: увеличением показателя преломления n и увеличением угла отверстия $2u$. Как показала практика, второй способ сильно затрудняет корригирование недостатков объективов, главным образом, сферической аберрации, поэтому возможность увеличения угла отверстия очень скоро достигает своего предела. Увеличение показателя преломления достигается заменой воздуха между шлифом и объективом кедровым маслом, имеющим показатель преломления близкий к показателю преломления стекла. Такого рода объективы, при употреблении которых между шлифом и объективом помещают каплю жидкости, называются иммерсионными и в отличие от обыкновенных сухих.

Наибольшая апертура сухого объектива, применяемая теперь, равна 0,95, для объектива с масляной иммерсией — 1,4.

¹ Фирмой Цейс объективы горизонтальных микроскопов корригируются на длину тубуса, равную ∞ . обстоятельство это вызвано особенностями оптической системы этих микроскопов. В этом случае очевидно длина тубуса не играет роли.

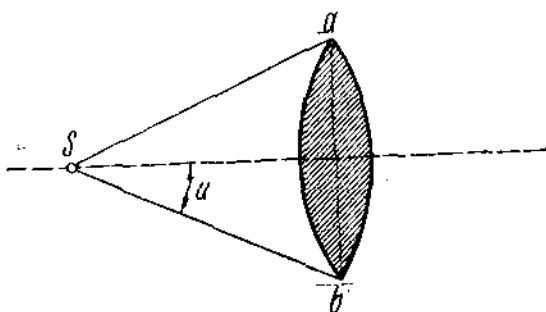


Рис. 76.

Увеличение апертуры выгодно с двух точек зрения. Во-первых, при увеличении апертуры увеличивается количество лучей, попадающих из данной точки в объектив и участвующих в построении изображения, т. е. увеличивается освещенность изображения.

Во-вторых, от величины апертуры непосредственно зависит разрешающая способность объектива. При малой разрешающей способности объектива изображения весьма малых деталей сливаются в одно целое. Дальнейшее увеличение помощью окуляра не вносит никаких новых подробностей и изображение хотя и получается значительно увеличенным (при употреблении сильного окуляра), тем не менее выглядит туманным и размытым. Разрешающая способность объектива связана с апертурой выражением:

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

где d — величина самой мелкой частицы, различаемой данным объективом;

λ — длина волны света, освещающего шлиф;

A — апертура объектива.

Как видно из вышеприведенной формулы, объектив способен различить тем более мелкие подробности структуры, чем больше апертура и чем короче длина волны освещающего света. Величина апертуры ограничена при масляной иммерсии 1,4. Дальнейшего увеличения разрешающей способности можно достичь уменьшением длины волны света, что возможно лишь при употреблении ультра-фиолетовых лучей и кварцевой оптики. Микроскопы, приспособленные для этой цели, пока еще в промышленном масштабе не изготавливаются.

От величины апертуры зависит рациональное использование объектива. Если объектив например имеет апертуру 0,30, то, принимая длину волны 0,5 μ , имеем:

$$d = \frac{0,5}{2 \cdot 0,3} = 1 \mu = 0,001 \text{ мм},$$

т. е. объектив способен различить частицу величиной 0,001 мм. Принимая разрешающую способность глаза 0,1 мм, мы видим, что, для того чтобы изображение частицы было отчетливо видно, нам необходимо увеличение в 100 раз.

Дальнейшее увеличение, очевидно, поведет лишь к расплывчатости изображения или, как говорят, получится „пустым“.

С другой стороны, если нам требуется увеличение в 30 раз, мы очевидно, можем обойтись объективом с меньшей апертурой и получить благодаря этому большее поле изображения без ущерба для резкости.

Окуляры Гюйгенса применяются в сочетании с ахроматами. При работе с апохроматами необходимо, как было выяснено выше применять для рассматривания изображения компенсационные окуляры. Для фотографирования следует употреблять проекционные окуляры. Собственное увеличение обыкновенно указывается на самих окулярах. Наиболее употребительными являются окуляры $\times 3$, $\times 5$ (так называемые „искатели“), $\times 7$, $\times 10$, $\times 15$, $\times 20$.

Общее увеличение микроскопа является произведением увеличения объектива на увеличение окуляра:

$$v = v_{об} \cdot v_{ок}.$$

Одно и то же увеличение может быть достигнуто различными комбинациями. При выборе того или другого сочетания объектива и окуляра необходимо руководствоваться изложенными выше соображениями о рациональном использовании объектива. Практически во избежание получения „пустых“ увеличений желательно из возможных комбинаций выбирать ту, в которой увеличение достигается главным образом за счет объектива. Правило это удастся применить не во всех случаях. Сильно увеличивающие объективы обладают малой глубиной изображения и неспособны передать большие рельефы, поэтому, если поверхность шлифа обладает сильным рельефом или необходимо получить большое поле изображения, то приходится выбирать объективы, сравнительно мало увеличивающие, в комбинации с сильно увеличивающими окулярами, жертвуя в данном случае мелкими подробностями структуры.

б) Осветительные аппараты, штативы. Освещение изучаемого под микроскопом шлифа можно произвести тремя способами, как это указано на рис. 77 А, В, С. Изучаемая поверхность здесь обозначена буквой *S*, *OO* — оптическая ось, *OK* — окуляр и *f* — объектив микроскопа.

В случае *A* поверхность шлифа наклонена в отношении оптической оси. Луч света *e*, отразившись от поверхности шлифа в направлении *a*, попадает в объектив и окуляр микроскопа. Способ этот применяется лишь при очень небольшом увеличении.

В случае *B* поверхность шлифа перпендикулярна оптической оси, а между изучаемой поверхностью и объективом установлена под углом 45° к оптической оси плоско-параллельная стеклянная пластина *pl*. Луч света *e* 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* и здесь опять частью отражается в направлении *4*, частью же проходит в направлении *3* и идет в объектив и т. д. При таком способе освещения, который дает обычно весьма равномерную картину, используется лишь 1/4 освещающих шлиф лучей, что отражается на интенсивности освещения. Стеклянная пластина *pl* очень часто устанавливается между окуляром и объективом.

В случае *C* поверхность шлифа опять перпендикулярна к оптической оси. Между объективом и окуляром устанавливается призма полного внутреннего отражения *pr*, которая покрывает половину объектива. Лучи света *e*, 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

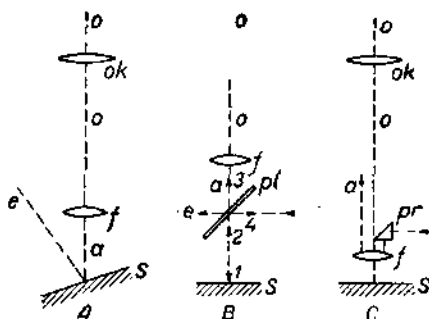


Рис. 77.

построения изображения используется лишь половина отверстия объектива, другая половина служит лишь в качестве осветителя. Апертура объектива оказывается наполовину сниженной, что следует всегда иметь в виду при употреблении призмы. Для получения тонкого, изобилующего мелкими деталями изображения, необходимо пользоваться стеклянной пластинкой, максимальная же яркость и контрастность достигается употреблением призмы.

На пути от источника света до объектива 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.

В последнее время входят в употребление 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.

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

На рис. 78 изображен вертикальный микроскоп фирмы С. Reichert'a, снабженный револьверной головкой на три объектива. 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 даже и 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 К. Рейхерта является одним из наиболее совершенных типов, применяемых в металлографии. Общий вид этого прибора представлен на рис. 79.

На металлической станине устанавливаются: фотографический аппарат, микроскоп и осветительная лампа. Микроскоп снабжен столиком Ле Шателье (рис. 80). Образец (20) устанавливается шлифом книзу над отверстием горизонтального столика (13). Опусканием и подъемом столика шлиф подводится или отдаляется от объектива и устанавливается этим на фокус.

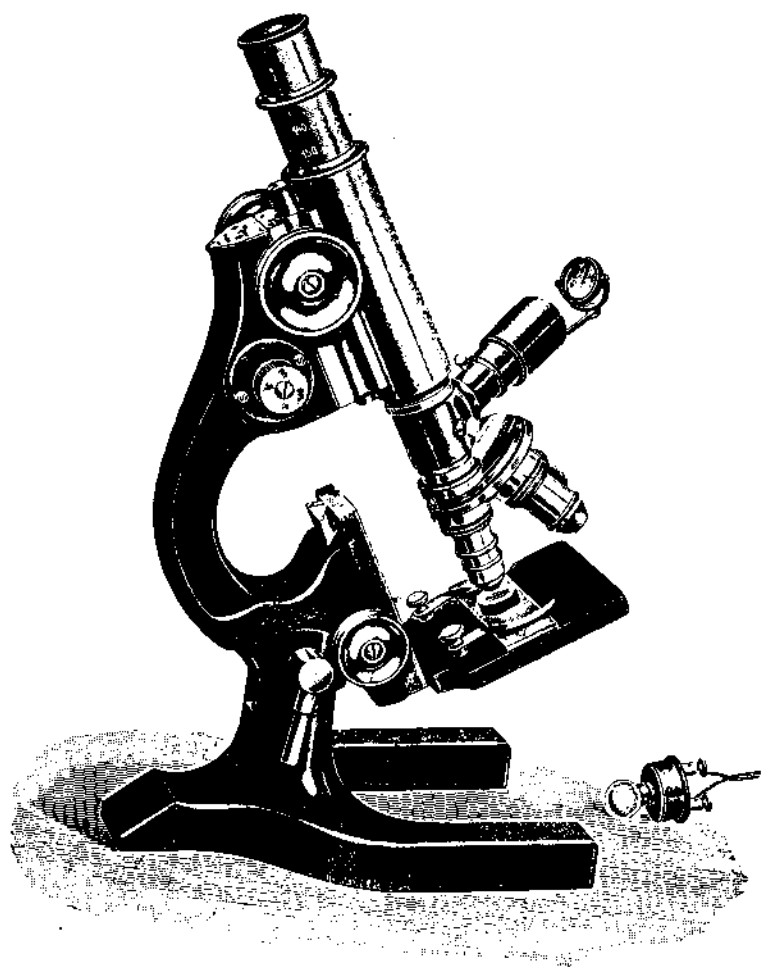


Рис. 78. Микроскоп C. Reichert'a.

Учитывая достоинства и недостатки освещения при помощи призм и стеклянной пластинки, этот микроскоп снабжен обоими приборами. Лучи света, собранные системой линз, помещенных в трубке 5, направляются далее в одну из осветительных трубок. Поворотом рукоятки *H* можно быстро наставить желаемый способ освещения (рис. 81—83). В одной из трубок помещается пластинка *G*, в другой — призма *P*. Отраженный от шлифа луч света попадает на призму *P* и направляется в окуляр.

К основной станине 1 (рис. 79) прикрепляется вспомогательная станина 43 со столиком 41 (рис. 84), позволяющая производить на этом же аппарате и макросъемку. При этом конечно статив микро-

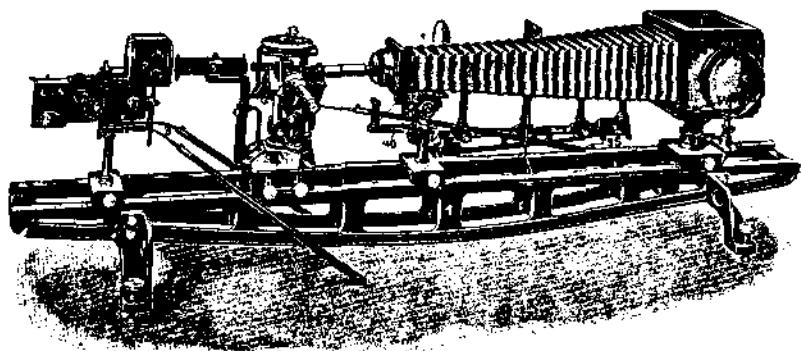


Рис. 79. Горизонтальный микроскоп С. Reichert'a.

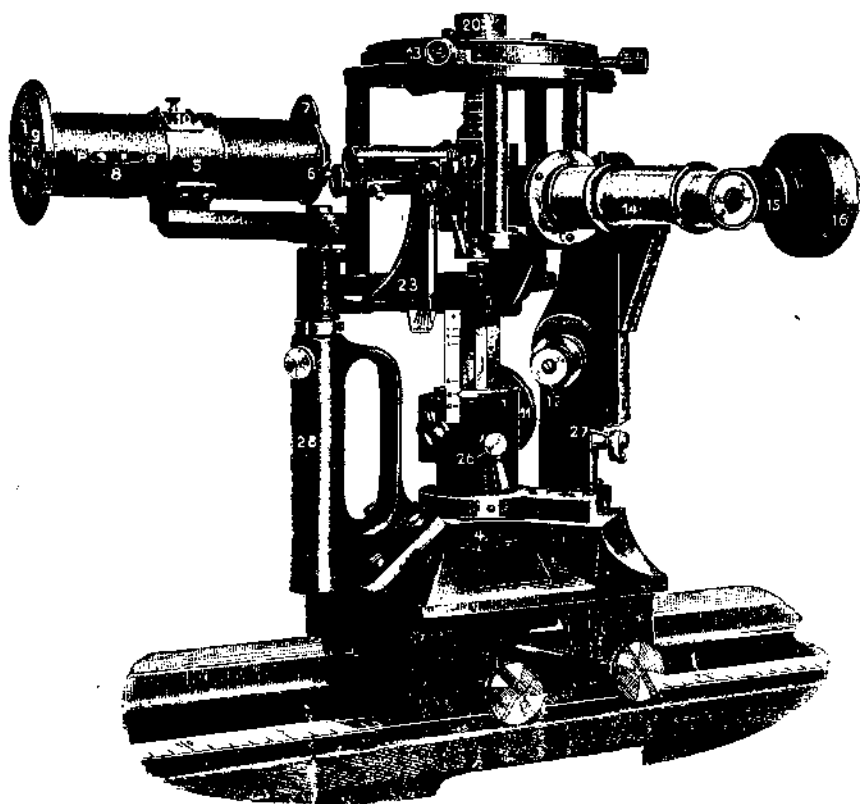


Рис. 80. Столик Le Chatelier.

скопа отодвигается в сторону и 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 в таких лабораториях будут

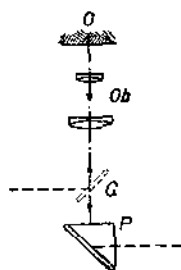


Рис. 81.

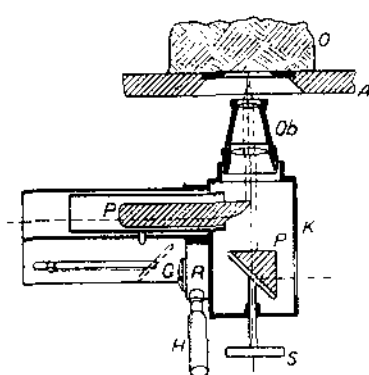


Рис. 82.

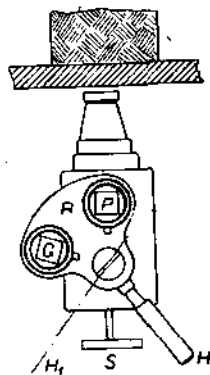


Рис. 83.

постоянные установки для макросъемок и ради них не нужно будет расстраивать микроскопическую установку.

Последняя модель большого горизонтального микроскопа К. Рейхерта снабжена оптикой, дающей при непосредственном наблюдении

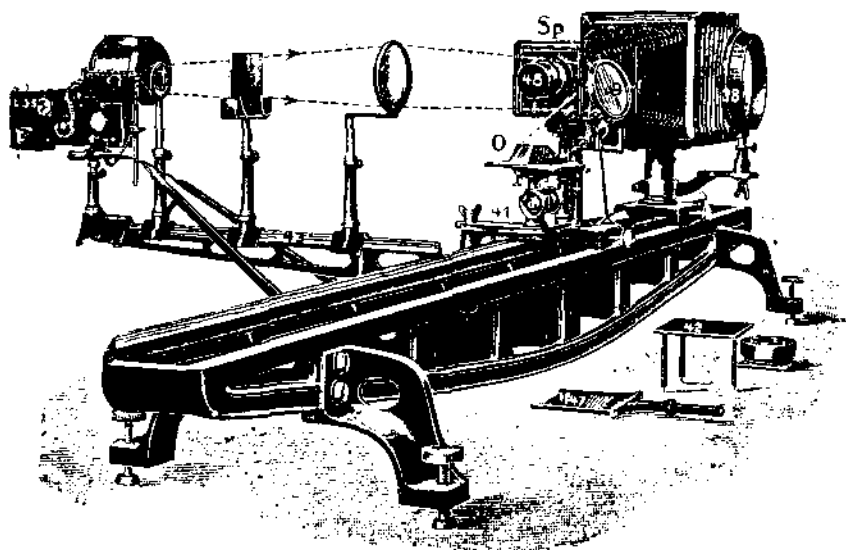


Рис. 84. Устройство для макросъемки.

линейное увеличение от 30 до 2250 раз и при фотографировании до 5000 раз.

Горизонтальный микроскоп фирмы К. Цейсса. Главное достоинство микроскопа этой фирмы — его отличная оптика. Это обстоятельство позволяет вести рассмотрение структур при больших

увеличениях (до 4000), сохраняя при этом достаточную четкость и яркость изображения. На рис. 85 представлена модель микроскопа вышеуказанной фирмы. Весь аппарат покоится на доске, подвешенной



Рис. 85.

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 микро-изображения 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. 86 изображена схема прохождения луча через оптику микроскопа.

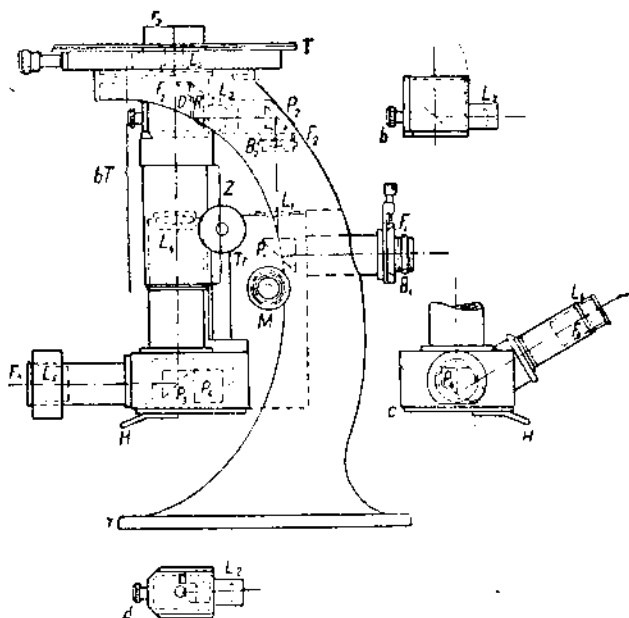


Рис. 86.

в окуляр. На рис. 86 изображена схема прохождения луча через оптику микроскопа.

Попадая сначала на ирисовую диафрагму B_1 , которая служит для задерживания лишнего лучей, мешающих получению наиболее рельефного изображения на матовом стекле, луч 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_3 , которая в зависимости от поворота рычага H может направить его или в глаз наблюдателя через окуляр L_6 или на матовое стекло фотоаппарата.

На том же рис. 86 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 чокое.

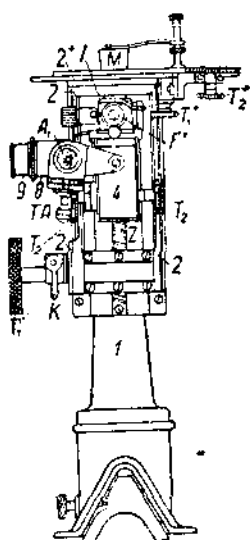


Рис. 87.

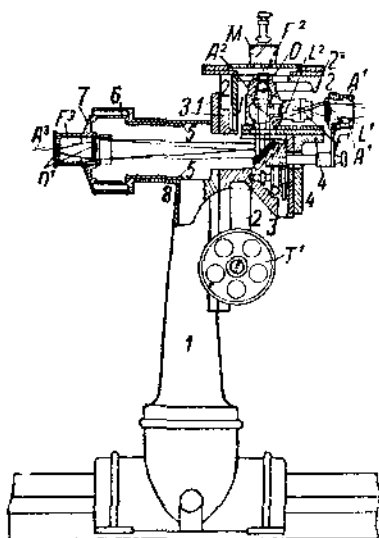


Рис. 88.

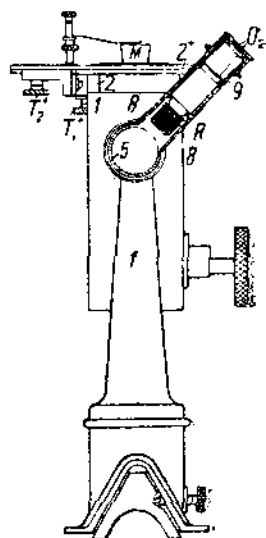


Рис. 89.

Это обстоятельство позволяет подвергать исследованию довольно тяжелые объекты, не опасаясь порчи подъемного механизма тубуса. Для исследования всей площади шлифа столик в горизонтальной плоскости может иметь два взаимно перпендикулярных перемещения, что с достаточной полнотой обеспечивает возможность вышеуказанного изучения поверхности шлифа.

Микроскоп Лейца. Большой металлографический микроскоп фирмы Лейца, изображенный на рис. 87—89, подобно ранее разобраным микроскопам (Цейсс и Рейхерт) можно также разделить на три основные части: осветитель, микроскоп и фотографический аппарат.

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

влениях. Самая установка производится при помощи зубчатки, входящей в зубчатую рейку Z головкой T и может закрепляться 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 регули-

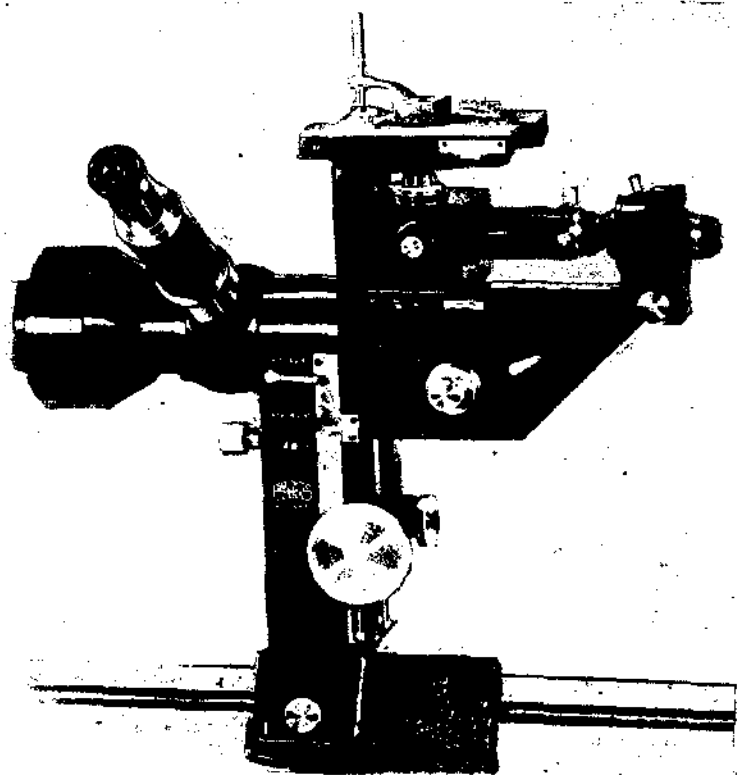


Рис. 90.

ровки 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 концентрируются на полированной поверхности рассматриваемого шлифа M . Огразившись от последнего, лучи попадают на металлическое зеркало S_p , 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 свободный путь для лучей к окуляру O .

Для рассматривания — трубка 9 до конца задвигается (как показано пунктиром) и лучи, отразившись от R , попадают в θ_2 .

Новая модель горизонтального микроскопа фирмы К. Цейсса.

В последнее время фирмой К. Цейсса выпущена облегченная модель горизонтального микроскопа (рис. 90). По своей конструкции эта модель напоминает микроскоп Рейхерта и Лейца. Столик имеет и вертикальное перемещение, так что установка столь больших предметов, как на предыдущей модели этой фирмы, уже невозможна. Вместе с тем все манипуляции (смена объективов, осветителей и т. п.) значительно упрощены, что делает данный микроскоп особенно ценным в заводской лаборатории, нисколько не умаляя значения предыдущей модели для фундаментальных исследовательских работ.

Микроскоп „Rational“ С. Reichert'a. В самое последнее время фирмой С. Reichert'a выпущена новая модель микроскопа, соединяющая в себе все преимущества горизонтального микроскопа с компактностью и портативностью вертикального (рис. 91). 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 до сих пор в микроскопах горизонтального типа. Чрезвычайная компактность и удобство обращения с микроскопом сулят этому типу повидимому большое распространение.

Цеховые микроскопы, изготавливаемые разными фирмами, представляют собой вертикальные микроскопы, укрепленные на особого рода стативах, позволяющих устанавливать микроскоп непосредственно на самом изделии, 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 $71\frac{1}{2}^\circ$. Такой двоянный микроскоп

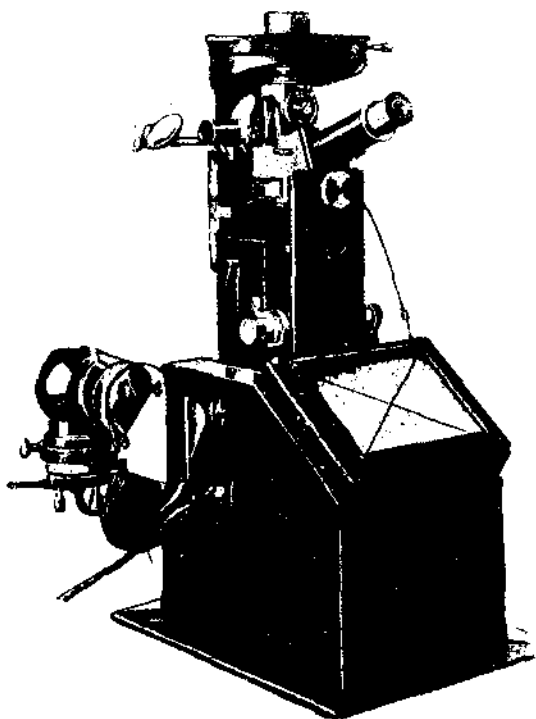


Рис. 91. Микроскоп „Rational“ С. Reichert'a.

имеет грубую установку на фокус от руки и укрепляется помощью винта (рис. 92) и более тонкую — кремальерой.

Каждая трубка вращается вокруг оси, причем изменяется расстояние между окулярами, что дает возможность установить прибор по глазам наблюдателя. Слияние обоих изображений дает стереоскопический эффект: 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, которая дает возможность получить два стереоскопических

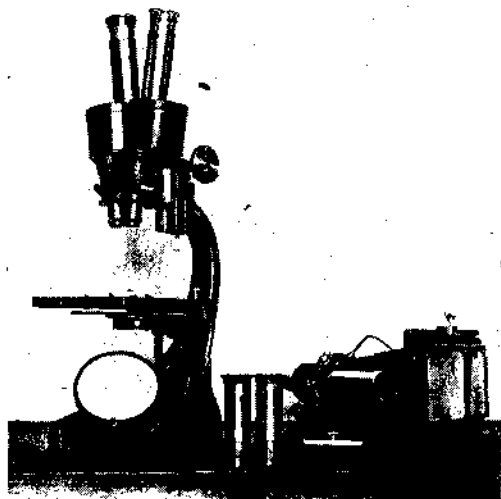


Рис. 92

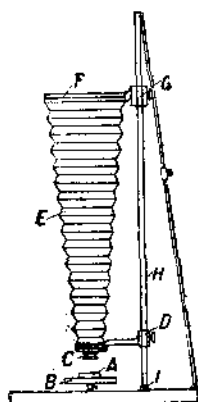


Рис. 93.

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 *H* (рис. 93) движется вертикально фотокамера, которая книзу суживается и заканчивается металлической оправкой со сменными ввинчивающимися объективами. Верхняя часть камеры оправлена деревянной рамкой *F*, в которую вставляется матовое стекло. Рассматриваемый шлиф *A* устанавливается на столике *B*.

В случае надобности 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.

а) Приготовление шлифов. Прежде чем приступить к изучению сплава под микроскопом, необходимо соответствующим образом приготовить образец — изготовить шлиф.

Для этого из материала вырезается небольшой кусочек, величина которого зависит от задачи исследования. Необходимо вообще заме-

тять, что взятие пробы, выбор места и величина пробы являются одними из ответственных и трудных частей всего исследования. Указать какие-либо общие правила трудно, и эта часть задачи разрешается опытным исследователем обычно для каждого случая индивидуально. На вырезанном кусочке выбирают, опять-таки в зависимости от задания, одну из поверхностей и при помощи напильника придают ей вид правильной плоскости. Если же образец твердый и не поддается обработке напильником, то последний заменяется наждачным или карборундовым камнем.

После этого приступают к шлифовке этой поверхности. Для этого пользуются различными по грубости зерна сортами шлифовочной бумаги, начиная с более крупного и переходя постепенно на более мелкие сорта. Примером такой бумаги может служить весьма распространенная в металлографических лабораториях бумага фирмы Губерта; на ней шлифовку ведут последовательно на номерах: 1М, 1F, 0, 00 и 000.¹

Операция при этом производится следующим образом: бумагу кладут на ровную (например стеклянную или эбонитовую) дощечку и по ней трут образец. При этом направление шлифовки лучше выбирать перпендикулярным к направлению следов предыдущей обработки, так как этим во-первых быстрее заканчивается вся операция, а во-вторых — имеется возможность судить о том, можно ли перейти на более мелкий номер бумаги. Шлифовать на одном номере следует до тех пор, пока совершенно не исчезнут следы предыдущей обработки. Когда это достигнуто, шлиф тщательно обмывается, чтобы не перенести наждак более крупный на более мелкий и затем насухо вытирается и обрабатывается на следующей бумаге. Операция шлифовки кончается на бумаге № 000 Губерта. Поверхность шлифа покрыта целым рядом весьма мелких царапин, уничтожаемых затем полировкой.

Полировку можно производить на сукне, бархате или замше, смачивая их водой и посыпая полировочным порошком. В качестве последнего служит окись алюминия (Tonerde)² или же окись железа — крокус. За неимением этих полировочных порошков можно крокус заменить мумией или продажный крупный крокус (Fe_2O_3) очистить от крупных частичек путем отмучивания. Для этого взбалтывают крокус в воде и дают отстояться в течение двух часов, после чего переливают воду со взвешенными мелкими частичками крокуса в другой сосуд, где он опять отстаивается в течение 4 часов. Двухчасовым осадком можно пользоваться для полировки стальных шлифов. Для более мягкого материала, например цветных сплавов, применяют осадки четырех- и двенадцатичасовые.

Полировку, так же как и шлифовку, можно производить вручную, натянув кусок замши или сукна на дощечку. Более быстро эти операции протекают при пользовании станками: на шпиндель станка надевается деревянный или эбонитовый диск, к которому и прикрепляют шлифовочную бумагу или суконку (рис. 94).

¹ Грубые и средние сорта бумаги выпускаются в настоящее время заводом „Ильич“ в Ленинграде.

² Изготавливается Научно-исследовательским институтом ВОТИ в Москве.

Кроме приведенного на рис. 94 станка существуют конструкции станков, которые позволяют полностью механизировать изготовление шлифов.

Такой станок изображен на рис. 95. На вертикальном валу 1 насажен медный диск 2 диаметром 250 мм и толщиной 3—5 мм. Под диском укрепляются две электромагнитные катушки 3—3, питаемые переменным током от осветительной сети. Создаваемый ими магнитный поток способен удерживать на поверхности медного диска шлифы из магнитного материала. 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 О. Указанное движение необходимо для того, чтобы плоскость шлифа могла придти в соприкосновение с разными местами наждачной бумаги. Это движение

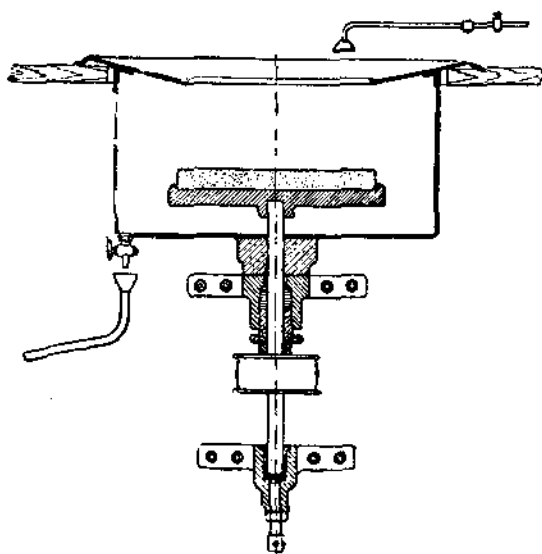


Рис. 94.

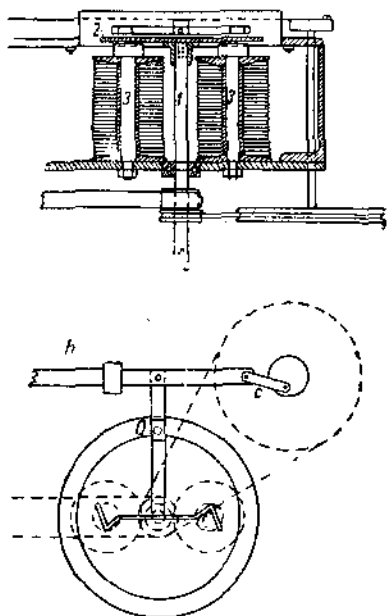


Рис. 95. Станок для полировки.

осуществляется помощью продольной рейки *b*, которая получает возвратно поступательное движение от кривошипа *c*.

В свою очередь кривошип *c* получает вращение от ременной передачи со шпинделя *1*.

В зависимости от объема работы (количества изготавливаемых шлифов) станки эти делаются с двумя, с тремя и с большим количеством дисков.

Наждачная бумага, употребляемая для шлифовки, укрепляется на медном диске при помощи обыкновенного столярного клея.

На одном из таких дисков натягивается сукно для полировки.

Все шпиндели машины при помощи ременных передач приводятся во вращение от одного мотора. Скорость вращения отдельных кругов можно установить соответствующим подбором передаточных шкивов.

Дабы предотвратить нагрев шлифа при шлифовке, окружная скорость вращающегося диска не должна превышать 5—6 метров в секунду. Поверхностный нагрев шлифа незаметно для шлифовщика может достигнуть 200—300°C (цвета побежалости), а это обстоятельство изменит структуру (например закаленной стали). При полировании, ввиду того что диск смачивается обычно водой со взболтанным крокусом, нагрева опасаться не приходится; поэтому скорость по окружности диска доводят до 15 м в секунду и даже больше. Полировку следует считать законченной, когда на шлифе не будут видны царапины даже под микроскопом, — шлиф должен представлять вполне зеркальную поверхность.

Если подвергнуть такой шлиф изучению под микроскопом, то структуры его мы еще не увидим, а будет видна лишь блестящая металлическая масса, отполированные неметаллические включения (графит, MnS , Cu_2O и т. п.) и темные пятна — углубления выкрошившихся при полировке неметаллических включений. На рис. 96 представлен нетравленный шлиф чугуна. Светлое поле представляет собой металлическую массу, в которую внедрены темные нити выкрошившегося графита. Углубленные места графита покрыты тенью выступающей металлической массы и потому кажутся нам темными.

Однако при помощи полировки можно проявить и структуру металлических сплавов, применяя так называемую рельефную или же травящую полировку.

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 мягких 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 Е. Гейн (Е. Heun) рекомендует 10% настойку лакричного корня в холодной воде. По прошествии 4 часов раствор отфильтровывается и оставляется бродить на несколько дней.

б) Травление шлифов. Всякий сплав в твердом виде представляет собой совокупность кристаллов неправильной формы, называемых кристаллитами или зернами. Последние могут или принадлежать к разным фазам сплава, или быть различно ориентированы, благодаря чему весь сплав в целом оказывается неоднородным, обладающим видимым строением или структурой. Структура, различаемая невооруженным глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы,

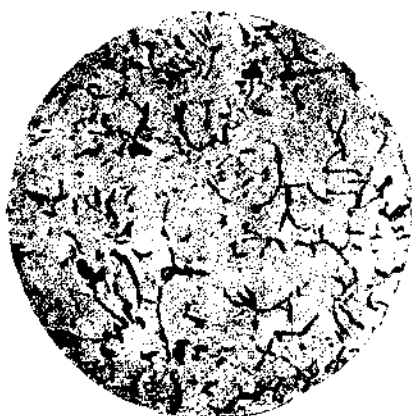


Рис. 96. Серый чугун не травленный.
(Лин. увел. 100.)

носит название макроструктуры, и речь о ней будет в отделе макроанализа.

Микроструктура сплава видна лишь при больших увеличениях с помощью микроскопа. Для ее выявления необходимо шлиф протравить. Для этого приготовленный шлиф обезжиривается спиртом и погружается в реактив, после этого промывается водой или спиртом и быстро обсушивается.

Применяя соответствующий реактив, можно выявить отдельные кристаллические составляющие сплава, причем выявляются или границы между отдельными зернами (кристаллитами), или же отдельные кристаллиты окрашиваются в различные цвета, или же наконец на

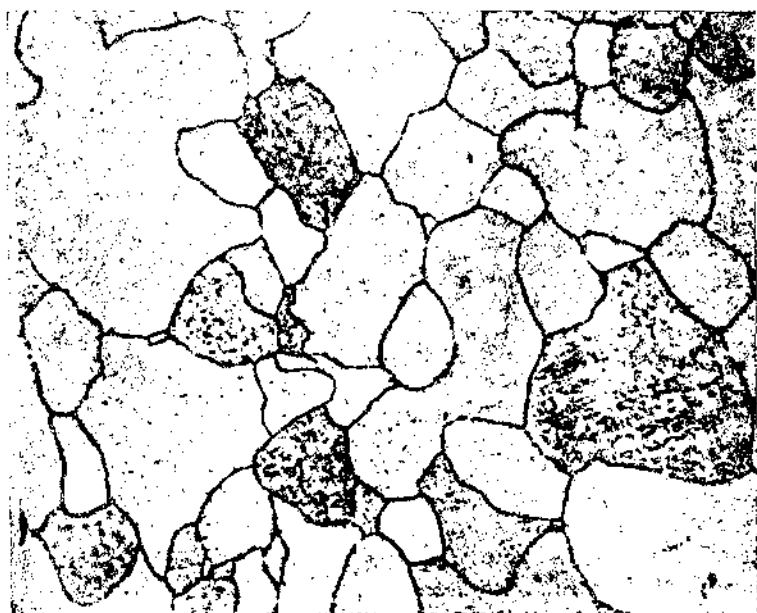


Рис. 97. Железо.

кристаллитах вытраиваются так называемые фигуры травления в зависимости от ориентации кристалла.

На рис. 97 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, и 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 массу зерен. Таммманн (Tammann)¹ считает, что образование этих линий обязано присутствием на границе между отдельными зернами эвтектической смеси данного металла и прочих примесей, которые обычно сопро-

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

воздают сплав. По его теории эта эвтектическая смесь более чувствительна к реактивам, а потому и окрашивается сильнее. Кроме того он считает, что прочность при обычной температуре этой эвтектической смеси большая, нежели самых зерен, что доказывается тем, что излом происходит в самих зернах, а не по границе их. При высоких температурах эвтектическая смесь как более легкоплавкая становится уже менее прочной, и тогда материал разрушается по границам зерен.

Существует еще весьма простое объяснение появления темной сетки — границы между отдельными кристаллитами. В зависимости от ориентации осей кристаллиты не в одинаковой степени растворяются реактивом, и тогда при косо падающем луче осветителя ниже лежащие полиэдры будут покрыты тенью выступающих кристаллитов, как это схематически изображено на рис. 98. Это простое объяснение однако не вполне точно.

Если бы дело обстояло столь просто, то при передвижении шлифа под микроскопом строение сетки должно было бы изменяться: некоторые темные линии утолщались бы, другие наоборот утончались и исчезали бы. Это обстоятельство имеет место, но не в полном объеме, что заставляет принять это объяснение с некоторой оговоркой.

Весьма интересную физико-механическую теорию появления при травлении границ между полиэдрами дает И. Чохральский (I. Czochralsky).¹ Он считает, что поверхности соприкосновения кристаллитов должны более интенсивно нежели их основная масса протравиться в тех металлах, которые в наклепанном состоянии более интенсивно реагируют на реактив. Зерна же 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; металлы же, как например медь и алюминий, которые в наклепанном состоянии обладают меньшей растворимостью, имеют границу между кристаллитами более светлого оттенка, нежели вся основная масса.

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.

На рис. 99 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. 98.

¹ Moderne Metallkunde, 1924.

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. 100.

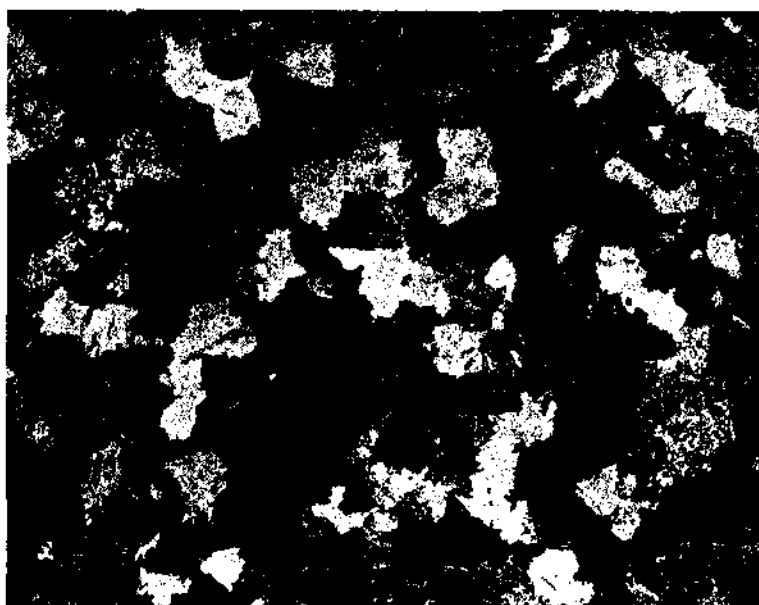


Рис. 99. Шлиф литого алюминия.

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 кристал-

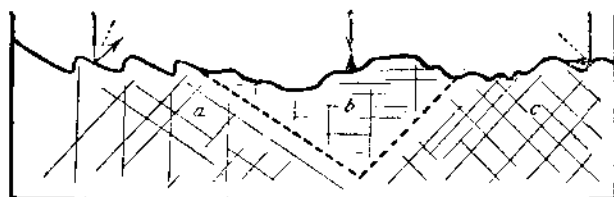


Рис. 100

лита *c*. При передвижении 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. 101.

На рис. 102 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, являющийся в данном случае электролитом. Таким образом действие реактива на ту или иную структурную состав-

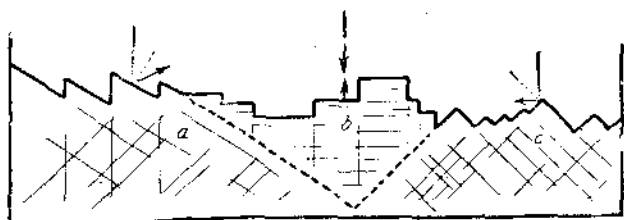


Рис. 101.

ляющую 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 имеют место 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.

Железные сплавы. Наиболее употребительными реактивами являются 1—5% раствор азотной кислоты в этиловом спирте (реактив Мартенса) или

в изоамиловом спирте (реактив Курбатова А), а также 4% раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте (реактив Ижевского).

Действие всех этих реактивов более или менее одинаково. Пикриновая кислота действует менее энергично нежели азотная, но имеет то преимущество, что мало окисляет поверхность шлифа. Замена этилового спирта изоамиловым замедляет действие реактива. Продол-

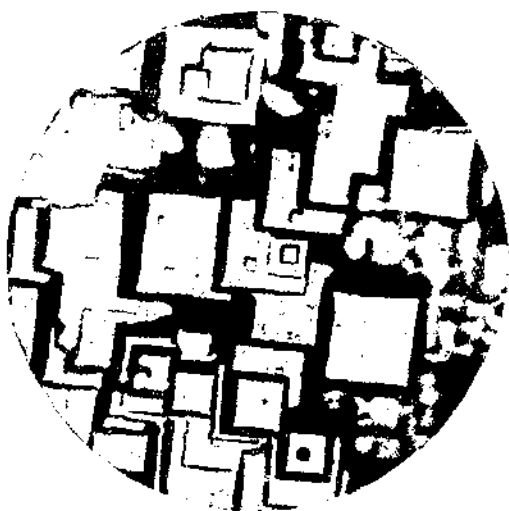


Рис. 102. Железо с богатым содержанием фосфора.

жесткость травления этими реактивами колеблется от 30 секунд до нескольких минут. На рис. 103—105 показано действие этой группы реактивов на железо—углеродистые сплавы.

Диаграмма состояния этих сплавов изображена на рис. 63.

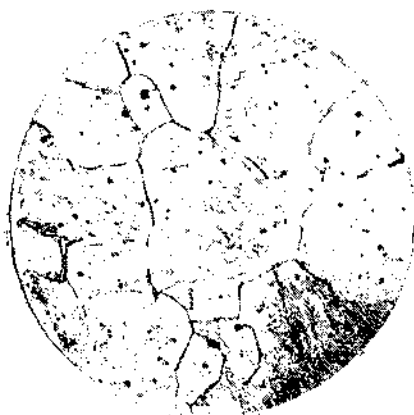


Рис. 103.



Рис. 104.

Микроструктура литого железа, содержащего небольшое количество углерода (меньше 0,1% С), представлена на рис. 103. Все поле состоит из зерен железа. В стыках между зернами виден в небольшом количестве структурно свободный цементит в виде небольших светлых

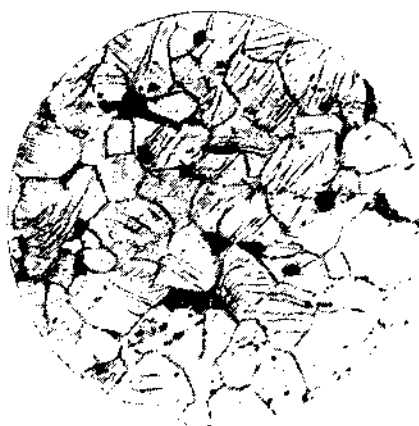


Рис. 105.

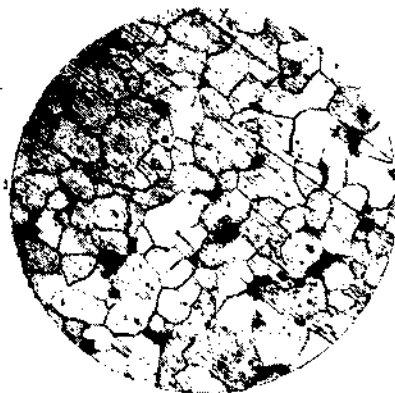


Рис. 106.

зернышек и продолговатых включений. Вообще говоря по диаграмме состояния — сочетание структур феррита и свободного цементита не должно иметь места. Однако в мягком железе, содержащем углерод в небольшом количестве, при медленном его охлаждении через точку A_1 наблюдается рассасывание частичек феррита из перлита, и тогда вместо перлита остается в свободном виде цементит. Это явление

весьма нежелательное, — в особенности, если цементит располагается в виде вытянутых включений по границам зерен феррита. Такое железо покажет пониженную вязкость, плохо сопротивляется ударным нагрузкам и ломается при изгибе:

На рис. 104 также представлено строение малоуглеродистого железа, но не литого, а сварочного. Общий светлый фон состоит из зерен феррита со вкрапленными сероватыми шлаковыми включениями кислородного характера. Шлаки вытянуты в одном направлении, указывающем направлениековки или прокатки.

Деформация кристаллитов вызывает в них сдвиги по плоскостям спайности. На рис. 105 изображена микроструктура мягкого железа после деформации сжатием. Одна из плоскостей образца была до сжатия отполирована и протравлена, и после деформации большинство зерен железа покрылось рядом параллельных линий сдвигов.

Микроструктура железа, содержащего около 0,12% углерода, представлена на рис. 106. Светлые зерна — феррит, темные — перлит. Строение перлита при увеличении 150 раз не выявляется, но более

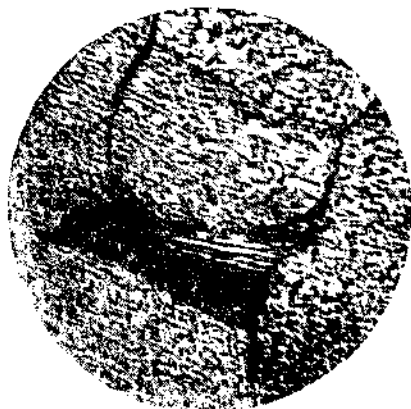


Рис. 107.

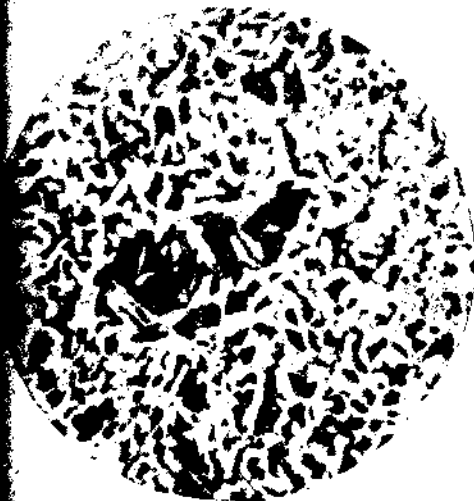


Рис. 108. Валовая сталь феррит — перлит. Азотная кислота. (Лин. увел. 100.)



Рис. 109. Валовая сталь перегретая. Азотная кислота. (Лин. увел. 50.)

сильное увеличение ($\times 2000$) четко выявляет пластинчатое строение перлита (рис. 107); выступающие светлые пластинки являются цементитом, темные же, углубленные действием реактива, ферритом. Выступающий цементит бросает тень на углубленные пластинки феррита,

и поэтому они и кажутся темными при малых увеличениях. Зерна феррита покрыты фигурами травления очень мелкими, не позволяющими разглядеть их очертание.

С увеличением количества углерода количество перлита увеличивается, а поле, занятое ферритом, уменьшается. На рис. 108 представлена структура валовой стали, содержащей около 0,3% углерода.

Здесь опять светлые составляющие — феррит, а темные — перлит. Величина зерен небольшая, указывающая на правильно произведенный отжиг.

Отжиг с перегревом вызывает увеличение зерна, и строение такой перегретой стали представлено на рис. 109 (светлый феррит + темный перлит). Еще более сильные перегревы стали с повышенной скоростью охлаждения в интервале критических температур вызывают распределение структурных составляющих по кристаллическим плоскостям.



Рис. 110.

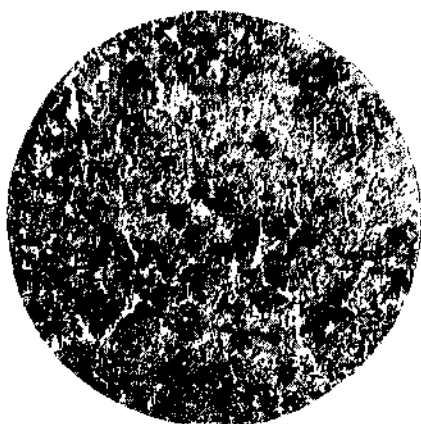


Рис. 111.

Такое строение носит название видманштетовой структуры; последняя изображена на рис. 110.

На рис. 111 представлена сталь, содержащая около 0,7% С. Все поле представляет собой зерна очень мелкого перлита, на границах которых расположена тонкая светлая оболочка феррита.

Сталь, содержащая 0,9% углерода, будет состоять из одного перлита. На рис. 112 при сильном увеличении дана микрофотография зерна перлита. Картина представляет собой ряд чередующихся пластин цементита (более тонкие) и феррита (более широкие). Выступающие тонкие пластинки цементита отбрасывают тень (тонкие темные линии). На более широких пластинах феррита намечаются фигуры травления — результат действия реактива (азотная кислота).

Медленное охлаждение стали через температуру A_{r1} или же длительная выдержка стали близ температуры A_{r1} вызывает переход пластинчатого перлита в перлит зернистый. Пластинки цементита при такой операции распадаются по длине, и каждый получившийся кусочек принимает закругленную форму — форму зернышка. Строение зернистого перлита представлено на рис. 113: общий фон ферритовый, и по нему разбросаны круглые мелкие зернышки цементита. Рис. 114

изображает перлит в промежуточной стадии — частично перешедший в зернистый, частично еще сохранивший свое пластинчатое строение. На микрофотографии можно наблюдать постепенный ход разрушения пластинок цементита и переход их в форму мелких зернышек.



Рис. 112.

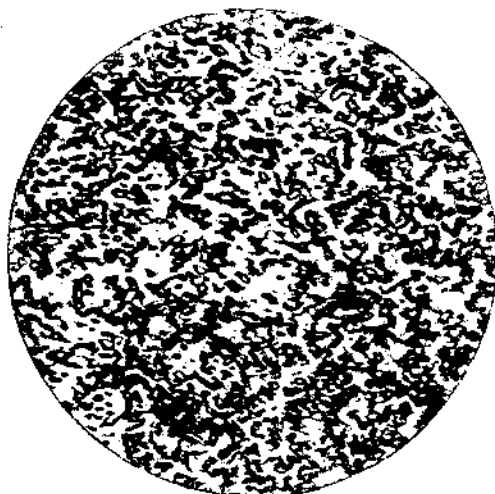


Рис. 113. Зернистый перлит. Азотная кислота. (Лин. увел. 600.)

На рис. 115 показана микроструктура заэвтектоидной стали, содержащей больше 0,9% углерода. Структура представляет собой зернистый перлит + крупные зернышки избыточного цементита.



Рис. 114.

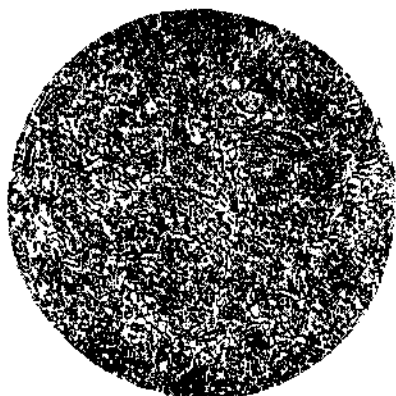


Рис. 115.

Последние получаются в результатековки стали в интервале температур $A_{ст} - A_{г1}$. Зернистый перлит получен в результате длительного нагрева немного ниже точки $A_{с1}$.

Новый нагрев этой стали выше точки $A_{ст}$, и медленное затем охлаждение сильно отразилось на микроструктуре (рис. 116): перлит

из формы зернистого перешел опять в пластинчатый, а избыточный цементит выпал уже не в виде зернышек, а в виде тонкой светлой сетки-оболочки вокруг зерен перлита.

Та же сталь, нагретая выше точки A_{cm} , но охлажденная более быстро (на воздухе), представлена на рис. 117. Перлит опять пластин-

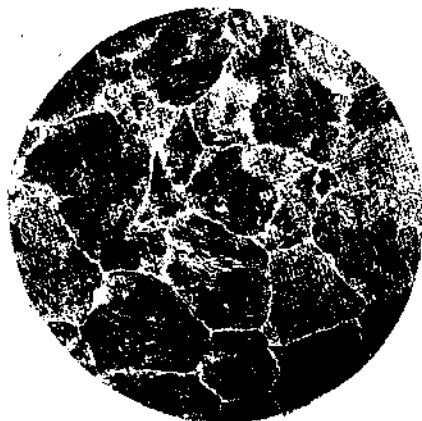


Рис. 116.



Рис. 117.

чатый, но более мелкий (сорбитообразный). Цементит же выпал в виде длинных светлых иголок, пересекающих ряд зерен перлита. Наиболее благоприятной структурой цементита с точки зрения прочности стали



Рис. 118.

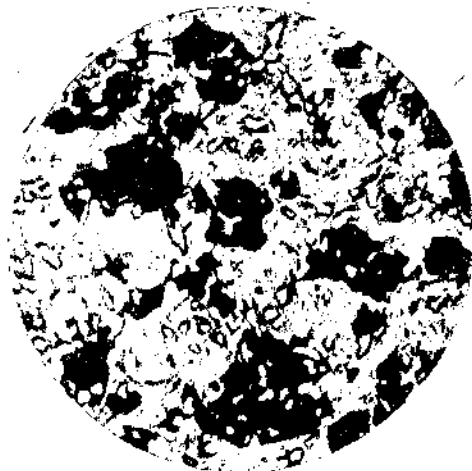


Рис. 119. Мартенсит — троостит — цементит.
Азотная кислота (Лин. увел. 600.)

является зернистый цементит. Сетчатый цементит уже в сильной степени повышает хрупкость стали, и еще больше повышает хрупкость игольчатый цементит.

При нагреве стали выше критических точек и быстром затем охлаждении углеродистая сталь приобретает структуру мартенсита и троостита в зависимости от скорости охлаждения.

На рис. 118 изображена эвтектоидная сталь умеренно закаленная. Светлые островки, покрытые темными иголками, представляют собой мартенсит, а основной темный фон, строение которого почти неразлично даже при весьма сильном увеличении — троостит.

На рис. 119 показана микроструктура умеренно закаленной надэвтектоидной стали. Температура закалки лежала между A_{cm} и A_{r1} .



Рис. 120.



Рис. 121.

Кроме темного троостита и светлого мартенсита видны круглые небольшие светлые зерна цементита, не растворившиеся в твердом растворе, так как температура нагрева была ниже A_{cm} .

Микроструктура резко охлажденной на мартенсит стали представлена на рис. 120 и 121, из которых можно увидеть различный игольчатый характер мартенсита: иголки его пересекаются под углами, равными примерно 60° и 90° .

В углеродистой стали практически нельзя вызвать такое быстрое охлаждение при закалке, которое зафиксировало бы строение твердого раствора — аустенита. Последний получается лишь в том случае, если сталь содержит еще в достаточном количестве целый ряд специальных примесей, как то марганец, никель и т. д.

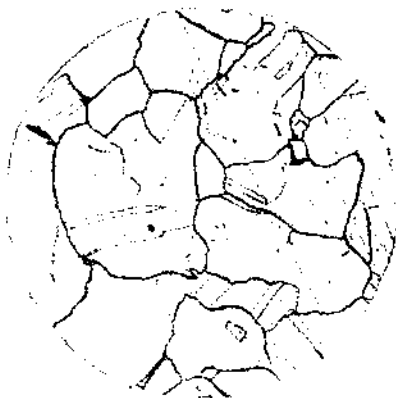


Рис. 122.

На рис. 122 представлена структура закаленной с 1000°C стали, содержащей около $0,3\%$ углерода и 25% никеля. Светлые зерна с ясно выраженными двойниками — параллельными линиями, пересекающими полиэдры, представляют собой зерна аустенита. Последние вообще склонны образовывать двойниковые линии, в особенности при деформации. Структура такой стали после деформации изображена на рис. 123. Все зерна обильно покрыты двойниковыми линиями.

Аустенит в высоколегированных нержавеющих сталях обычно не травится перечисленными выше реактивами. В этом случае можно применить 10% спиртовой или даже водный раствор соляной кислоты, или 5% раствор хлорного железа в разведенной 1:20 соляной кислоте. Хорошим реактивом является также реактив Виделла: 30 см³ глицерина + 20 см³ соляно-кислоты + 10 см³ азотной кислоты. Реактив употребляется лишь свежеприготовленным.



Рис. 123. Аустенит (деформированная 25% Ni — сталь). Азотная кислота (лин. увел. 1000).

В некоторых случаях для лучшего различения карбидных составляющих желательна окраска их в темный цвет, что легко достигается употреблением щелочных реактивов. Для выявления цементита применяется обыкновенно щелочной раствор пикрата натрия: 2 г пикриновой кислоты + 100 см³ водного раствора едкого натра

(25 г NaOH + 75 см³ воды). Реактив нагревают на водяной бане до темнокоричневой окраски, после чего опускают в него шлиф, продолжая все время нагрев на водяной бане. Продолжительность травления от 30 минут до нескольких часов.

Для выявления сложных карбидов высоколегированных сталей карбидного класса лучше применять реактивы Мураками или Яцевича. Состав реактива Мураками:

Едкого кали	10 г
Красной кровяной соли	10 г
Воды	100

Этот реактив можно употреблять и в холодном виде. При долгом стоянии реактив портится.

Состав реактива Яцевича: 100 см³ 25% раствора едкого натра смешивают перед самым употреблением с 4 см³ перекиси водорода (30%).

На рис. 124 представлена структура литой быстрорежущей стали, травленной щелочным реактивом.

В центре видна ледебуритная эвтектика, окруженная светлой составляю-



Рис. 124. Быстрорежущая сталь (литая). Пикрат натрия. (Лин. увел. 500.)

щей — аустенитом, которую в свою очередь окружает перлито-образная масса.

Микроструктура кованой и отожженной быстрорежущей стали, травленной азотной кислотой, приведена на рис. 125. На сорбитовом темном фоне разбросаны белые включения карбидов.

Закалка такой стали с $1250-1300^{\circ}\text{C}$ в масле или в струе воздуха дает структуру аустенита с карбидами. Такая микроструктура представлена на рис. 126. Светлый фон, состоящий из полиэдров, является аустенитом, а светлые мелкие зерна — карбиды. После отпуска такой стали до 600°C аустенит переходит в мартенсит, как это видно из рис. 127: игольчатый мартенситовый фон, по которому разбросаны светлые зерна карбидов.

Закалка быстрорежущей стали с перегревом вызывает образование очень крупных зерен аустенита (рис. 128), а сильный перегрев, сопровождающийся уже частичным оплавлением, кроме крупных зерен аустенита, вызывает появление ледебуритной эвтектики (рис. 129).

Травление чугунов мало отличается от травления стали. В некоторых случаях, особенно при травлении немагнитных чугунов, поверхность шлифа сильно окисляется, и разноцветная пленка окислов затемняет общую картину. В этом случае шлиф погружается на очень непродолжительное время в 5—10% спиртовой раствор соляной кислоты, быстро растворяющей пленку окислов.

Микроструктура белого чугуна изображена на рис. 130. Общий фон представляет собой ледебуритную эвтектику, а темные островки — перлит.

В сером чугуне часть углерода содержится в свободном виде (графит), а часть в связанном. В зависимости

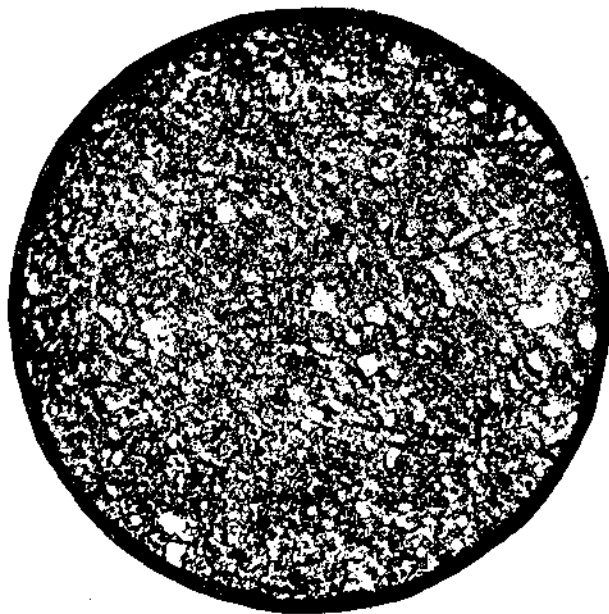


Рис. 125. Быстрорежущая сталь (отожженная). Азотная кислота. (Лин. увел. 1000.)

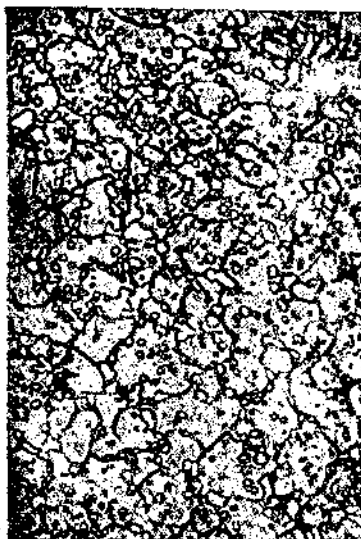


Рис. 126. Быстрорежущая сталь (закалка 1200°C в масле). Азотная кислота. (Лин. увел. 500.)

от количества последнего чугуна имеет ту или иную структуру. Чугун, содержащий связанного углерода меньше 0,9%, имеет структуру (рис. 131) перлита (общий темный фон + светлые части — фер-



Рис. 127. Быстрорежущая сталь (закалка 1200°С в масле и отпуск 600° С. (Лин. увел. 500).



Рис. 128. Быстрорежущая сталь закаленная (перегретая). Азотная кислота. (Лин. увел. 500).

рит + графит, расположенный в виде нитеобразных включений в феррите). Микроструктура такого чугуна при большом увеличении представлена на рис. 132. Кроме перечисленных структурных составля-

ющих видна еще и фосфористая эвтектика, отмеченная крестом.

Если связанного углерода в чугуне около 0,9%, то его микроструктура будет состоять из перлита и темных нитей графита (рис. 133).

Кристаллическую структуру железа можно выявить глубоким травлением персульфатом аммония.

На рис. 134 представлена микроструктура мягкого железа, протравленного 20% раствором пер-

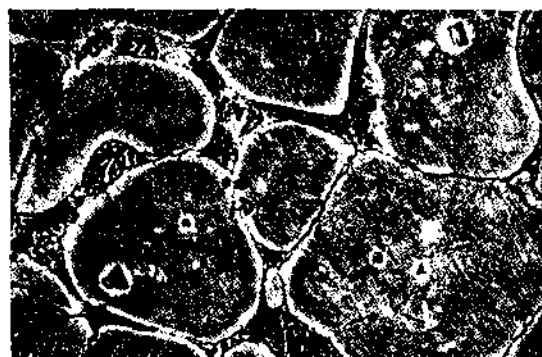


Рис. 129. Быстрорежущая сталь закаленная (сильно перегретая). Азотная кислота. (Лин. увел. 500).

сульфата аммония. Зерна покрыты отчетливыми фигурами травления, ясно доказывающими, что железо кристаллизуется в кубической системе.

Ликвация примесей, находящихся в твердом растворе в феррите, хорошо выявляется содержащими медные ионы реактивами, к числу которых относятся реактивы Стада и Обергоффера.

Составы этих реактивов приведены в главе о макроанализе. Феррит, не содержащий растворенных примесей, окрашивается в темно-коричневый цвет вследствие выделившегося на нем осадка меди. С увеличением количества примесей окраска феррита делается все светлее. Перлит данными реактивами не окрашивается.

Медь и ее сплавы. Наиболее употребительные реактивы:

1) 100 см³ аммиака + 30 капель перекиси водорода. Данным реактивом смачивается кусок ваты, которым протирают шлиф.

2) 3% раствор хлорного железа в разведенной 1:10 соляной кислоте.

3) 10% водный раствор персульфата аммония.

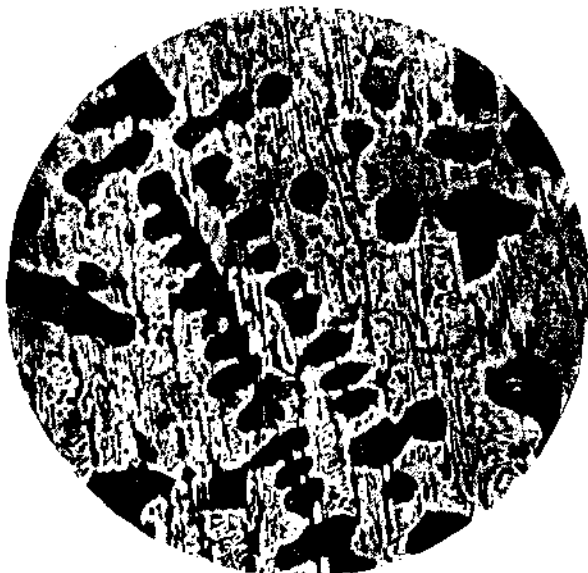


Рис. 130. Белый чугун (ледебурит). Азотная кислота.
(Лин. увел. 200.)



Рис. 131.



Рис. 132.

4) 8% раствор двуххлористой меди в аммиаке.

На рис. 135—138 изображены микроstructures медноалюминиевых сплавов (алюминиевая бронза). Микроstructure чистой меди предста-

вляет собой конгломерат полиэдров (рис. 135). Сплавы меди с алюминием, содержащие до 9% алюминия, образуют твердый раствор α (см. диаграмму состояния рис. 66), а потому и структура этих сплавов должна представить ряд полиэдров, как это и изображено на рис. 136. Медленно охлажденные медно-алюминиевые-сплавы, содержащие от 9



Рис. 133.

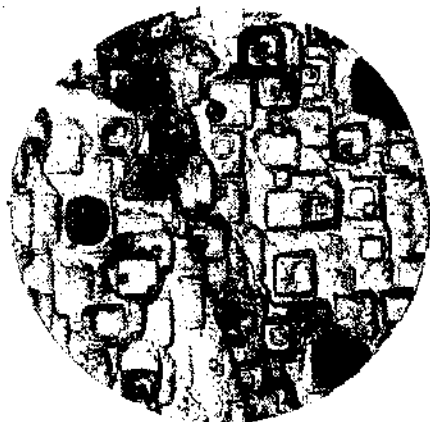


Рис. 134.

до 12% алюминия, должны состоять из кристаллов α -раствора и эвтектики, представляющей механическую смесь двух твердых растворов α и γ . Микроструктура таких сплавов изображена на рис. 137. Белые кристаллиты представляют собой твердый раствор α , а тем-

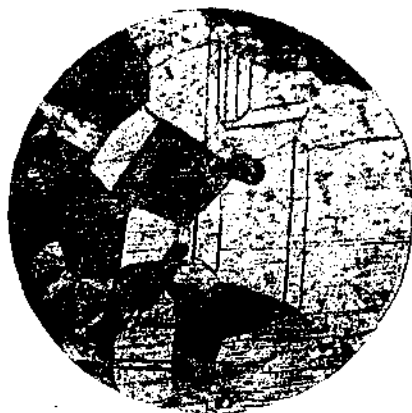


Рис. 135. Медь. (Лин. увел. 200.)

ные — эвтектику. Наконец сплав, содержащий несколько больше 12% алюминия, состоит из кристаллов эвтектики (общий фон), и между ними расположен твердый раствор γ (рис. 138).

Алюминий и его сплавы. Травление алюминиевых сплавов представляет собой нелегкую задачу, так как структура этих сплавов является с большим трудом.

Наилучшие результаты получаются при применении 10—20% водного раствора плавиковой кислоты. Реактив наливают в свинцовую чашку, погружают в нее шлиф и травят до тех пор, пока поверхность не станет матовой. После этого шлиф на

несколько секунд погружают в соляную кислоту, дабы получить больший блеск на поверхности зерен.

Обе операции объединены в реактиве Флика (100 см³ раствора плавиковой кислоты 1:10 + 15 см³ концентрированной соляной кислоты). Продолжительность травления $\frac{1}{2}$ — $1\frac{1}{2}$ мин.

Хорошие результаты дает реактив Виллелла: 30 см³ глицерина + 20 см³ плавиковой кислоты + 10 см³ азотной кислоты.

Свинцовые и оловянные сплавы. В качестве реактивов употребительны 2—5% спиртовые или водные растворы азотной кис-

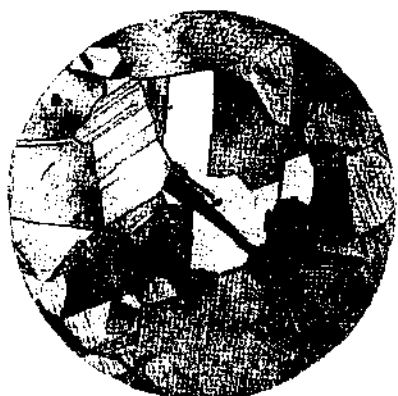


Рис. 136.

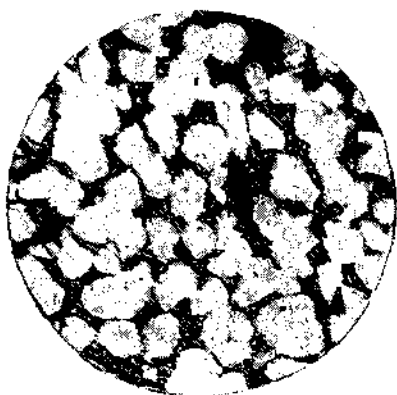


Рис. 137.

лоты. Концентрация кислоты зависит от количества свинца в сплаве. Применяются также водные растворы соляной кислоты.

Рис. 139—141 изображают микрофотографии свинцовосурьмяных сплавов. На рис. 72 представлена диаграмма состояния этих сплавов. Свинец и сурьма образуют механическую смесь. Чистый

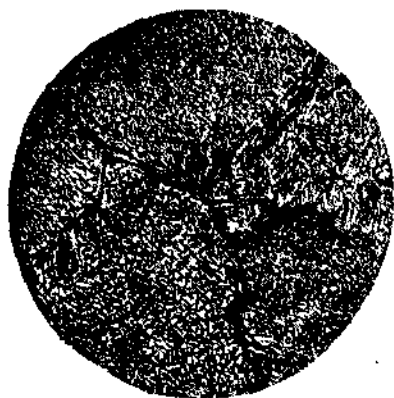


Рис. 138.

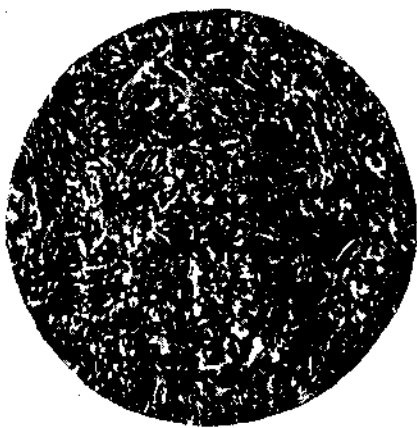


Рис. 139. Сплав свинца с 13% сурьмы.

эвтектический сплав содержит 15% сурьмы и 87% свинца. Строение такого сплава после травления азотной кислотой представлено на рис. 139. Белые частицы представляют собой сурьму; они тесно перемешаны с темными частицами свинца.

Если свинец содержит меньше 13% сурьмы, то структура его будет состоять из эвтектики и зерен свинца. Строение такого сплава

представлено на рис. 141. Здесь видна пестрая эвтектика — механическая смесь свинца и сурьмы — и темные зерна свинца.

Структура сплавов свинца, содержащих больше 13% сурьмы, состоит из эвтектики и избыточных кристаллов сурьмы. Микроструктура такого сплава представлена на рис. 141. На фоне эвтектики разбросаны четкие белые кристаллы сурьмы.

Электролиз. В тех случаях, когда травление реактивами не дает должных результатов, прибегают к помощи электролиза, погружая

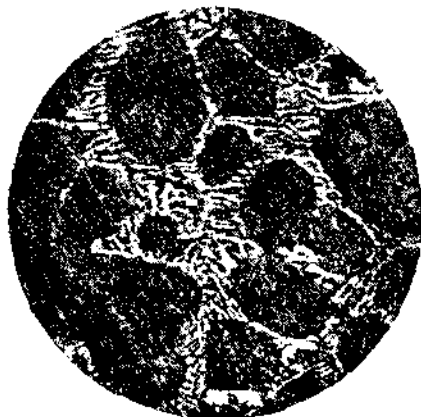


Рис. 140. Сплав свинца с 8% сурьмы.



Рис. 141. Сплав свинца с 20% сурьмы.

шлиф как анод в электролит. Для этого можно например воспользоваться платиновой чашкой *Pt* (рис. 142) и соединить ее с отрицательным полюсом аккумулятора. В чашку затем наливается раствор кислоты *Fl* и в него погружается шлиф, соединенный с положительным полюсом аккумулятора. Сила тока обычно не превышает 0,5—0,7 ампер на 1 см² шлифа, а продолжительность травления 1—5 минут.

Отпуск. В некоторых случаях проявление структуры успешно производится при помощи отпуска. Для этого образец, положенный на подставку шлифом вверх, подогревается снизу пламенем (например, бунзеновской горелки). Появляющиеся при этом цвета побежалости с повышением температуры чередуются в определенном порядке, а именно — начиная примерно с 220°C появляется желтоватый цвет, который в порядке очереди сменяется коричневым, коричнево-фиолетовым, фиолетовым, индиго, синим, голубым; наконец, при температуре 350°C цвета побежалости исчезают. Указанные температуры имеют весьма приближенные значения.

Проявление структуры при помощи отпуска основано на том, что отдельные структурные составляющие различно реагируют на отпуск — одни окисляются при нагреве быстрее других и потому различно окрашиваются.

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

ТАБЛИЦА

Важнейшие реактивы, применяемые для травления шлифов
металлических сплавов.

(Из Czochralski „Moderne Metallkunde“ с добавлениями автора.)

Материал шлифа	Р е а к т и в	Х а р а к т е р и с т и к а
Алюминий	Спиртовой раствор соляной кислоты. Едкий натр, плавиковая кислота.	<i>Общие реактивы</i>
Алюминий—цинк	Плавиковая кислота, разбавленная азотной кислотой.	То же
Алюминий—медь	То же	То же
	Азотная кислота 20% (70°C)	То же
Алюминий—магний	Хромовая кислота	То же
Висмут	Соляная кислота	То же
Железо, сталь, чугун	Спиртовые растворы пикриновой кислоты	<i>Общий реактив</i>
	Спиртовые растворы соляной кислоты	Аустенит, мартенсит
	Спиртовые растворы азотной кислоты	То же
	Хлорное железо	Аустенит
	Персульфаты	Глубокое травление для выявления ориентации феррита
	Щелочные реактивы	Окрашивание карбидов
	Медесодержащие реактивы	Выявление ликвации фосфора и других примесей
	Отпуск до 280°	Окрашивание цементита и фосфида железа
	Спиртовые и водные растворы органических кислот	Окрашивание сернистых включений
Золото	Бром-соляная кислота	Общий реактив
Сплавы золота	То же	
Кадмий	Хромовая кислота	Общий реактив
Кадмиевые сплавы	То же	То же
Магний	Спиртовые растворы плавиковой кислоты	То же
	Хромовая кислота	То же

Материал шлифа	Р е а к т и в ы	Х а р а к т е р и с т и к а
Медь и ее сплавы	Углекислые калий и натрий	То же
	Хлористый аммоний	То же
	Аммиак + перекись водорода	Общий реактив
	Хромовая кислота	То же
	Персульфаты	То же
	Раствор хлористой меди в аммиаке	То же. Выявляет главным образом дендритную ликвацию
	Азотная кислота	То же
	Хлористое железо	То же. Выявляет главным обра- зом полиэдрическое строение
	Серная кислота	$\alpha + \beta$ латунь
Никель Нейзильбер Олово	Отпуск	Марганцовистая латунь, бронза $\alpha + \delta$
	Соляная кислота	Общий реактив
	То же, что и для меди	То же
Свинец	Соляная кислота	
	Соляная кислота + хлористый калий	1 : хлористого калия на 1000 см ³ разведенной 1:10 соляной кислоты
	Соляная кислота	Общий реактив
Баббиты	Азотная кислота	То же
	То же	То же
	Уксусная кислота	То же
Серебро	Перекись водорода	То же
	Азотная кислота	Общий реактив
	Уксусная кислота	То же
Сплавы серебра	То же	То же
	Соляная кислота	То же
	Соляная кислота	То же
Сурьма	Хромовая кислота	Для удаления пленки желтого цвета шлиф погружают в сла- бый раствор едкой щелочи
Цинк		

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

3. Макроанализ.

Структура металла, видимая невооруженным глазом или при небольших увеличениях при помощи лупы, называется макроструктурой.

Макроскопически могут быть изучены величина, форма и расположение отдельных кристаллов, если они при благоприятных условиях достигнут большой величины.¹

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

Макроскопические исследования можно производить или над изломами сплавов или над специально приготовленными (шлифованием) поверхностями их, так называемыми макрошлифами, протравленными соответствующими реактивами.

В некоторых случаях травление поверхностей излома также приносит пользу, уточняя все исследования. Например при поверхностной цементации железа весьма большую роль играет толщина науглероженного слоя. Наиболее точно можно измерить толщину этого слоя в условиях производства, особенно тогда, когда вопрос приходится решать без промедления. Чаще всего о глубине цементации судят по излому цементованного и затем закаленного пробного бруска. Этот способ неточный, и для уточнения его такой излом нужно погрузить на 1—2 минуты в спиртовой раствор дихлористой меди следующего состава: 100 см³ денатурированного спирта, 1 см³ соляной кислоты 2 г $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Мягкая не науглероженная середина покроется медной пленкой, науглероженный же наружный слой останется незатронутым.

О точности этого метода можно судить по данным табл. IX, в которой приведены глубины цементации, определенные по простому излому, излому, покрытому медью, и при помощи микроанализа. Из табл. IX легко видеть, что результаты, полученные с образцами, покрытыми медью, почти совпадают с результатами, полученными помощью микроанализа.

Более точные результаты дает макроскопическое исследование шлифов. Шлиф готовится следующим 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 плоскость обрабатывается последовательно целым рядом номеров шлифовочной бумаги, переходя постепенно на

¹ Примером такого хорошо развитого кристалла может служить стальной кристалл Д. К. Чернова, полученный в усадочной раковине 100-тонной болванки его длина 39 см и вес 8 $\frac{1}{2}$ фунтов.

ТАБЛИЦА IX.

Диаметр проб- ных брусков в мм	Глубина цементации, определенная:		
	по простому излому	по излому, покрытому медью	при помощи микронализа
	в мм		
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

более мелкие номера. Следует 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 шлифовочную бумагу № 00 — необходимо одним 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, высушивается, после чего можно шлифовать на следующей более мягкой бумаге. Обмывка шлифа нужна для того, чтобы не перенести крупный наждак на бумагу с более мелким наждаком. Шлифовка кончается на наждачной бумаге № 00 до № 0000, после чего шлиф травится.

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 вызвать ложную картину макрошлифа. 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 реактива могут быть крупно-кристаллическими, губчатыми, легко смываемыми или, наоборот, мелко-кристаллическими, плотными и несмываемыми. К реактивам, дающим первого рода осадок, относится в первую очередь реактив E. Heina, представляющий собой 10—12% водный раствор двойной хлористой соли меди и аммония. Это быстро действующий реактив. Шлиф погружается в реактив и травится в течение $\frac{1}{2}$ —1 минуты, затем быстро переносится под сильную струю воды и осадившаяся медь счищается ваткой.

Реактив Гейна особенно хорош для выявления зональной ликвидации в сравнительно малоуглеродистой (до 0,6% C) 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. Поверхность шлифа может быть обработана не особенно мелкими номерами бумаги (достаточно № 0).

При отсутствии двойной силы хлористых меди и аммония, реактив может быть приготовлен по следующему рецепту:

Хлористого аммония (NH_4Cl)	53 г
Хлористой меди (CuCl_2)	85 г
Воды (H_2O)	1000 см ³

Видоизменением реактива Гейна является реактив Humfrey'a, дающий глубоко протравленный рисунок. Шлиф сначала погружают на 1—2 минуты в реактив Гейна, а затем, не смывая осадок, переносят шлиф в реактив Humfrey'a:

Хлористого аммония (NH_4Cl)	53 г
Хлористой меди (CuCl_2)	85 г
Соляной кислоты (HCl)	66 см ³
Воды (H_2O)	1000 см ³

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

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

Канифоль	50%
Сала	25%
Парафина	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. 143 изображен фотографический снимок с полученного таким способом отпечатка турбинного диска. Четкость картины говорит о достоинстве этого способа печатания.

Для выявления тонких структур как реактив Гейна, так и реактив Humfrey'a слишком грубы.

В этом случае применяют вторую группу реактивов:

1. Реактив Р. Oberhoffer'a 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 „

2. Реактив Stead Le Chatelier:

Этиловый спирт 95°	100 см ³
Вода	10 „
Соляная кислота концентр.	2 г
Хлористая медь (CuCl_2)	1 „
Цикриновая кислота	0,5 „

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

Отполированные шлифы, протравленные реактивами этой группы, можно рассматривать под микроскопом (см. гл. о микроанализе).

Кроме перечисленных реактивов употребительно 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).

Микроскопические 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 обнаруживания серы большим распространением пользуются способы, предложенные Е. Неуп'ом и Вауманн'ом.

Способ Е. Неуп'a 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 бледно-желтый цвет.

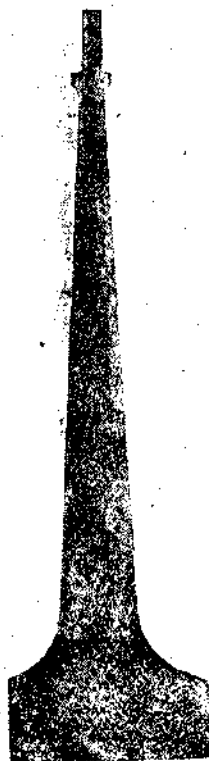


Рис. 143.

Способ Вацманн'а—более удобный и состоит в том, что поверхность шлифа покрывается фотографической бромосеребряной бумагой, смоченной 5% водным раствором серной кислоты. Необходимо следить, чтобы бумага плотно прилегала к шлифу и чтобы не образовывались пузырьки, которые удаляются поглаживанием бумаги кисточкой. Через 10—15 секунд бумага осторожно снимается и фиксируется. Вся операция производится при дневном свете. Бумага в местах, соприкасавшихся с серой, будет окрашена в темный коричневый цвет. Причина окрашивания состоит в том, что серная кислота, которой пропитывается бромосеребряная бумага, разлагает сульфиды железа и марганца, и получающийся при этом сероводород образует на бумаге темное сернистое серебро.

J. Durand¹ предложил вместо бромосеребряной бумаги пользоваться пленкой или пластинкой, так как этим достигается возможность размножить полученные отпечатки.

На рис. 144—147 даны фотографии макрошлифов.

Рис. 144 представляет собой шлиф сырой отливки сплава меди и никеля, травленный. Отчетливо видны дендриты.



Рис. 144. Сплав меди и никеля: дендриты. (Лин. увел. 6.)

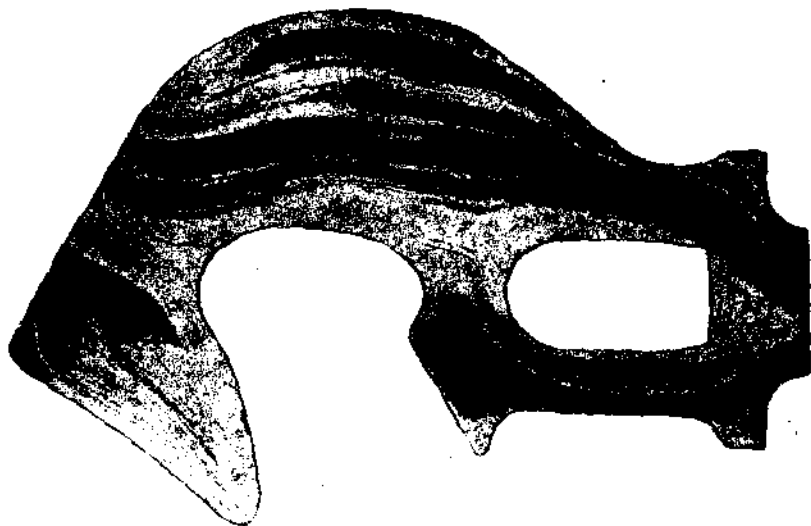


Рис. 145. Макрошлиф неправильно изготовленного крюка.

На рис. 145 изображен шлиф тягового крюка, сломавшегося в работе. Крюк вырезан из целого листка, о чем свидетельствует рисунок волокон материала.

¹ 1) *Génie civil*, 85, стр. 131/3, 1924; 2) *St. u. E.* № 36, стр. 153, 1925.

На рис. 146 такой же крюк, но выкованный из полосы. На рис. 147 — сегрегация серы в круглом стержне; отпечаток на бромосеребряной бумаге.

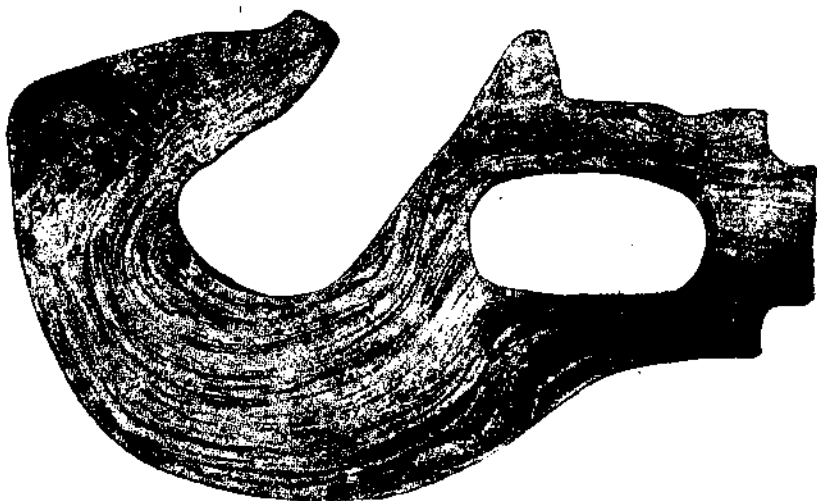


Рис. 146. Макрошлиф правильно изготовленного крюка.

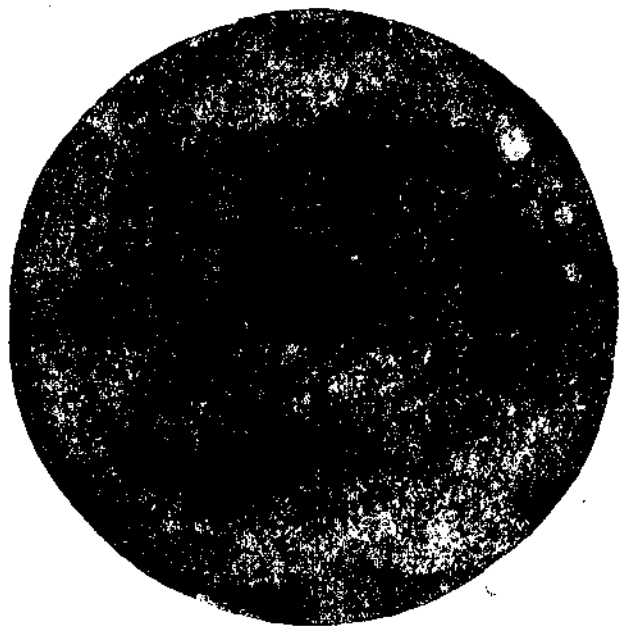


Рис. 147. Серистые включения (темные).

Из этих примеров видно, какое удобство представляет макроанализ при суждении об однородности сплава и характере физического строения металлов. По этим же примерам можно прийти к заключению, как ошибочны могут быть суждения о химическом составе по

одному лишь химическому анализу без макроанализа. Проба, взятая для химического анализа не из места ликвации, 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 сопровождении макроанализа дает чрезвычайно четкую картину распределения различных составляющих в изделии.

4. Проявление линий сдвигов в наклепанном железе.

Микроскопические и макроскопические исследования чрезвычайно расширили область исследования металлов. Данные этих методов в связи с химическим анализом позволяют предугадывать целый ряд свойств металлических сплавов. Но все же иногда результаты этих испытаний расходились с результатами испытаний физических свойств сплавов. Чувствовалось, что 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 проявление линий сдвигов в наклепанном материале. Этот вопрос имеет чрезвычайно большое значение в технике, так как возможность проявления линий сдвигов позволила бы проверить правильность расчета целых конструкций и определять распределение напряжения в отдельных деталях.

Над разрешением этой задачи работали уже давно. Среди пионеров следует упомянуть Hartmann,¹ который первый указал на проявление линий сдвигов в железе при растяжении его за пределом упругости (линии Hartmann'a), затем Pohlmeier² и Rauschinger.³ Впервые весьма подробно освещен был этот вопрос Martens'ом.⁴ 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 Ad. Fry,⁴ P. Oberhoffer'a и Mia Toussaint'a,⁵ предложивших вырабатывать ими методы травления наклепанного железа.

Реактив A. Fry представляет собой раствор хлористой меди в соляной кислоте; количество соляной кислоты при этом берется из такого расчета, чтобы раствор не мог осаждать на железо медь. Процесс изготовления шлифа протекает в следующем порядке: образец выдерживается в течение получаса при 200° C, после чего распиловкой, шлифовкой и полировкой изготовляют шлиф. Для макроанализа можно ограничиться шлифовкой на мелком номере без полировки.

¹ Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts, 1896, P. 44.

² Martens, Materialkunde für Maschinenbau, Bd. I, S. 69.

³ Mitt. aus dem Mech.-Techn. Laborat. d. Tech. Hochschule, München, 1897.

⁴ St. u. Eisen. № 32, 1921.

⁵ St. u. Eisen. № 43, 1924.

Для травления на микро Fry дает следующий реактив:

Соляной кислоты концентрированной	4 см ³
Воды	30 "
Этилового спирта	25 "
Хлористой меди (кристалл.)	5 г

Шлиф травится непродолжительное время; если нужно, травление чередуется новой полировкой и т. д.

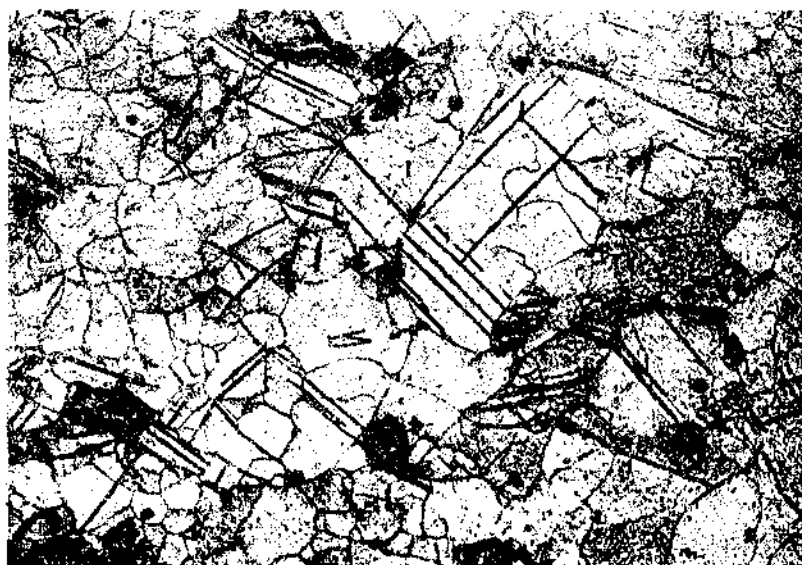


Рис. 148. Линии скольжения на зернах феррита. Реактив Fry. (Лин. увел. 20.)

Для макроскопического анализа дается следующий реактив:

Соляной кислоты концентрированной	120 см ³
Воды	100 "
Хлористой меди (кристалл.)	90 г

В этом растворе шлиф травится в течение 1—3 минут. После этого шлиф вынимается из реактива, и травление продолжается путем

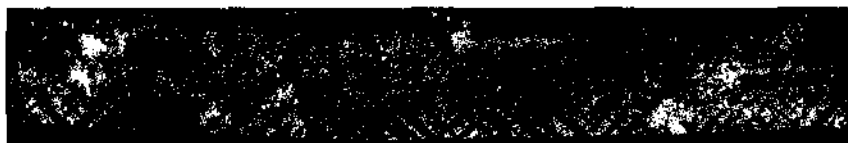


Рис. 149. Травление реактивом Fry. Котельное железо. Натуральная величина.

протираания шлифа пропитанной реактивом тряпочкой, посыпанной порошком хлористой меди. Все травление занимает от 2 до 20 минут, после чего шлиф промывается спиртом и высушивается. Промывать шлиф водой не рекомендуется во избежание загрязнения осаждающейся меди.

На рис. 148^{*} представлена микрофотография шлифа железа, протравленного реактивом Fry. Легко видеть распадение зерен феррита и линии скольжения на них.

На рис. 149 изображен макрошлиф железа, деформированного легким изгибом и протравленного по методу Fry.

На рис. 150 изображен макрошлиф железа, деформированного вдавливанием пуансона (травление реактивом Fry). Ясно видны три зоны: верхняя — темная, наиболее деформированная; затем светлая, где видны следы рекристаллизации при нагреве (образец нагревался перед травлением до 600°C), и, наконец, третья опять темная — кривые направления вглубь образца.



Рис. 150. Деформация вдавливанием. Реактив Fry.
(Натуральная величина.)

Появление этих темных линий Fry 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 материала. Поэтому можно предположить, что напряжения, возникающие вдоль этих плоскостей скольжения, значительно больше напряжений других мест образца. А это обстоятельство служит причиной того, что эти места больше подвержены действию реактива, в результате чего они и обнаруживаются травлением.

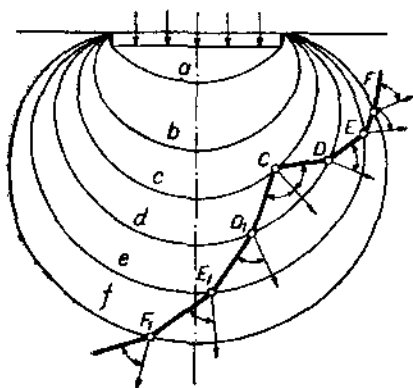


Рис. 151.

На рис. 151 схематически изображено направление этих линий. Здесь $a, b \dots f$ — зоны равномерного распределения нагрузки. Строя по углу α плоскости скольжения, мы для данного разреза получим кривую $FEDCD'E'F'$, весьма схожую с теми кривыми, которые изображены на рис. 150.

Как показали опыты J. Dudley Jevons,¹ наиболее отчетливая картина получается при небольших деформациях. В сильно деформиро-

вую $FEDCD'E'F'$, весьма схожую с теми кривыми, которые изображены на рис. 150.

Как показали опыты J. Dudley Jevons,¹ наиболее отчетливая картина получается при небольших деформациях. В сильно деформиро-

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

ванных образцах эти линии сливаются, и картина получается менее четкая (рис. 152—154).

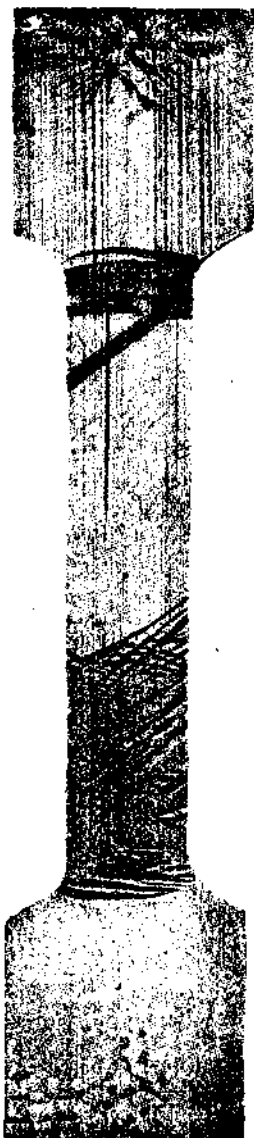


Рис. 152. Железо, растянутое на 10%. Ре-актив Fry.

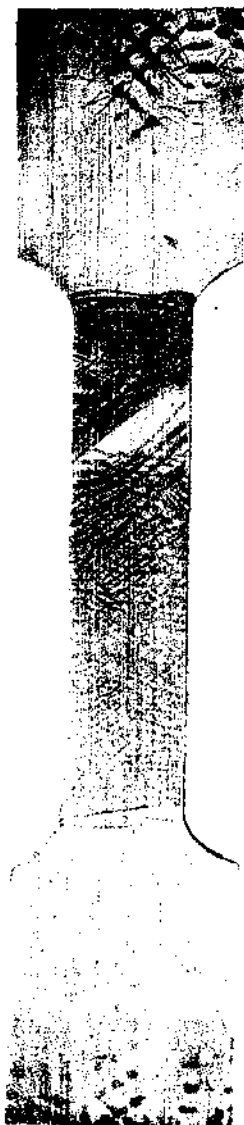


Рис. 153. Железо, растянутое на 20%. Ре-актив Fry.

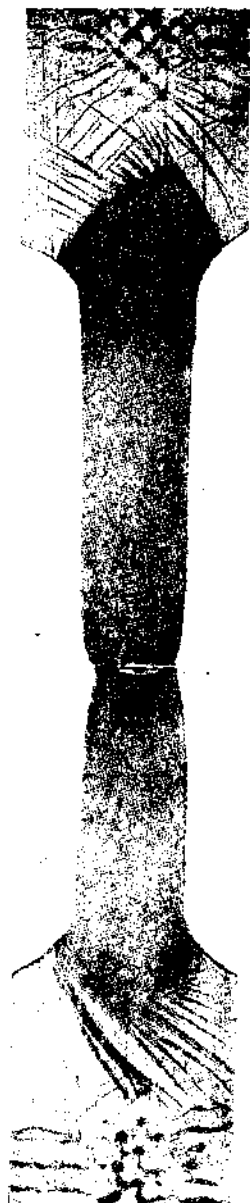


Рис. 154. Железо, растянутое на 29%. Ре-актив Fry.

Р. Oberhoffer и Mia Toussaint воспользовались известным явлением, что железо сильнее ржавеет вдоль линии Hartmann'a, и, рассматривая процесс ржавления как явление электролитное, предложили выявлять эти линии, пользуясь электролизом.

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

В качестве раствора лучшим считается следующий:

Воды	3000 см ³
Соляной кислоты	10 "
FeCl ₃	300 "

Наилучшая температура ванны $15-20^{\circ}\text{C}$. Замыкая анод и катод, можно получить требуемый ток, но он весьма слаб, и потому травление идет медленно. Поэтому лучше пользоваться аккумулятором, регулируя силу тока от 0,002—0,003 ампер на 1 см² шлифа. Продолжительность травления $\frac{1}{2}$ —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.

5. Определение внутренних пороков.

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 и прибегают 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 качества изделия, на которые можно рассчитывать.

Однако эти испытания не всегда достаточны. Ряд внутренних дефектов при этом могут остаться невыясненными, и для их выявления пользуются другими методами.

Мы рассмотрим здесь некоторые способы обнаружения двух, чрезвычайно опасных внутренних дефектов: 1) внутренних трещин и раковин и 2) внутренних напряжений, полученных в результате или холодной или термической обработки.

а) Определение внутренних трещин и раковин. Один из способов обнаружения внутренних трещин и раковин состоит в том, что изделие намагничивается катушками K_1 и K_2 (рис. 155). Магнитные линии, встретив на своем пути дефект d , сгущаются и частично перераспределяются по воздуху. Плоская катушка α , передвигаемая с равномерной скоростью по поверхности изделия, пересекая вытесненные дефектом d за поверхность магнитные линии, индуцирует в себе ток, появление которого отразится на положении стрелки гальванометра. Таким образом можно определять трещины и раковины, скры-

тые внутри изделия. Способ этот имеет тот недостаток, что он, во-первых, мало чувствителен к небольшим дефектам, во-вторых, улавливает также и наклепанные места, вводя этим в заблуждение исследователя.

Более удобным является способ измерения электрического сопротивления (рис. 156). Через испытуемый образец пропускается электрический ток, лучше всего — постоянный. Затем специальной вилкой p , представляющей собой два изолированных друг от друга острия, расстояние между которыми есть величина постоянная, измеряют па-

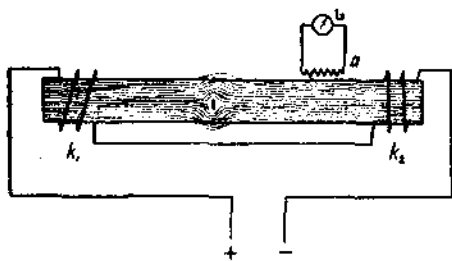


Рис. 155.

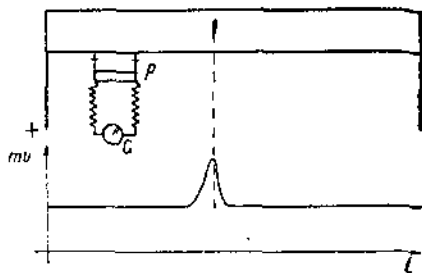


Рис. 156.

дение потенциала вдоль образца. При установившемся токе силой I ампер и при постоянной площади сечения образца, гальванометр уловит разность потенциалов между остриями вилки, равную $v = I \cdot r$, 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.

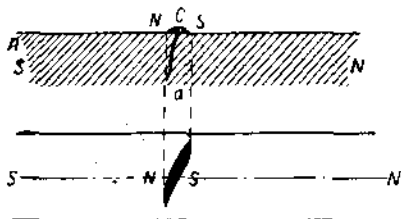


Рис. 157.

Не менее ценным для обнаружения очень мелких, не видимых невооруженным глазом поверхностных трещин является так называемый магнитный метод, разработанный R. W. Bailey.¹ Стальное изделие намагничивается, если сталь обладает большим достаточным магнетизмом, как например закаленная сталь, или же вносится в сла-

бое магнитное поле (для отожженной стали) магнитного напряжения около 10 гауссов. В таком состоянии изделие погружается в керосин или спирт со взмученным в нем железным или стальным порошком. Порошок лучше всего изготовлять из мелкого крокуса, применяемого в металлографических лабораториях для полировки. Крокус (Fe_2O_3) восстанавливается прокаливанием при $600-700^\circ C$ в струе водорода или же с порошком древесного угля. В результате получается очень мелкий порошок железа или стали.

¹ J. Inst. Mech. Eng., 1928.

В случае если в материале имеется трещина a (рис. 157), то на месте трещины образуются полюса N и S , которые соберут стальные пылинки, плавающие в спирте или керосине. Если теперь вынуть изделие из раствора, то на поверхности обнаружатся темные линии

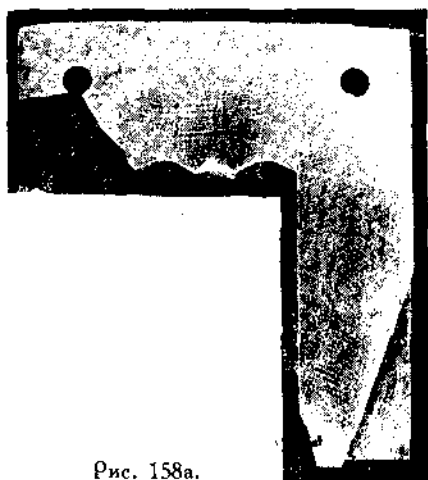


Рис. 158а.

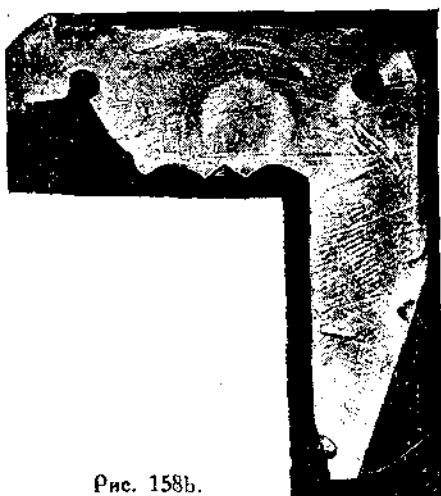


Рис. 158б.

скопления стальных пылинок над трещинами. Эти линии обычно раз в 50—100 шире самой трещины и это обстоятельство позволяет видеть трещинки (место трещин) шириной в 0,01 мм невооруженным глазом.

Этим способом чрезвычайно просто и быстро можно находить тонкие трещинки в инструментах и в мелких и крупных машинных

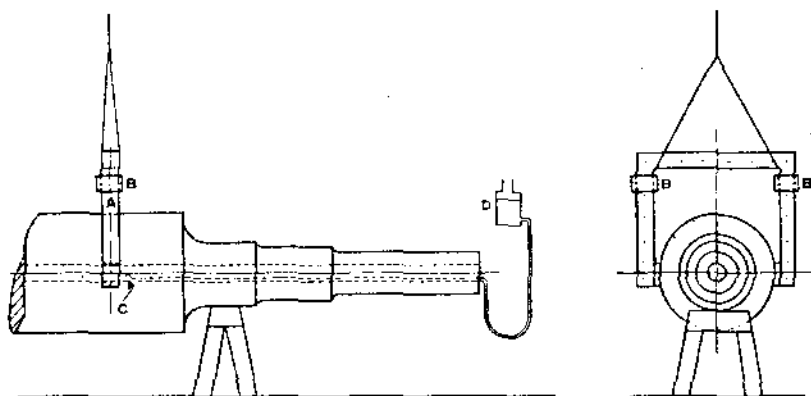


Рис. 159.

деталей. На рис. 158 а и б представлена часть сломавшейся штампы, обнаружившей большое количество мелких трещин, невидимых невооруженным глазом (158а), но обнаруженных магнитным методом (рис. 158б).

Рис. 159 иллюстрирует испытание внутренней поверхности сверленого роторного вала турбогенератора. Нужно отметить, что про-

дольная дыра в таком вале делается не по конструктивным соображениям, а исключительно с целью обнаружить дефекты в середине вала. На вал надевается железное ярмо *A*, на котором имеются обмотки *B* и *B*. Ток, проходя через обмотки, образует в замкнутом контуре „ярмо — вал“ магнитный поток. Из сосуда *D* во внутрь вала подается керосин или спирт со взмученным железным порошком. Из конца шланга *C* внутренняя поверхность обливается этой жидкостью. После этого поверхность осматривается зрительной трубой с зеркалом. Целый ряд трещин, не обнаруженных простым осмотром



Рис. 160а.

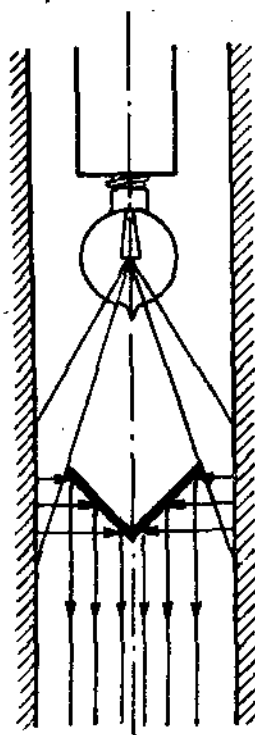


Рис. 160б.

зрительной трубой, был обнаружен этим методом: трещины эти являлись началом весьма крупных дефектов, впоследствии обнаруженных при расточке таких отверстий.

Прибор для осмотра подобных сверленных отверстий состоит из зрительной трубы и зеркала. На рис. 160 а и б представлено устройство конического зеркала,¹ позволяющего наблюдать одновременно полную цилиндрическую поверхность.

б) Определение внутренних напряжений. Внутренние напряжения в деталях могут появляться как при холодной, так и при термической обработке.

¹ H. Rickli, Mechanical degree of safety in large turbo-generators. Доклад на World power conference sect. meet., Tokyo, 1929.

Образование напряжений при холодной обработке легче всего проследить при изгибе призматического стержня за пределом упругости. Диаграмма напряжений выразится кривой aOa (рис. 161), причем участки этой диаграммы в пределах упругой деформации $a'Oa'$ будут прямолинейны, а участки, соответствующие пластичной деформации aa' , будут криволинейны.

Если теперь снять изгибающую нагрузку, то брусок начинает выпрямляться, но эти деформации будут лишь упругими, и деформация закончится тогда, когда упругие напряжения, изображенные прямой bOb , уравновесят напряжения aOa . Таким образом, вычитая из напряжений bOb напряжения aOa , мы получим значения остаточных напряжений, заштрихованных на чертеже.

Участки abc и $da'O$ будут испытывать напряжения сжатия, а участки $Oa's$ и abd — напряжения растяжения.

Образование напряжений при волочении, прокатке и т. п. совершается по более сложному пути. Эти напряжения очень часто достигают весьма значительных размеров, суммируются с напряжениями

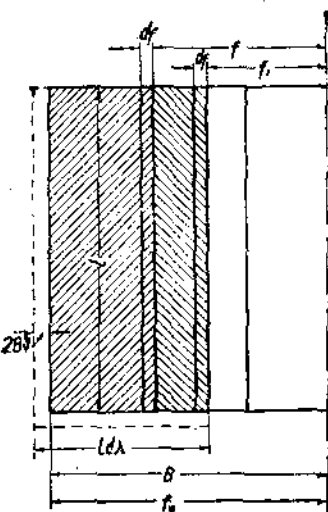


Рис. 162.

от действия внешних сил и неожиданно разрушают изделие. Поэтому своевременное обнаружение этих напряжений является весьма существенной задачей лабораторий, исследующих качество материала и изделий. Качественное определение этих напряжений можно производить путем погружения изделий в некоторые растворы и жидкие металлы. Для латуни таковыми являются растворы аммиака, ¹ ртуть или ртутные соли ² (например 10% раствор сулемы). Для стали — слабые растворы щелочей ³. Выдерживая изделия в этих растворах несколько часов, вызывают появление трещин, если конечно в изделиях были внутренние напряжения.

Однако эти способы ничего не говорят о величине внутренних напряжений. Последние определяются последовательным стачиванием тонких слоев изделия и измерением изменения размеров изделия.

Сняв слой материала, мы нарушаем установившееся в изделии равновесие внутренних напряжений. Как следствие этого явления, изделие деформируется, и создается новое равновесное состояние.

¹ C. Diegel, Verh. Ver. Bef. Gewerbebeftellss. 85, 177—184, 1906.

² H. Leistner, Z. f. Metallkunde, 16, 429, 1924.

³ D. Hanson, Ingg. III, 467—469, 1921. J. A. Jones, Ingg. III, 469—470, 1921.

G. Sachs¹ дал метод расчета этих напряжений в круглых стержнях и трубах.

Имея трубу или цилиндрический стержень (рис. 162) длиной l и наружного диаметра b , начнем с внутренней поверхности стачивать последовательно слой за слоем. Длина цилиндра изменится на некоторую величину λl , а диаметр на величину ϑb . При снятии тонкого слоя поперечного сечения df с внутренней цилиндрической поверхности, площадь поперечного сечения отверстия которой равна f_1 , мы измерением определим в цилиндре изменение длины $d\lambda$ и толщины $d\vartheta$. Эти данные позволяют вычислить продольные напряжения ds_b и тангенциальные dt_b на наружной поверхности f_b :

$$ds_b = \frac{E}{1-\mu^2} (d\lambda - \mu d\vartheta), \quad dt_b = \frac{E}{1-\mu^2} (d\vartheta + \mu d\lambda), \quad (1)$$

где E — модуль упругости,
 μ — число Пуассона.

В некотором слое f можем принять продольные напряжения ds равными ds_b и тогда по уравнениям для толстостенных труб можем написать, что тангенциальные напряжения dt и радиальные dr равны:

$$\left. \begin{aligned} dt &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{f_b + f}{2f} \right) (d\vartheta + \mu d\lambda) \\ dr &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{f_b - f}{2f} (d\vartheta + \mu d\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Вытачивая цилиндр до поверхности f , мы уничтожим в ней продольные напряжения s' , тангенциальные напряжения t' и радиальные r' :

$$\left. \begin{aligned} s' &= - \frac{E}{1-\mu^2} (\lambda + \mu \vartheta) \\ t' &= - \frac{E}{1-\mu^2} \frac{f_b + f}{2f} (\vartheta + \mu \lambda) \\ r' &= \frac{E}{1-\mu^2} \frac{f_b - f}{2f} (\vartheta + \mu \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Однако и после того как цилиндр выточен до поверхности f , на последней еще будут напряжения s'' , t'' и r'' . Эти напряжения исчезнут лишь после снятия слоя df и для них имеем:

$$\left. \begin{aligned} s'' &= \frac{E}{1-\mu^2} (f_b - f) \cdot \frac{d(\lambda + \mu \vartheta)}{df} \\ t'' &= \frac{E}{1-\mu^2} (f_b - f) \cdot \frac{d(\vartheta + \mu \lambda)}{df} \\ r'' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

¹ Z. Metallkunde, Bd. 19, стр. 352, 1927.

Таким образом суммарные напряжения на поверхности f были равны:

$$\left. \begin{aligned} s &= s' + s'' = \frac{E}{1-\mu^2} \left[(f_b - f) \frac{d(\lambda + \mu\vartheta)}{df} - (\lambda + \mu\vartheta) \right] \\ t &= t' + t'' = \frac{E}{1-\mu^2} \left[(f_b - f) \frac{d(\vartheta + \mu\lambda)}{df} - f_b \frac{f}{2f} (\vartheta + \mu\lambda) \right] \\ r &= \frac{E}{1-\mu^2} \frac{f_b - f}{2f} (\vartheta + \mu\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В этих уравнениях величина $\frac{E}{1-\mu^2}$ постоянная, и ею нужно за-
даться или же определить ее из опыта. Площадь f определяется из-
мерением внутреннего диаметра цилиндра после каждой обточке
($f = \pi r^2$), где r измеренный радиус внутренней поверхности. Площадь
 f_b определяется перед началом обточки измерением первоначального
диаметра цилиндра ($f_b = \frac{\pi b^2}{4}$).

Величина $\lambda + \mu\vartheta = A$, так же как и $B = \vartheta + \mu\lambda$, вычисляется после
каждой обточки по данным изменения относительного удлинения ци-
линдра λ и относительного утолщения (увеличения диаметра) — ϑ .
Эти данные наносят в виде кривой на систему координат, отклады-
вая, например, по оси ординат значения A и B , а по оси абсцисс
значения f . Имея кривые (f, A) и (f, B), легко уже для каждого зна-
чения f определить значение $\frac{dA}{df}$ и $\frac{dB}{df}$. В дальнейшем построение
напряжений s, t и r в зависимости от f или r не вызывает затруд-
нений.

Данный способ дает чрезвычайно богатую картину распределения
продольных радиальных и тангенциальных внутренних напряжений
в стержнях в цилиндре. Недостатком его является то обстоятельство,
что испытываемые объекты разрушаются и не могут быть больше
использованы. Не исключена конечно возможность отрезать от длин-
ных объектов пробные куски, и по данным испытаний их судить
о напряжениях во всем изделии.

В заключение нужно отметить, что измерение нужно производить
с большою точностью, измеряя не одну длину или диаметр, а не-
сколько — в различных местах.

Образование внутренних напряжений при терми-
ческой обработке можно себе представить следующим обра-
зом.¹ Представим себе стальной цилиндр равномерно прогретый до
700°С (рис. 163), и начнем теперь этот цилиндр охлаждать,² напри-
мер, на воздухе. Допустим, что в некоторый момент температура
наружного слоя опустилась до 600°С, и температура в цилиндре
распределена по кривой bbb . Так как в пределах 600—700°С сталь
еще пластична, то изменение температур от aaa до bbb никаких на-
пряжений в цилиндре не вызовет. Допустим далее, что цилиндр про-

¹ а) N. Kalakoutsky, Internal stresser in steel, London, 1888; б) E. Maue-
rer, St. u. Eisen, стр. 1331, 1927; в) E. Hohegger, Brown Boveri Mitt.; г) Оди-
н И. А., Вестник металлопромышленности, 1930.

² Мы не рассматриваем более сложный случай, сопровождающийся еще и явле-
ниями закалки.

должает охлаждаться и что наружный слой принял 400°C , а внутренний 500°C , и что кривая распределения температур sss параллельна кривой bbb . Тогда, принимая коэффициент расширения стали равным для всех температур, мы в праве заключить, что и в этом положении цилиндр не имеет внутренних напряжений, так как для всех слоев разность температур между sss и bbb одна и та же и равна 100°C .

Продолжим охлаждение цилиндра таким образом, чтобы кривые распределения температур оставались параллельны друг другу. Тогда легко прийти к заключению, что в тот момент, когда наружный слой примет температуру 0°C (или комнатную), а внутренний слой будет иметь 100°C , никаких внутренних напряжений в цилиндре не будет.

Начиная теперь уравнивать температуру внутреннего слоя с температурой наружного слоя, получим образование внутренних напряжений. Сталь, приобретая свои упругие свойства, не позволит наружному, уже охладившемуся слою участвовать в сокращении размеров,

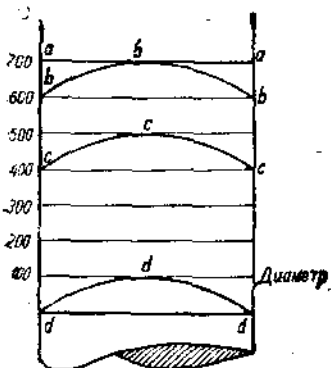


Рис. 163.

вызванных охлаждением внутреннего слоя. С другой стороны, внутренний слой, понижая свою температуру, будет стремиться уменьшить свой удельный объем. В результате упругого сцепления всех частей цилиндра возникнут напряжения. Внутренний слой, сокращаясь в объеме, будет сжимать наружный слой, а последний, препятствуя сокращению внутреннего слоя, будет его растягивать. Когда температура уравниется, наружный слой будет испытывать напряжения сжатия, а внутренний слой напряжения растяжения.

Величина этих напряжений будет зависеть от разности (T) температур наружного и внутреннего слоев в тот момент, когда наружный слой цилиндра приобретет упругие

свойства. Для углеродистой стали эта температура равна примерно $400—450^{\circ}\text{C}$.¹ Выше $400—450^{\circ}\text{C}$ сталь пластична, ниже — упруга. Если принять распределение температур по какой-либо определенной кривой, например, параболе, то в совершенно охлажденном таким способом цилиндре будут такие напряжения, какие будут в цилиндре, первоначально не имевшем напряжения, но затем нагретом так, что наружный слой имеет 0°C , а внутренний $T^{\circ}\text{C}$, считая конечно и в этом случае распределение температур по параболической кривой.

Расчет таких внутренних напряжений можно произвести следующим образом. Примем температуру t распределенной по параболе

$$t = T \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (1)$$

где T — разность температур между наружным и внутренним слоем,
 R — наружный радиус цилиндра,
 r — радиус рассматриваемого элемента.

¹а) J. H. Dickenson, Some Experiments of the slow of steel at a low red heat, J. Iron a. St. Inst., II, 1922; б) R. W. Bailliey, Creep of steel, World Power Conference Sectional Meeting, Tokyo, 1929.

Такой элемент, нагретый на t° , должен получить относительное приращение в трех направлениях, равное

$$\varepsilon = \alpha t, \quad (2)$$

где α — коэффициент расширения, принимаемый равным для всех температур.

Однако этому расширению будут препятствовать соседние частицы, имеющие иную температуру и упруго связанные с рассматриваемой частичкой. Это обстоятельство вызовет сокращение элемента на величину λ_r , λ_t и λ_0 , где значки r , t и 0 соответственно означают радиальное, тангенциальное и продольное направления в цилиндре. Сокращение элемента на величину λ_r , λ_t и λ_0 вызовет конечно соответствующие напряжения σ_r , σ_t и σ_0 .

В конечном итоге действия температуры и соседних частиц вызовут относительное увеличение рассматриваемого элемента цилиндра в трех направлениях на величину

$$\left. \begin{aligned} l_r &= \lambda_r - \alpha t \\ l_t &= \lambda_t - \alpha t \\ l_0 &= \lambda_0 - \alpha t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Выражая λ_r , λ_t и λ_0 через напряжения, мы можем написать

$$\left. \begin{aligned} l_r &= \frac{\sigma_r - k(\sigma_t + \sigma_0)}{E} - \alpha t \\ l_t &= \frac{\sigma_t - k(\sigma_r + \sigma_0)}{E} - \alpha t \\ l_0 &= \frac{\sigma_0 - k(\sigma_r + \sigma_t)}{E} - \alpha t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где E — модуль упругости,

k — число Пуассона,

σ_r , σ_t и σ_0 — радиальное, тангенциальное и продольное напряжения.

Для относительных перемещений l_r , l_t и l_0 имеем

$$\left. \begin{aligned} l_r &= \frac{\partial u}{\partial r} \\ l_t &= \frac{u}{r} \\ l_0 &= \frac{\partial v}{\partial R} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где u — величина перемещения рассматриваемой точки с радиусом r ,
 ∂v — увеличение в осевом направлении элемента длиной ∂a .

Приняв во внимание (5) и (1), мы можем переписать наши уравнения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \rho} &= \frac{1}{E} \left[\sigma_r - k(\sigma_t + \sigma_0) - E\alpha \left(1 - \frac{\rho^2}{R^2} \right) T \right] \\ \frac{u}{\rho} &= \frac{1}{E} \left[\sigma_t - k(\sigma_r + \sigma_0) - E\alpha \left(1 - \frac{\rho^2}{R^2} \right) T \right] \\ \frac{\partial v}{\partial a} &= \frac{1}{E} \left[\sigma_0 - k(\sigma_r + \sigma_t) - E\alpha \left(1 - \frac{\rho^2}{R^2} \right) T \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решая эти уравнения, получаем для тангенциального и радиального напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= E\alpha T \frac{1}{2(1-k)} \left[1 - 2 \frac{\rho^2}{R^2} \right] \\ \sigma_r &= \frac{1}{4(1-k)} \cdot E\alpha T \left(1 - \frac{\rho^2}{R^2} \right) \\ \sigma_t &= \frac{1}{4(1-k)} \cdot E\alpha T \left(1 - 3 \frac{\rho^2}{R^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Из этих уравнений можно сделать одно важное заключение в случае двух цилиндров тождественной формы, имеющих одинаковое распределение температур (равное T) и один закон распределения, внутренние температурные напряжения будут также равны.

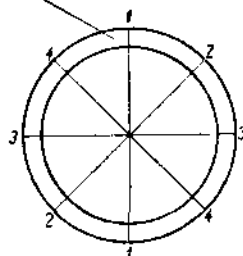
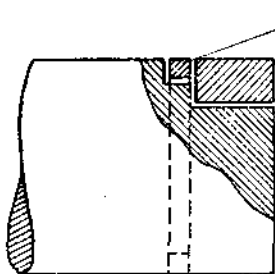


Рис. 164.

Мы можем поэтому, приравняв наружный радиус цилиндра единице ($R=1$) и разность температур между наружным и внутренним слоем $T=100^\circ \text{C}$ — построить кривые распределения температур

для различных значений $\rho < R$, считая конечно, что распределение температур происходит по параболе.

Эти кривые позволяют определить не только качественно, но и количественно наличие температурных напряжений в валах и т. п. изделиях.

Для этого из вала (рис. 164) с конца или в некотором отдалении от конца (тогда отпадает „влияние концов“, не учтенных в вышеизложенных уравнениях) вырезается кольцо K . Диаметр кольца до вырезки и после обмеряется в нескольких направлениях. Если наружный слой вала испытывает напряжения сжатия, то после срезки диаметр кольца должен увеличиться на некоторую величину 6 мм.

Последняя позволяет высчитать, пользуясь уравнением Ламэ, тангенциальное напряжение в кольце

$$\sigma_t = \frac{\delta \cdot E \cdot R \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right)}{(R^2 + r^2) - \frac{1}{k} (R^2 - r^2)},$$

где R — наружный радиус кольца,
 r — внутренний " "
 ρ — радиус рассматриваемого элемента.

Пользуясь этими данными и кривой распределения напряжений, легко найти с достаточной точностью и всю картину распределения напряжений.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ.

ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ.

1. Электропроводность.

Электрическое сопротивление r проводника длиной l м и поперечного сечения S мм² при температуре t равно

$$r_t = \rho_t \frac{l}{S} \text{ ом } (\Omega),$$

где ρ — удельное сопротивление материала, т. е. сопротивление проволоки длиной 1 м и поперечного сечения 1 мм².

Обратная величина удельного сопротивления $\varepsilon = \frac{1}{\rho}$ называется удельной проводимостью материала.

Весьма часто удельное сопротивление дается не в омах на 1 мм²/м, а в омах на 1 см³ материала. Тогда

$$\rho_t \frac{\Omega}{\text{см}^3} = \rho_t \frac{\Omega \text{ мм}^2}{\text{м}} 10^{-4}.$$

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

$$\begin{aligned} \rho_{20} &= 0,10 \Omega \text{ мм}^2/\text{м} \\ &= 0,10 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{см}^3 \\ &= 0,10 \cdot 10^{-4} 10^9 = 0,10 \cdot 10^5 \text{ CGS.} \end{aligned}$$

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[°]C, то можно написать:

$$\rho_T = \rho_t [1 + \alpha (T - t)],$$

где T и t — соответствующие температуры.

В табл. X 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.

ТАБЛИЦА X.

Материал	Проводимость $1 \text{ см}^2 \times 10^{-5}$ при 0°	Сопротивление $1 \text{ см}^2 \times 10^4$ при 0°C	Температурный коэф. $\times 10^3$	Сопротивление проволоки длиной 1 м и поперечного сечения 1 мм^2 при 20°C
Алюминий	37,0	2,69	4,26	0,0269
Висмут	0,91	110,00	4,46	1,1980
Вольфрам	18,1	5,50	4,64	0,0601
Железо чистое	11,0	9,065	6,57	0,9210
0,1% С	10,0	—	—	0,1000
0,5% С	8,0	—	4,60	0,1250
1,0% С	6,7	—	—	0,1500
Золото	45,6	2,19	3,98	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	—	—	$-0,2 \pm 0,06$	—
Магний	23,0	4,35	3,90	0,047
Марганец	22,7	4,40	—	$(0^\circ) 0,044$
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)	—	4 000—10 000	—	—
Хром	38,4	2,60	—	$(0^\circ) 0,026$
Цинк	17,4	5,57	4,17	0,0623

Схема измерения неизвестного сопротивления x мостиком Уитстона¹ изображена на рис. 165. Для получения разности потенциалов между V' и V'' равной нулю (тогда гальванометр не дает отклонения, так как сила тока i будет равна нулю), как известно, необходимо, чтобы

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{x},$$

откуда

$$x = \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}.$$

По такой схеме изготавливаются приборы самых разнообразных конструкций, которые применяются главным образом для измерения сравнительно больших сопротивлений — примерно от 5 и до 10 000 ом.

¹ Philos. Trans., стр. 313, 1843.

Для измерения малых сопротивлений пользуются двойным мостом Томсона, ¹ схема которого изображена на рис. 166.

Искомое сопротивление здесь W , которое последовательно соединено с сопротивлением R , амперметром J , 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.

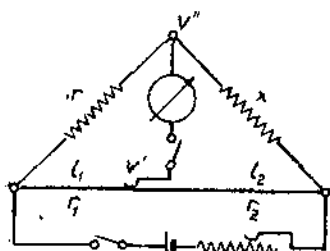


Рис. 165. Схема мостика Уитстона.

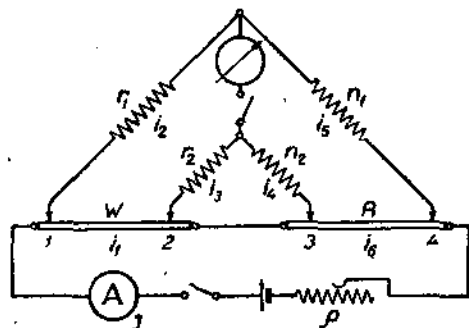


Рис. 166. Схема моста Томсона.

Для приведения стрелок гальванометра к нулю необходимо иметь

$$i_1 W + i_3 r_2 = i_2 r_1$$

$$i_6 R + i_4 n_2 = i_5 n_1$$

или

$$\frac{i_1}{i_2} \cdot \frac{W}{r_1} = 1 - \frac{i_3}{i_2} \frac{r_2}{r_1}$$

$$\frac{i_6}{i_5} \frac{R}{n_1} = 1 - \frac{i_4}{i_5} \frac{n_2}{n_1}$$

Так как

$$i_1 = i_6; i_2 = i_5; i_3 = i_4$$

и

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

то имеем

$$\frac{i_1}{i_2} \frac{W}{r_1} = \frac{i_6}{i_5} \frac{R}{n_1};$$

откуда

$$\frac{W}{R} = \frac{r_1}{n_1} = \frac{1}{c}$$

или

$$W = \frac{R}{c}.$$

¹ W. Thomson's, Philosophical Magazine, стр. 149, 1862.

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 твер-

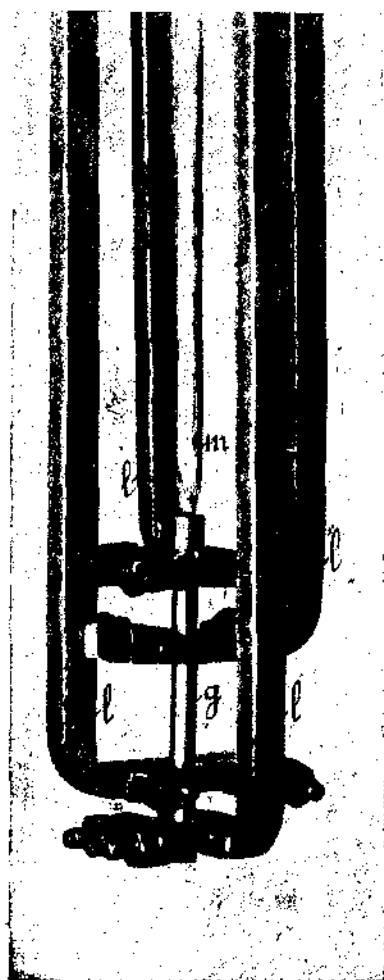


Рис. 167. Зажимной прибор
П. Я. Сальдау.

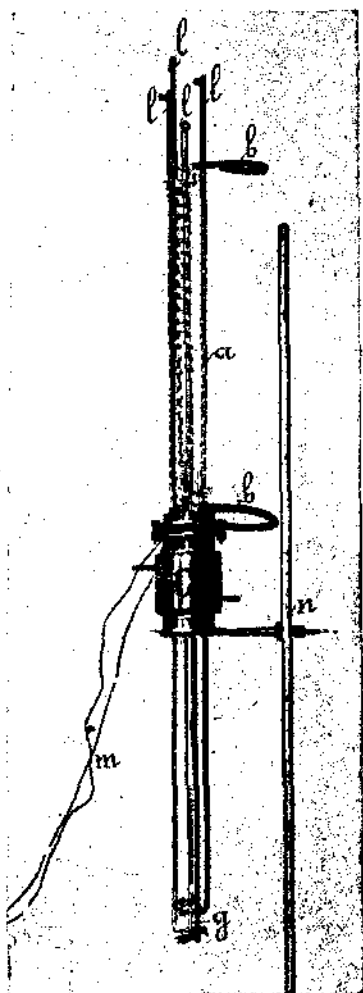


Рис. 168.

дых сплавах при их нагревании и охлаждении. Для этой цели служит термический анализ, но в некоторых случаях он становится малоэффективным, в особенности, когда тепловой эффект превращения незначительный. Тогда прибегают к помощи других методов, позволяющих отметить то, что термический анализ оставил неотмеченным. Среди таких методов кроме дилатометрии 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 f (сопротивление, температура). Резкие переходы и переломы этой кривой указывают, как и в термическом анализе, на превращение в сплаве. Большие затруднения в получении точных результатов испытания представляла выработка прибора, в котором можно было бы измерять электросопротивление с достаточной точностью при высоких температурах.

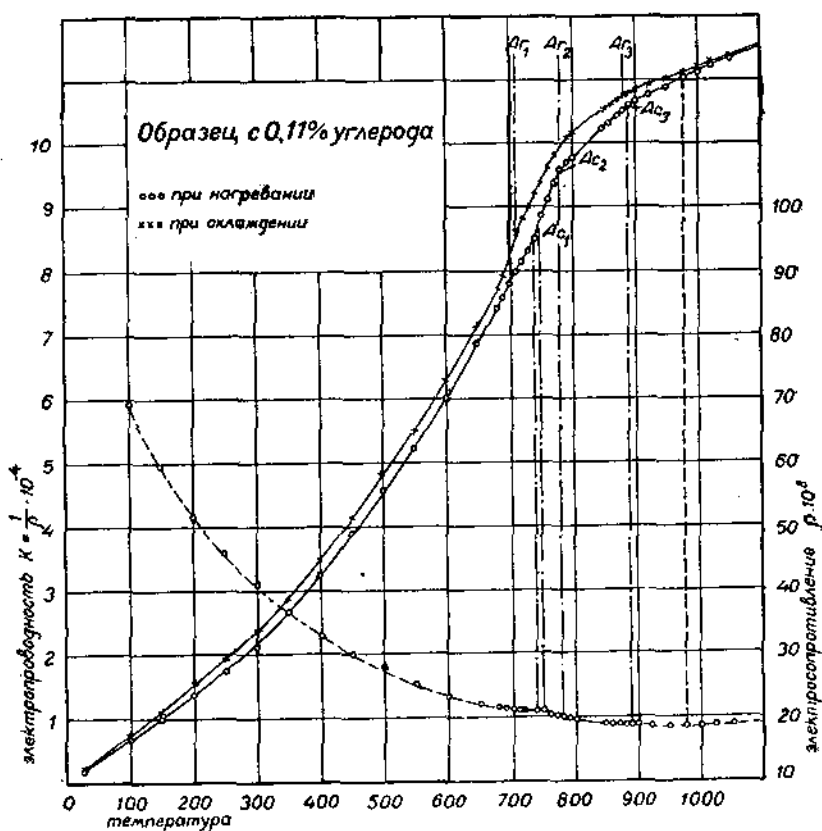


Рис. 169.

Большую заслугу в разработке всего метода испытания и конструкции приборов следует приписать П. Я. Сальдау. ¹ На рис. 167 и 168 изображен зажимной прибор его конструкции. Здесь l — стержни из хромо-никелевой стали для подводки тока, m — термопара, g — исследуемый образец, c — холодильник, a — вспомогательный стеклянный холодильник для стержней, b — резиновые рукава для соединения концов вспомогательных холодильников и n — подставка при смене образцов. Испытуемый образец, как это указано, закрепляется стержнями l , которые проводами присоединяются к двойному мостику

¹ 1) Сальдау П. Я. Метод электропроводности при высоких температурах, 1917; 2) Ж.Р.Х.О., 46, стр. 994, 1914.

Томсона. В таком виде зажимной прибор вставляется в электрическую печь типа печи Гереуса. Чтобы при нагревании образец не окислялся и этим не изменял своего сопротивления, в печь вводится какой-либо нейтральный газ. Скорость нагревания образца регулируется по желанию, и отсчеты на мостике Томсона могут быть производимы через каждые 5°C , если этого требует точность исследования. Для отсчета сопротивления требуется не более 15 секунд, так что при не очень быстром нагреве точность измерения электросопротивления по отношению к температуре можно принять равной 1 градусу.

На рис. 169 представлена кривая сопротивления в зависимости от температуры для стали, содержащей 0,11% углерода, определенная вышеописанным методом. Там отчетливо видны переломы кривой, 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.

В случае, если оба компонента выкристаллизовываются в чистом виде, кривая электропроводности представит собой прямую (аа рис. 51). В случае твердых растворов получаем кривую (аа рис. 54). В случае же предельной растворимости кривая получается комбинированной (аа рис. 57).

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 считают 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

$$m = r \sqrt{f}$$

и размерность:

$$m = \text{длина} \sqrt{\text{дина}} = \text{см} \sqrt{\text{см} \times \text{г} \times \text{сек.}^{-2}} = \text{г}^{1/2} \text{см}^{3/2} \text{сек.}^{-1}$$

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 полосы 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.:

$$H = \frac{F}{m}$$

и размерность:

$$H = \frac{\text{дина}}{\text{м. масса}} = \frac{2 \text{ см сек.}^{-2}}{2^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ сек.}^{-1}} = 2^{1/2} \text{ см}^{-1/2} \text{ сек.}^{-1}.$$

Единица напряженности магнитного поля называется эрстедом или гауссом.

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.

Обозначая магнитный поток стержня, проходящий через 1 см², через B , найдем:

$$B = H \cdot \mu \text{ и } \Phi = B \cdot S$$

или

$$B = \mu \frac{0,4\pi \cdot n \cdot i}{l} \text{ и } \Phi = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{l/\mu S}.$$

Величину $0,4\pi \cdot n \cdot i$ называют магнитодвижущей силой, а выражение $\frac{l}{\mu \cdot S}$ 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 до 3000, выделены в особую группу и называются ферромагнитными.

Магнитная индукция B связана с H числовым коэффициентом μ ; поэтому B измеряется в тех же единицах, что и H , т. е. в гауссах.

Но следует отметить, что намагничивающая сила H весьма часто выражается числом ампер-витков, приходящимся на 1 см ее длины:

$$n_1 = \frac{n}{l},$$

можно написать

$$H = 0,4 \cdot \pi \cdot n_1 l$$

и тогда число витков, соответствующее 1 гауссу ($H=1$), будет равно:

$$n_1 l = \frac{1}{0,4\pi} \approx 0,8 \text{ ампер-витков,}$$

или

$$1 \text{ ампер-виток} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ гаусса.}$$

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 гаусс. Эта единица носит название максвелл.

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:

$$M = 2ml,$$

которое называется магнитным моментом.

Магнитный момент, отнесенный к единице объема, называется напряженностью намагничивания:

$$J = \frac{2ml}{v} = \frac{2ml}{2l\omega} = \frac{m}{\omega}.$$

Отношение между напряженностью намагничивания J и напряженностью поля H носит название магнитной восприимчивости. Итак

$$\eta = \frac{J}{H}.$$

Соотношение между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью можно вывести из следующих соображений. Число силовых линий, исходящих из северного полюса в воздух, равно:

$$4\pi r^2 H = 4\pi r m - 4\pi f\omega,$$

так как $H = \frac{m}{r^2}$ число силовых линий, проходящих через единицу поверхности уровня на расстоянии r от полюса. От единицы же по-

лярной 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 число $4\pi J$ силовых линий + поток, обусловленный магнитным полем, имеющим напряженность H . Магнитная индукция B будет равна:

$$B = 4\pi J + H.$$

Так как

$$\frac{B}{H} = \mu, \text{ а } \frac{J}{H} = \eta,$$

то

$$\mu = 4\pi\eta + 1,$$

или

$$\eta = \frac{\mu - 1}{4\pi}.$$

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 маг-

нитной индукции B для различных напряжений H магнитного поля. Найденную зависимость можно изобразить графически в виде кривой, как это изображено на рис. 170.

Точно так же можно найти зависимость между H и μ и изобразить ее в виде кривой (рис. 171).

Из этих кривых, данных для ферромагнитных материалов, 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

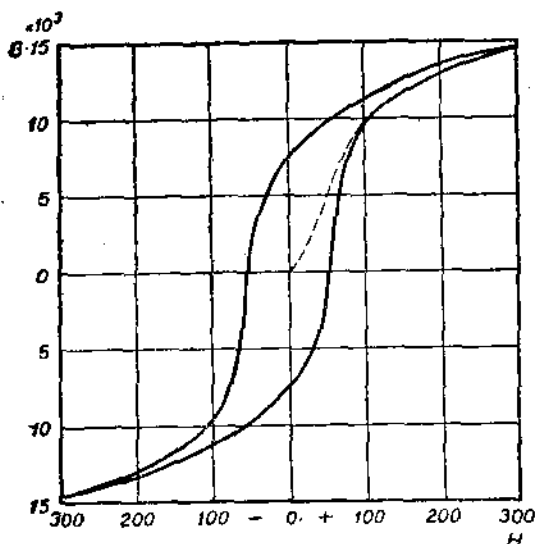


Рис. 170.

увеличивается, но затем напряженность намагничивания 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 $H = 2000$ гауссов, более же углеродистая сталь требует большего напряжения магнитного поля — до $H = 10\,000$ гауссов.

Изменяя H от нуля до какого-либо значения E (рис. 170) 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 называется остаточным магнетизмом 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 .

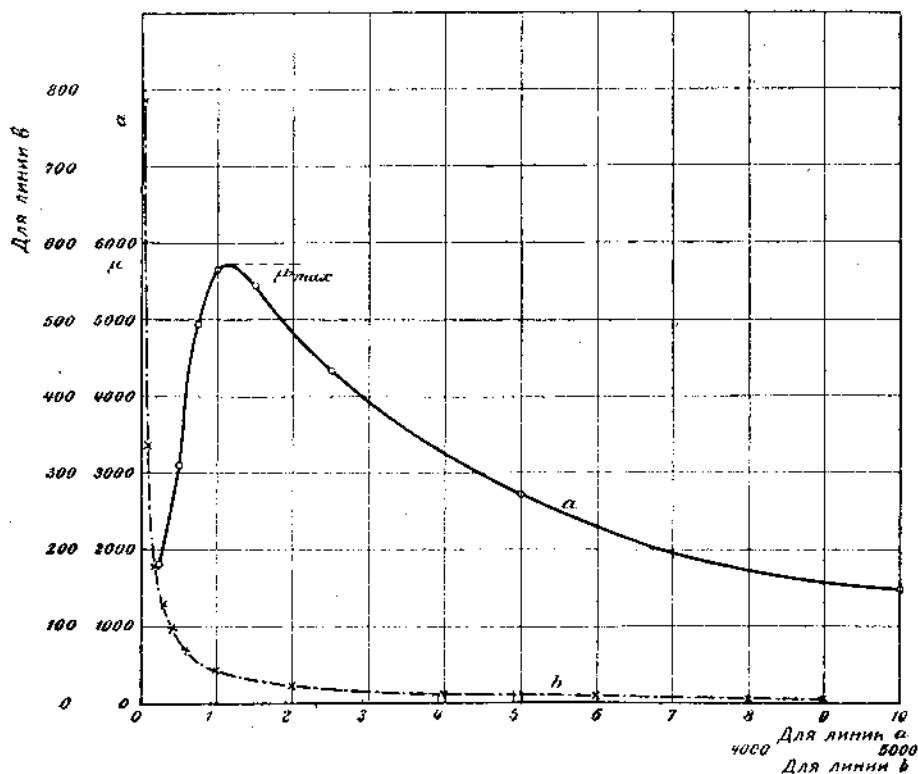


Рис. 171.

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:

$$F = \oint B dH.$$

Размерность этой площади = индукция $\times$ напряженность, поля или

$$(2^{1/2} \text{ см}^{-1/2} \cdot \text{сек.}^{-1})^2 = 2 \text{ см}^{-1} \text{ сек.}^{-2} = \frac{2 \text{ см}^2 \cdot \text{сек.}^{-2}}{\text{см}^3} =$$

$$= \frac{\text{работа в эргах}}{\text{объем}}.$$

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 и 2) зависимость между напряженностью поля H , индукцией B и проницаемостью μ и 3) значение остаточного магнетизма и коэрцитивной силы.

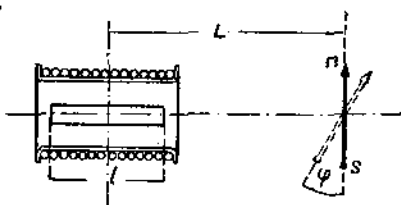


Рис. 172.

Ниже мы рассмотрим несколько методов определения этих значений.

б) Некоторые методы магнитных измерений. Магнито-метрический метод. На коконо-

вой нитке подвешивается небольшая магнитная стрелка ps (рис. 172). Испытуемый стержень длиной l вкладывается в намагничивающую катушку и помещается в одной плоскости с магнитной стрелкой. При намагничивании стержня стрелка отклонится на некоторый угол φ . Для уничтожения влияния расстояния L стержня от магнитной стрелки измерение производится два раза при различных L и L_1 .

Угол поворота стрелки φ и φ_1 измеряется достаточно точно помощью зеркала, прикрепленного к стрелке, и шкалы со зрительной трубкой.

Обозначая M — магнитный момент и B_e — напряженность земного магнетизма, имеем:

$$\frac{M}{B_e} = \frac{1}{2} \frac{L^5 \text{tg} \varphi - L_1^5 \text{tg} \varphi_1}{L^2 - L_1^2}.$$

Так как напряженность намагничивания $J = \frac{M}{v}$, где v — объем стержня, то:

$$J = \frac{B'}{v} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{L^5 \operatorname{tg} \varphi - L_1^5 \operatorname{tg} \varphi_1}{L^2 - L_1^2}.$$

При малых углах φ можно принять $\operatorname{tg} \varphi$ равным дуге.

Если B , известно, то из выражения $B = H + 4\pi J$ легко найти B , так как:

$$H = \frac{0,4\pi \cdot n \cdot i}{l_1},$$

где l_1 — 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 напряженность намагничивания, А. Linker¹ дает для c следующие значения:

a/b	50	100	200	300	400	500
c	0,01817	0,00540	0,00157	0,00075	0,00045	0,00030

для эллипсоидных образцов с главными осями a и b .

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.

Метод баллистического гальванометра. В этом методе испытуемый образец вставляется в намагничивающую катушку, имеющую две обмотки: первая, намагничивающая, которая присоединяется к источнику тока, и вторая, 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 d_c , 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 ко-

¹ А. Linker, Elektrotechnische Messkunde, стр. 178, 1920.

торое наматывают требуемое число витков. Обмотка кольца должна быть равномерно распределена; тогда магнитное поле получается равномерное даже при кольцах сравнительно небольших диаметров (рис. 173).

Напряженность поля вычисляется из выражения:

$$H = \frac{i \cdot n}{l} \text{ aw/cm},$$

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 и, а вторичную — к баллистическому гальванометру. Установив теперь при помощи реостата R и амперметра J требуемую силу тока (т. е. получив этим определенное число ампер-витков на 1 см), переключают его в обратном направлении, благодаря чему во вторичной обмотке индуктируется ток.

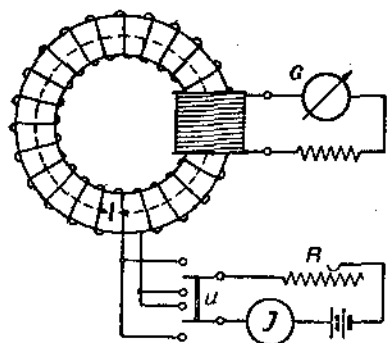


Рис. 173.

О градуировке гальванометра будет сообщено ниже, сейчас же следует заметить, что благодаря трудности приготовления кольцеобразных 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. 174. 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:

$$0,4\pi \cdot n_1 i = \Phi \left[\frac{l_1}{F_\mu} + \frac{l'}{F_{\mu'}} + \frac{\delta}{F_w} \right],$$

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.

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 $\frac{\delta}{F''\mu''}$ воздушного пути зависит главным образом от плотности прилегания испытуемого образца к раме. Легко получить δ очень малой и тогда и $\frac{\delta}{F''\mu''}$ 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 индуцирует 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 проградуировать 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 ml . Поверх надевают катушку k известного числа витков и последовательно с ней включают: баллистический гальванометр g , контактная кнопка f для замыкания гальванометра на короткое (для успокоения вращающейся рамки) и вто-

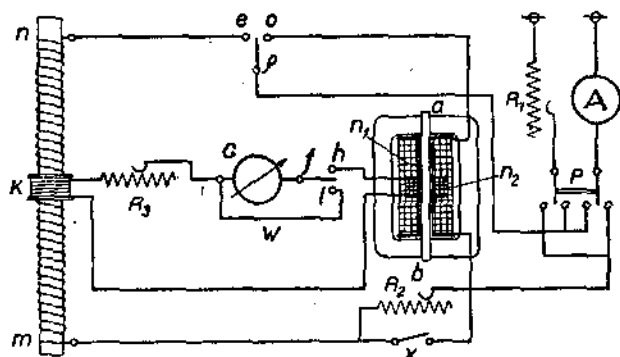


Рис. 174. Способ магнитной рамы.

ричная 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 и 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 потокам $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots$ 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, выразится:

$$\Phi = \Phi_1 \frac{N}{n_2},$$

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 0 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_3 устанавливают на все увеличивающееся сопротивление и, выключая выключатель x , уменьшают силу тока с i до i_1 , с i 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.

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. 175. Баллистический гальванометр помещен здесь в мостике. Сила тока, проходящего по ab , равна:

$$j = \frac{E}{R} = \frac{e_1 r_2 - e_2 r_1}{(r_1 + r_2)R}.$$

Но с другой стороны:

$$e_1 = m_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; e_2 = m_2 \frac{d\Phi_2}{dt},$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки,
 m_1 и m_2 — число витков,
 t — время.

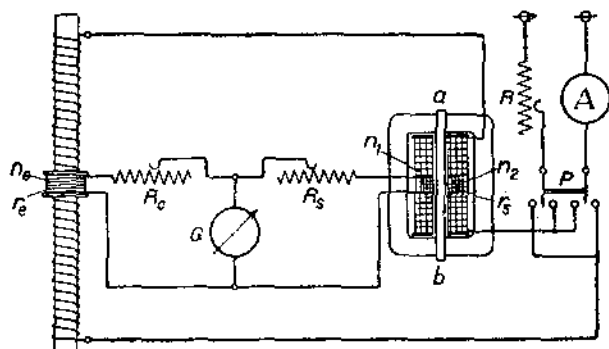


Рис. 175. Схема нулевого метода.

Но для количества электричества мы имеем:

$$dQ = jdt,$$

или

$$dQ = \frac{m_1 d\Phi_1 r_2 - m_2 d\Phi_2 r_1}{(r_1 + r_2)R},$$

и

$$Q = \frac{m_1 \Phi_1 r_2 - m_2 \Phi_2 r_1}{(r_1 + r_2)R}.$$

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. 175, имеем:

$$\Phi_1 = \frac{n_2}{n_1} \frac{r_1 + R_2}{r_2 + R_1} \cdot \Phi_2,$$

где Φ_2 — магнитный поток в эталоне.

Значения n_1 , n_2 , Φ_2 , r_2 и r_1 известны, значения же R_2 и R_1 определяются из опыта, и тогда легко определить магнитный поток Φ_1 стержня.

При такой схеме испытание протекает в следующем порядке: установив при помощи реостата R и амперметра A желаемой силы ток, изменяют сопротивления R_1 и R_2 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, и отрывное усилие выразится:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{8\pi} \text{ дин},$$

где S — площадь соприкосновения стержня с железной поверхностью, выраженная в см^2 .

Так как $F_{\text{дин}} = 981 \rho$ граммов, то магнитная индукция:

$$B = \sqrt{\frac{8\pi \rho 981}{S}}$$

и магнитная проницаемость:

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi \rho 981}{H^2 S}}.$$

Таким образом измеряя отрывное усилие p , можно определить B и μ испытуемого материала.

На основании этого метода построен целый ряд приборов и из них наиболее распространенным следует считать магнитные весы Dubois.¹

Схема этого прибора изображена на рис. 176. 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 ограничивают качение коромысла. Винты R и A регулируются так, чтобы расстояние между плоско-отполированными нижними поверхностями коромысла и также отполированными верхними поверхностями частей

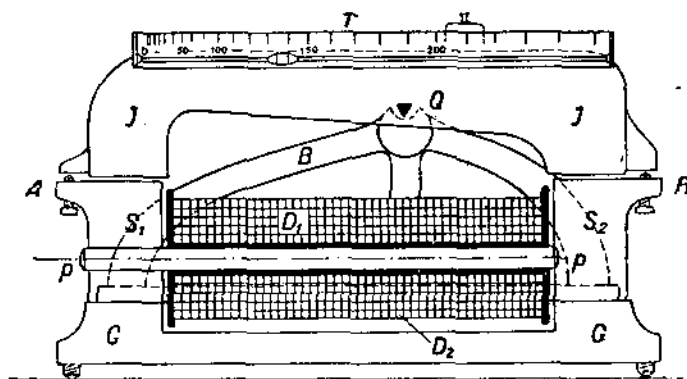


Рис. 176. Магнитные весы Dubois.

S_1 и S_2 было равно 0,25 мм, когда соответственные винт и выступ соприкасаются. Опора Q расположена не посредине 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:

$$\frac{B^2 S}{8\pi}$$

¹ Zeitschrift für Instrumentenkunde, стр. 113, 129, 1900.

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.:

$$\frac{B^2 S}{8\pi} l_1 - \frac{B^2 S}{8\pi} l_2 - Pl_3 = 0,$$

откуда

$$B = \sqrt{\frac{8\pi Pl_3}{S(l_1 - l_2)}} = K \sqrt{l_3},$$

обозначив известное:

$$\sqrt{\frac{8\pi P}{S(l_1 - l_2)}} \text{ через } K.$$

Магнитный поток в частях S_1 и S_2 выразится

$$\Phi = B \cdot S = B_1 S_1,$$

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 выразить $\alpha = c \cdot i \cdot H$, 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 Кепселя,¹ который измеряет напряжение магнитного поля по отклонению гальванометра.

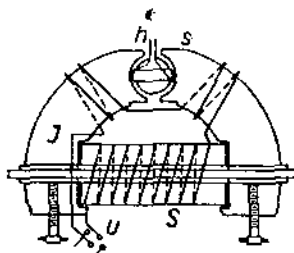


Рис. 177. Прибор Кепселя.

Схема такого прибора дана на рис. 177. Пробный брусок вставляется в намагничивающую катушку S и прикрепляется к железному яру J , в которое еще вставлена подвижная рамка s с навитой тонкой проволокой. На железном яре 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.

¹ Е. Т. З., стр. 214, 411, 1898.

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 производится измерения, отличается от температуры, при которой спираль градуирована, необходимо ввести поправку, так как температурный коэффициент висмута очень большой.

Аппарат Epstein'a. 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 Epstein'a.¹

Он состоит (рис. 178) 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 ква-

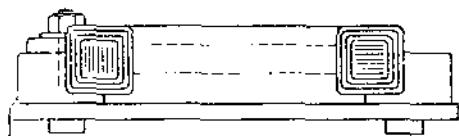
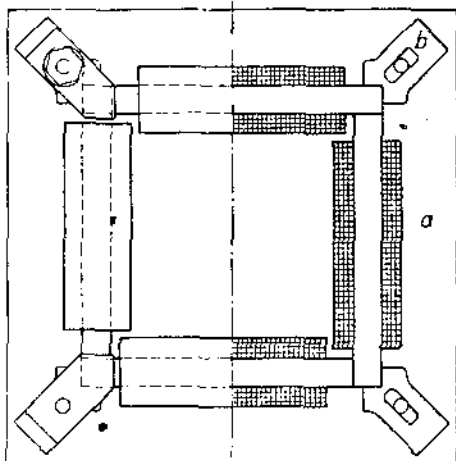


Рис. 178. Аппарат Epstein'a.

¹ Е. Т. З., стр. 303 и 684, 1900.

драта, причем в местах стыка прокладывается прессшпан толщиной 0,15 мм. На каждый пакет одевается намагничивающая катушка внутреннего сечения 30×38 мм и длиной 435 мм. Катушка изготовлена из прессшпана и на нее наматывается 150 витков медной проволоки сечения $12 \times 3,512 = 14$ мм². Катушки соединены последовательно.

Схема включения намагничивающих обмоток и измерительных приборов представлена на рис. 179. Вольтметр E служит для измерения напряжения переменного тока, вырабатываемого генератором G . Амперметр J 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:

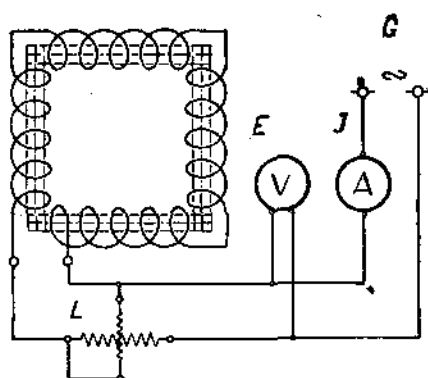


Рис. 179. Схема аппарата Epstein'a.

$$W = W_p + W_r = W - \left(i^2 r - \frac{e^2}{R} \right),$$

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 :

$$E = 4\pi n \Phi \cdot 10^{-8} \text{ вольт,}$$

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:

$$e = \alpha E = \alpha 4\pi n \cdot B \cdot S \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

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 $B=10000$ cgs, 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 B и t не изменялись (рис. 180). Пересече-

ние прямой $f(A, n)$ с осью A укажет $\frac{W_g}{n}$, 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 требование самых разнообразных магнитных свойств. С одной стороны, к стали, применяемой для изготовления постоянных магнитов, предъявляются требования большой коэрцитивной силы и остаточного магнетизма, 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 имеет 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 Chévenard'a.¹ Мы не приводим здесь описания устройства этого прибора, ибо по его идее построен прибор P. Oberhoffer'a

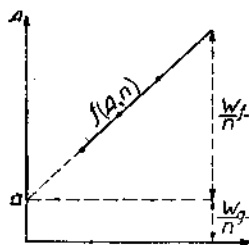


Рис. 180.

¹ См. L. Guillet, Les méthodes d'étude des alliages métalliques, стр. 194. 1923.

и Н. Hisser'a, описание которого помещено ниже в отделе дилатометрии. Здесь мы лишь отметим, что означенные приборы довольно сложны и требуют специально устроенной 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.

Прибор состоит (рис. 181) из фарфоровой трубки, в один конец которой вводится испытуемый образец. Снаружи фарфоровая трубка имеет нихромовую обмотку N , являющуюся нагревающей обмоткой.

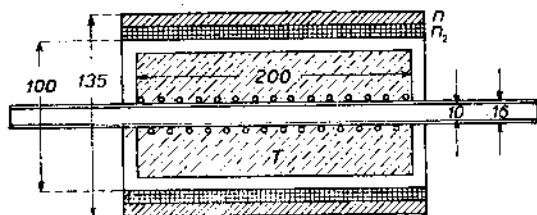


Рис. 181. Прибор для определения магнитных свойств при высоких температурах.

Обмотка N питается постоянным током (110 в и 4 ампера). Нихром покрыт слоем T — смеси каолина и асбестовой ваты (тепловая рубашка). Такая печь помещается в прессшпановый 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 второй 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 случае, если 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 считать так называемые дилатометры Chévenard'a,¹ которым выра-

¹ Revue de métallurgie, IX—X 1917; X 1920; Stahl und Eisen, № 7, стр. 242, 1923.

ботаны два типа дилатометров: лабораторный и производственный. Кроме того, интересен своей простотой прибор F. Stäblein'a¹ и своею универсальностью дилатометр H. Esser'a и P. Oberhoffer'a.²

а) **Первый тип дилатометра Chévenard'a.**

Устройство этого прибора изображено на рис. 182. 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. Изменение длины эта-

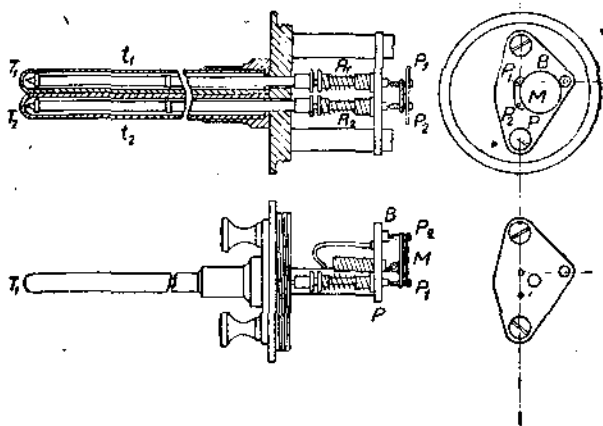


Рис. 182. Первый тип дилатометра Chévenard'a.

лона 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 — неподвижная опора (рис. 183). На эту часть прибора одевается камера, не пропускающая света, подобная той, какая имеется в приборе

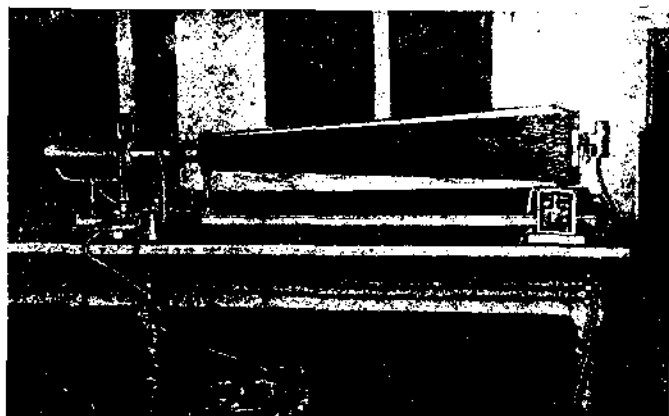


Рис. 183. Первый тип дилатометра Chévenard'a (общий вид).

Saladin'a (см. выше „регистрирующие пирометры“). Перед камерой устанавливается источник света, луч которого через небольшое отверстие в камере направляется на зеркало и, отразившись от него

¹ Stahl und Eisen, № 4, стр. 101—104, 1926.

² Там же, № 5, стр. 142—147, 1926.

падает на кассету со светочувствительной пластинкой или бумагой (рис. 183). 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 испытываемого 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 испытываемого образца будет также передаваться на зеркало отклонением его в другом направлении.

Совместное изменение длины эталона и испытываемого образца зарисует на светочувствительной бумаге кривую, подобно той, которая изо-

бражена на рис. 184. Испытуемым образцом здесь служила автектоидная сталь. Переломы в кривых ясно указывают на критические температуры A_1 и A_c . Нагрев велся до 880°C .

6) Второй тип дилатометра Chévenard'a. 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

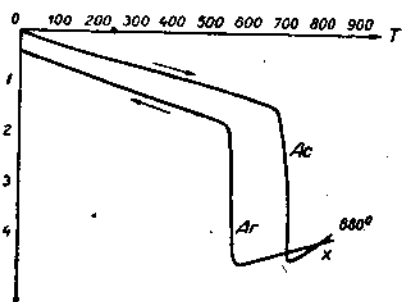


Рис. 184.

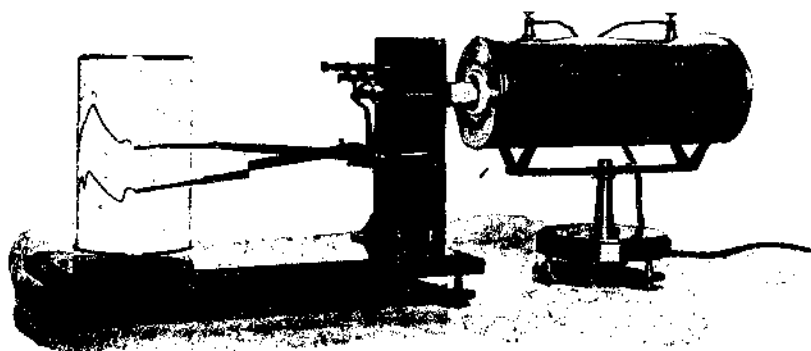


Рис. 185. Второй тип дилатометра Chévenard'a (общий вид).

тип дилатометра, общий вид которого с печью изображен на рис. 185, а устройство показано на рис. 186.

В кварцевую трубку *T* заложен испытываемый 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 испытываемым образцом, последний просверливается и в это отверстие вставляется эталон. Изменение длины эталона и испытываемого 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

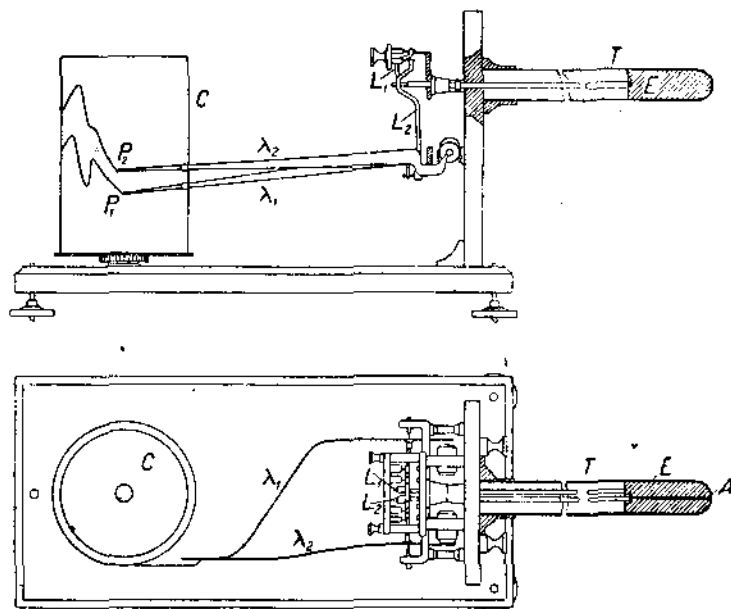


Рис. 186. Второй тип дилатометра Chévenard'a.

с эталоном, зарисует кривую изменения длины эталона. В виду того что эталоном служит специальный сплав, коэффициент расширения которого известен, то 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 не что иное, как кривая $f(T, Z) = 0$, а так как эталон находится внутри испытуемого образца, то на кривой θ отразятся в виде перегибов и площадок температуры вращения.

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 поэтому перегибы не будут приняты за превращения.

На рис. 188 даны дилатометрические кривые быстрорежущей стали, охлажденной в печи; на рис. 189 кривые той же стали, охлажден-

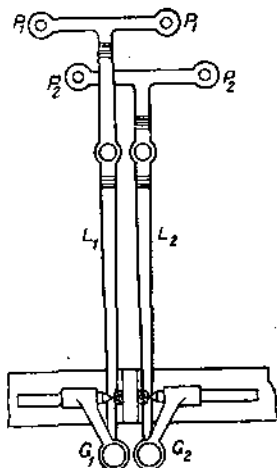


Рис. 187.

ной на воздухе. На рис. 190 даны кривые Ni—Cr—Si-стали, охлажденной в печи, на рис. 191 — кривые отпуска наклепанной марганцовистой стали.

в) **Универсальный прибор Esser'a—P. Oberhoffer'a.**¹ Весьма интересный прибор сконструировали Esser и P. Oberhoffer, воспользовавшись идеей устройства дилатометра и магнитного прибора

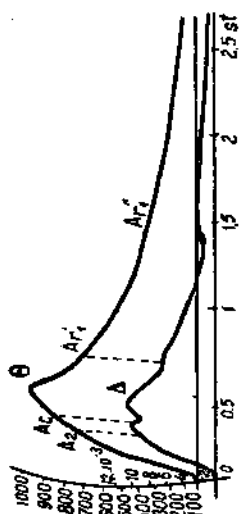


Рис. 188. Кривая нагрева и охлаждения быстрорежущей стали в печи.



Рис. 189. Кривая нагрева и охлаждения быстрорежущей стали на воздухе.

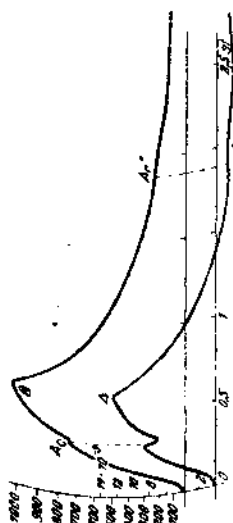


Рис. 190. Кривая нагрева и охлаждения Ni—Cr—Si — стали в печи.

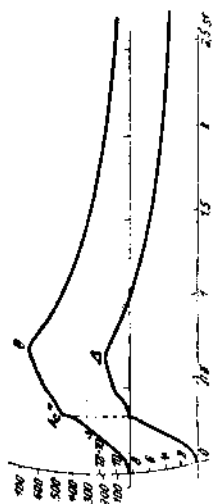


Рис. 191. Кривая отпуска наклепанной марганцовистой стали.

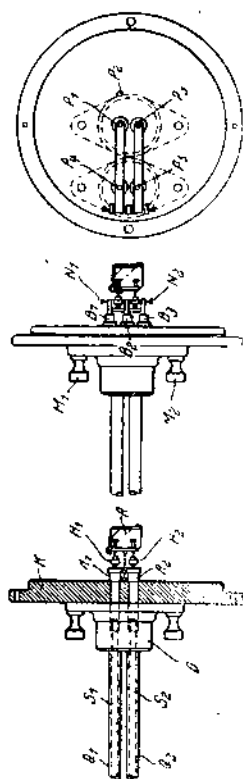


Рис. 192. Прибор Esser'a и P. Oberhoffer'a.

Chévenard'a. При помощи этого прибора возможно определять расширение, изменение электропроводности и магнитных свойств сплавов в зависимости от температуры.

Для дилатометрического анализа служит специальная головка (рис. 192), состоящая из двух кварцевых трубочек Q_1 и Q_2 , запаян-

¹ Stahl und Eisen, H. S., стр. 142—47.

ных с одного конца. В эти трубочки вставляются испытуемый образец и эталон. Изменение их длины передается рычагам H_1 и H_2 при 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_2 к ним прикреплены пластинка R с призмой P_2 .

Такая головка прикрепляется к специальному гальванометру (рис. 193) таким образом, чтобы призма P_2 находилась под призмой P_1 . Кварцевые трубочки головки дилатометра помещаются в электрическую печь.

Луч света, пройдя линзу L (рис. 193), падает на призму P_1 и преломляясь направляется на призму P_2 , которая направляет его на зеркало гальванометра S . Отразившись 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

$f(\lambda_0, \lambda_2)$, где λ_0 — расширение испытуемого образца, а λ_2 — расширение эталона. Второй способ состоит в том, что расширение λ_0 испытуемого образца попрежнему фиксируется вышеописанной головкой дилатометра; температура же t измеряется не расширением λ_2 эталона, а термопарой, присоединяемой к зажимам зеркального гальванометра. Совместными движениями призмы P_2 и зеркала S луч света запишет на светочувствительной бумаге кривую $f(\lambda_0, t)$.

Испытание магнитных свойств при высоких температурах производится по схеме, изображенной на рис. 194. Здесь испытуемый образец эллипсообразной формы вставляется в трубку P . Температура измеряется дилатометрическим эталоном v , расширение которого передается на призму P_2 . Образец вставляется в электрическую печь, которая кроме нагревательной обмотки имеет еще первичную обмотку B_1 , сквозь которую пропускают переменный ток, и вторичную обмотку B_2 . Обмотки B_1 и B_2 соединяются с такими же обмотками B_3 и B_4 так, как это изображено на рис. 194. При прохождении в обмотке B_2 будет индуцироваться ток в зависимости от величины магнитного потока. То же самое произойдет в обмотке B_4 . Ясно, что

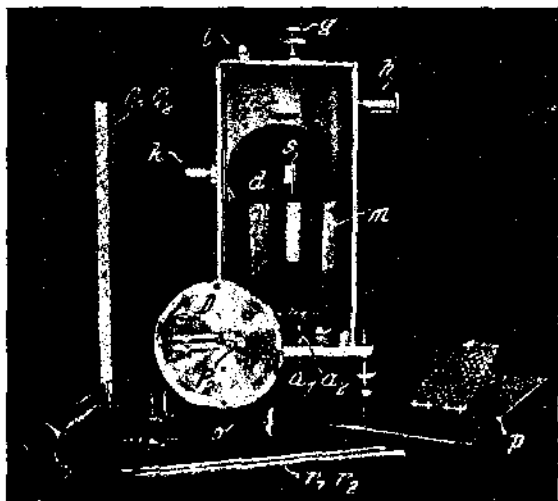


Рис. 193. Детали прибора Esser'a и P. Oberhoffer'a.

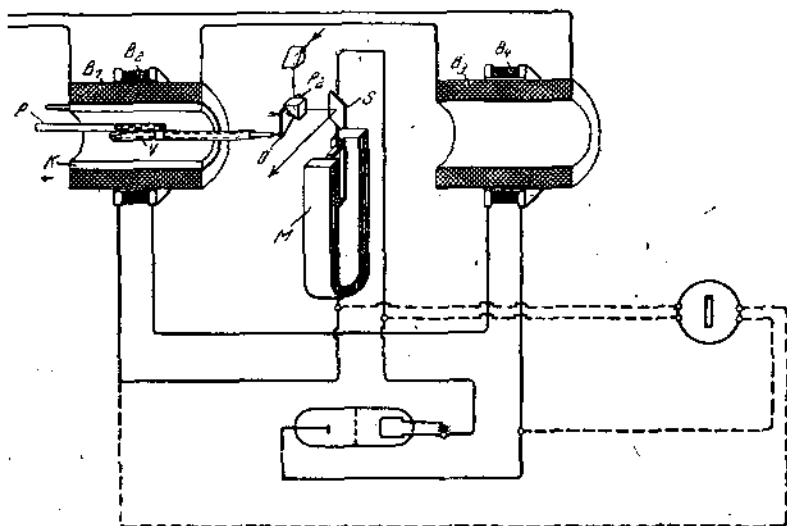


Рис. 194. Схема испытания магнитных свойств.

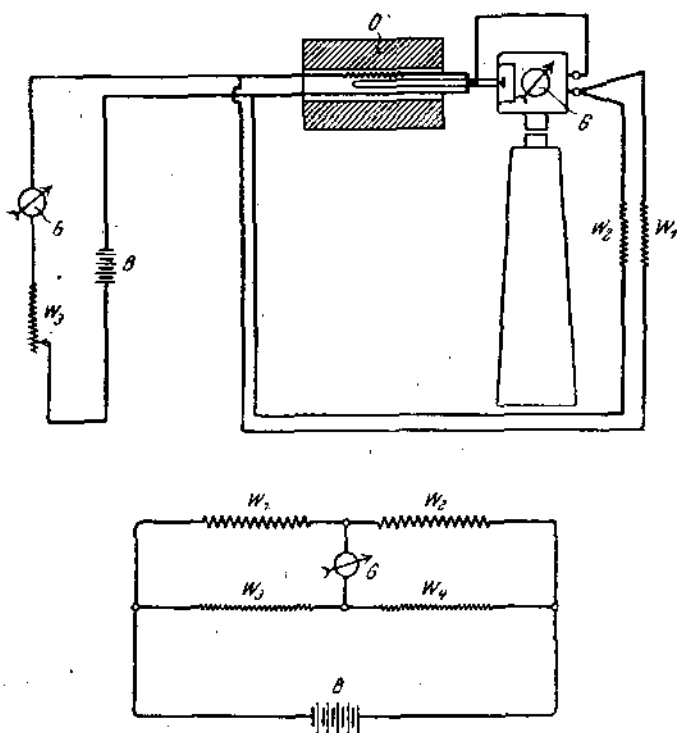


Рис. 195. Схема испытания электропроводности.

O — печь, g — гальванометр, W_1 , W_2 и W_3 — сопротивление, B — батарея.

если испытуемый образец магнитный, то магнитный поток, создаваемый обмоткой B_1 , будет больше магнитного потока, создаваемого обмоткой B_3 , а стало быть ток в обмотке B_2 , будет больше, нежели в B_4 . Но ввиду того что B_2 и B_4 приключены навстречу друг к другу, то при неравенстве индуктированного тока зеркало S отклонится на некоторый угол, величина которого характеризует магнитную интенсивность испытуемого образца. Ввиду того что ток в обмотках B_2 и B_4 также переменный, то его выпрямляют катодной лампой для того, чтобы его можно было измерять гальванометром постоянного тока (если конечно не имеется под рукой гальванометра переменного тока).

Испытание измерения электропроводности производится по схеме, изображенной на рис. 195. Здесь опять температура измеряется dilatометрическим методом. Гальванометр же G включается в мостик сопротивления $w_1 - w_4$. Сопротивления w_1 и w_2 весьма малы по сравнению с равными сопротивлениями w_3 и w_4 (рис. 195) и в качестве их служат образцы испытуемого материала, отличающиеся друг от друга на небольшую величину и помещенные в печь. При неравенстве w_1 и w_2 будем иметь:

$$i = \frac{w_1 - w_2}{R + g} \cdot J,$$

где J — сила тока, получаемого от батареи,

g — сопротивление гальванометра,

i — сила тока в мостике.

Этот способ дает весьма точные результаты.

4. Рентгенографический анализ.

В настоящее время область испытания металлов обогатилась новым чрезвычайно мощным и многогранным методом исследования — помощью X -лучей. Уже с момента их открытия ¹ указывались те практические применения, которые эти лучи могли бы получить. Однако применение их в технике не получало должного распространения, и лишь за последние годы наметился перелом в этом направлении, — рентгеновский анализ начинает из стен чисто научных лабораторий перебираться в заводские лаборатории. Это характерное явление указывает на то, что техника этого испытания выработалась и упростилась в достаточной мере, что накоплен достаточный багаж необходимых сведений, что выяснена и оценена в должной мере та польза и те возможности, которые представляет этот метод в повседневной заводской практике.

При помощи X -лучей в данное время можно производить следующие исследования металлов: 1) изучение структуры, 2) изучение остаточных деформаций и определение предела упругости, 3) химический анализ и 4) определение пороков.

а) Изучение структуры. ² X -лучи являются особой разновидностью

¹ Рентген, 1895.

² Более подробно см. например Н. Я. Селяков, Техника и рентгеновые лучи, 1925; Н. Я. Селяков Рентгеновые лучи и структура веществ, 1923.

лучистой энергии и от других известных нам лучей отличаются длиной волны или периодом колебания. Например, длина волны видимых лучей, воспринимаемых нашим глазом, имеет порядок $5-10^{-5}$ см, в то время как длина волны X-лучей в 1000 раз короче, являясь таким образом одного порядка с расстоянием между атомами в кристаллах. Благодаря этому стало возможно определить как расположение атомов, так и расстояние между ними. Спектры рентгеновых лучей состоят из ряда серий. Наиболее интенсивной и обладающей наиболее короткими волнами является серия K, которая почти исключительно и применяется для технических исследований. В данное время разработан ряд приборов для точного определения длины волн рентгеновых лучей. Большую заслугу в этом отношении следует приписать Siegbahn'у и его школе.

С тех пор как стали известны длины волны рентгеновых лучей — появилась возможность изучать структуру вещества. При этом исходят из предположения, что каждый химический элемент или соединение обладает собственной пространственной (кристаллической) решеткой,

в узлах которой находятся атомы вещества. Металлы имеют следующие кристаллические решетки:

1. Куб с центрированными гранями, как это изображено на рис. 196.

В данном случае атомы расположены по углам куба и в центре каждой грани. К этой группе относятся все благородные металлы, а также и такие металлы, как Al, Ni, Cu,

обладающие большой электропроводностью и способностью коваться даже при низких температурах.

2. Центрированный куб, атомы в котором расположены по его углам и один в центре куба (рис. 197). К этой группе принадлежат как ковкие, так и нековкие металлы; среди первых — железо, для которого длина стороны элементарного куба равна 2,87 ангстремов ($1 \text{ ангстрем} = 10^{-8} \text{ см}$).

3. Гексагональная призма с расположением атомов, как указано на рис. 198. К этой группе принадлежат главным образом хрупкие металлы, ковкость которых появляется в узком интервале температуры.

Прохождение пучка рентгеновых лучей через кристаллы рассматривается как простое отражение от той или иной грани кристалла, подчиняющееся следующему основному соотношению:

$$n\lambda = 2d \sin \varphi,$$

где λ — длина волны,

n — целое число, указывающее порядок отражения,

d — постоянная решетки,

φ — угол, обработанный лучом с гранью кристалла.

Для изучения структуры помощью X -лучей пользуются двумя методами: методом Debye-Hull и методом Laue.

Определение расстояния между атомами кристаллов по методу Debye-Hull производится следующим способом. Пучок света AA (рис. 199) падает на испытуемый кристалл, который может быть вращаем вокруг оси, перпендикулярной к плоскости чертежа. Ионизационная камера C , улавливающая X -лучи, может также вращаться на дуге вокруг той же оси. Находя сопряженные положения сильных отражений вращением вокруг оси кристалла B и аппарата C , — определяют соответствующие углы φ и тогда, зная длину волны λ , легко высчитать расстояние между атомами d .

При расположении фотографической пленки DE перпендикулярно пучку AA , отклоненный луч пересечется с нею в точке D . Большая же часть пучка не будет отклонена и пересечет пленку в точке E . Вращая кристаллы вокруг оси AA отклоненным лучом, опишем на пленке окружность с центром в точке E . Эта окружность будет отве-

чать соответствующему расстоянию плоскостей в кристалле. Если это расстояние другое, то и диаметр окружности будет другим. Поэтому, меняя ориентацию кристалла, мы получим серию концентрических кругов, из которых каждый будет соответствовать системе плоскостей с определенным расстоянием между атомами.

Вместо того чтобы вращать образец, можно пользоваться образцом, состоящим из целого ряда малых кристалликов. Таким образом получается цилиндрок спрессованного образца, а также и металлические сплавы, которые, как известно, состоят из агрегата мелких, различно ориентированных кристалликов.

В действительности фотографируют не круги, а части их, располагая пленку вокруг кристалла, как изображено на рис. 200.

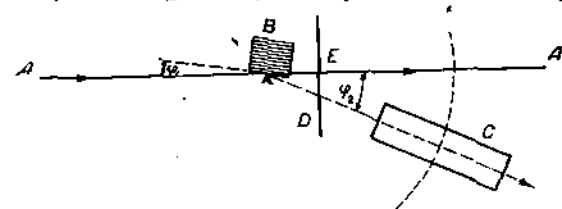


Рис. 199.

В результате получаются симметричные отрезки окружностей. На рис. 201 представлены рентгенограммы Debye-Scherrer для железа.

По методу Laue пользуются непрерывным спектром рентгеновых лучей; здесь необходима точная ориентировка изучаемого кристалла. Применение этого метода ограничивается крупными кристаллами. Пучок рентгеновых лучей, пронизывая кристалл, падает на экран (или фотографическую пленку) и образует ряд пятен, являющихся следами пересечения с экраном пучков, отраженных от граней кристалла. По расположению и относительной интенсивности пятен можно судить о структуре кристалла.

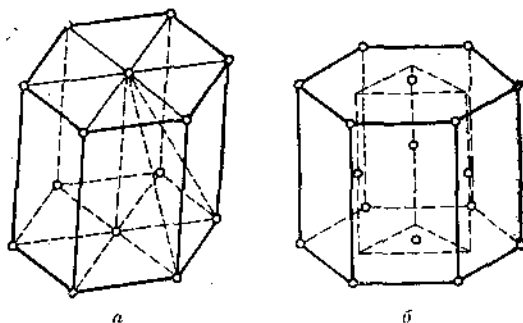


Рис. 193. Гексагональная призма.

При помощи рентгеновых лучей исследованы структуры целого ряда элементов и их сплавов и соединений.

Рентгеновский анализ не мог, конечно, не затронуть и целый ряд других вопросов, остро интересующих технику. Среди этих вопросов в первую очередь следует поставить вопрос о термической обработке стали и связанные с ней структурные изменения.

Как известно, железо имеет четыре аллотропические формы: α , β , γ и δ . Работами А. Westgreen'a¹ доказано, что кристаллографическая решетка α , β и δ одна и та же и представляет собой центрированный куб с параметром, при комнатной температуре равным 2,860 ангстрем.

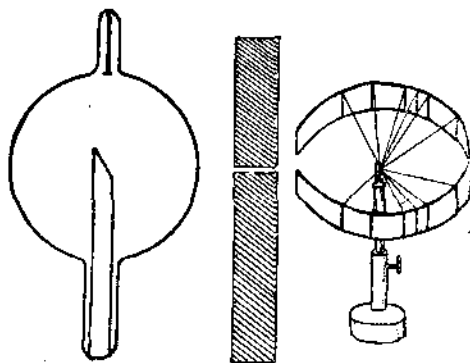


Рис. 200.

Железо же γ имеет решетку куба с центрированными гранями с параметром 3,60 ангстрем. Другой компонент, входящий в состав технических сортов железа и стали, цементит (Fe_3C) по исследованиям того же А. Westgreen'a² имеет ромбическую решетку с ребрами, равными 4,48, 5,04 и 6,70 ангстрем. Наконец, работами А. Westgreen'a³ и Wever'a³ было выяснено, что аустенит представляет собой твердый раствор углерода в железе.

Из этих чрезвычайно ценных работ особо интересным является то обстоятельство, что железо α и β имеют одну решетку. Хотя ребро куба железа α несколько меньше ребра куба железа β (для первого 2,87 и для второго 2,92 ангстрема), но эта разница объясняется температурным расширением. Такой вывод говорит далеко не в пользу



Рис. 201. Рентгенограмма Debye-Scherer. α -железо,

железа β , существование которого и без того оспаривается целым рядом исследователей.

Дальнейшее исследование структуры стали помощью X-лучей было сосредоточено над выяснением природы мартенсита. Эта структурная форма играет чрезвычайно крупную роль в термической обработке стали. Исследование природы мартенсита X-лучами производили Wever,³

¹ Iron and Steel Inst. 103, стр. 303, 1921; Zeitschr. f. Phys. Chem. 102, стр. 1, 1922.

² Iron and Steel Inst. 109, стр. 159, 1924.

³ F. Wever, Zeitschr. f. Elektrochemie 30, стр. 376, 1924; Die Naturwiss. 106, 1924.

Westgreen¹ и Н. Я. Селяков.² Все эти три автора пришли к единому мнению, что мартенсит является твердым раствором углерода в железе α . Такое решение этого вопроса однако еще более затемнило и без того неясный вопрос. По нашим воззрениям железо α не растворяет в себе цементита, а поэтому возникает новый вопрос — в каком виде находится углерод в мартенсите? Кроме этого результаты работы вышеназванных исследователей совершенно не объясняют причину большой твердости мартенсита.

б) Изучение остаточных деформаций и определение предела упругости. Вопрос об определении остаточных деформаций имеет конечно чрезвычайно большое значение в технике. Разрешение этой задачи позволило бы проверить правильность расчета конструкций, перенапряжения отдельных волокон и т. п. Задача нахождения упрощенного метода определения истинного предела упругости является также чрезвычайно важной, так как позволила бы сократить время механических испытаний и уточнила бы результаты последних. В связи с этим первые попытки применения X-лучей для разрешения этих задач открывают новые страницы в области испытания материалов. Конечно полученные результаты не дают еще возможности их практического применения, но более детальная разработка этих методов и упрощения аппаратуры может послужить импульсом для широкого распространения этих методов.

Из работ, произведенных в этой области, прежде всего следует назвать работы академика А. Ф. Иоффе, который совместно с М. В. Кирпичевой и М. А. Левитской исследовал деформацию и прочность кристаллов поваренной соли.³



Рис. 202.

При наблюдении на флуоресцирующем экране рентгенограммы Лауе для сжимаемого кристалла поваренной соли, было замечено, что при прохождении через предел упругости отдельные пятна рентгенограмм начинают вытягиваться в длинные полосы. Лишь одно пятно, представляющее отражение от плоскости ромбического додекаэдра (110), оставалось неизменным. На основании получившейся картины исследователи приходят к заключению, что остаточная деформация состоит в постепенном разрушении цельного кристалла, причем отдельные кристаллы скользят в плоскости (111) (рис. 202) и в то же время поворачиваются на различные углы вокруг нормальной оси.

Чрезвычайно интересны исследования предела упругости поваренной соли при различных температурах, которые привели к тому заключению, что предел упругости плавно уменьшается при повышении температуры и при температуре плавления становится равным нулю. Момент плавления также весьма ярко отражается на лауевской диаграмме — в момент плавления мгновенно появляется общее

¹ J. Iron and Steel Inst. 105, стр. 1419, 1922.

² Труды Агр. физико-техн. лаборатории, вып. I, стр. 34, 1925 г.

³ Там же, вып. I, стр. 1—20, 1925.

свечение всего флуоресцирующего экрана. Эти явления открывают новые пути для точного определения температуры плавления веществ, а кроме того рождают новые идеи о сущности предела упругости. Возможности практического применения полученных результатов

должны указать дальнейшие работы не только с поваренной солью, но и с металлическими сплавами.

Среди таких работ наибольшего внимания заслуживают работы J. Czochralski.¹ Он приводит весьма интересные результаты своих исследований X-лучами деформированных кристаллов алюминия. Этот автор получал большие кристаллы алюминия путем рекристаллизации заклепанных образцов и при исследовании пользовался методом Laue. Рентгенограмма деформированного алюминия по существу напоминает картину, полученную А. Ф. Иоффе при исследовании поваренной соли. На рис. 203 представлена рентгенограмма Laue

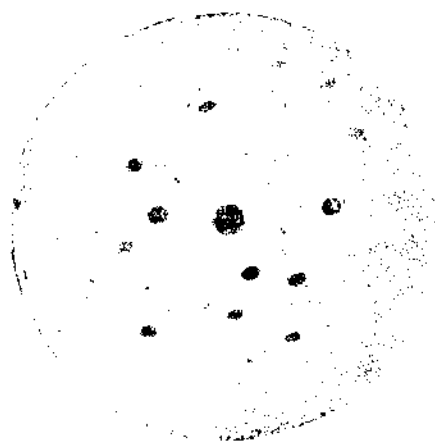


Рис. 203. Диаграмма Лауэ недеформированного кристалла Al.

кристалла недеформированного алюминия, на рис. 204 — диаграмма вытянутого на 5% того же кристалла и на рис. 205 — диаграмма того же кристалла, вытянутого на 20%. Ясно видно, как первоначально четкие пятна сначала начинают расплываться, а затем вытягиваться.

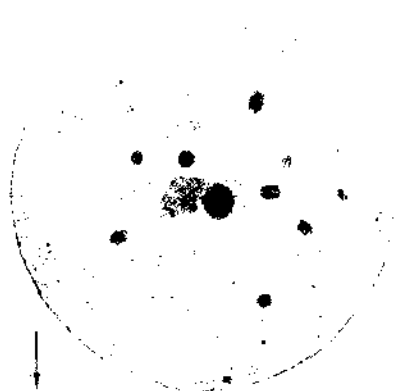


Рис. 204. То же, что и на рис. 203, но после растяжения на 5%.

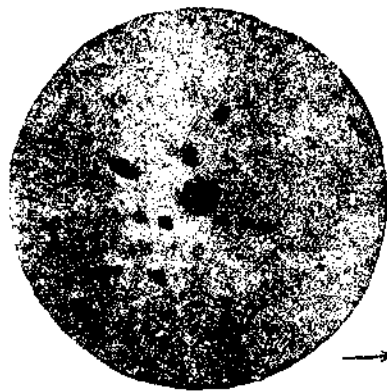


Рис. 205. То же, что и на рис. 203, но после растяжения на 20%.

в) Химический анализ. Как известно, на основании оптического спектра можно изучать химический состав исследуемого вещества. Спектр рентгеновых лучей открывает в этом отношении еще большие возможности благодаря своей простоте, ибо положение рентгеновских

¹ Moderne Metallkunde, стр. 166—205, 1924.

линий какого-либо химического элемента определяется только порядковым номером его и не зависит от типа химического соединения и прочих факторов, которые влияют на оптический спектр.

Химический анализ X -лучами производится двумя путями: или при помощи спектра испускания или же спектра поглощения исследуемого вещества. В первом способе ¹ исследуемое вещество наносится на антикатод рентгеновской трубки. Сравнивая тогда спектр испускания данного вещества со спектрами известных элементов, можно судить о качественном составе вещества. Количественное определение содержания какого-либо элемента можно выполнить следующим способом: к исследуемому веществу примешивается некоторое определенное количество какого-либо элемента, близкого к нему и не содержащегося в нем. Определяют затем два спектра — исследуемого элемента и подмешанного. Отношение интенсивности линии первого спектра ко второму, умноженное на весовое отношение подмешанного элемента к исследуемому и умноженное еще на 100, дает процентное содержание искомого элемента в веществе.

По второму способу, разработанному Glocke'ом, ² готовят фильтр из исследуемого вещества и помещают его между рентгеновской трубкой и спектрографом. Тогда получают спектр поглощения данного вещества, на основании чего и определяют качественный состав вещества. Количественное определение производят по степени контрастности края полосы поглощения против фона.

О степени точности количественного определения этими методами судить еще рано, так как эти методы далеко не разработаны, и не все элементы улавливаются ими. Но все же точность до 1%, получаемая уже и теперь, заставляет отнести к этим методам с большой надеждой на будущее, тем более, что они имеют большое преимущество перед обычными способами — они требуют минимального количества вещества, и для них безразлично, в каком химическом соединении будет дан искомый элемент.

г) **Определение пороков.** Наиболее широкое применение рентгеновы лучи находят для просвечивания различных веществ и даже целых аппаратов. Целью такого просвечивания является определение внутренних дефектов в материале, которые не могут быть обнаружены иными методами и присутствие которых может пагубно отразиться на службе детали. Просвечивание различных аппаратов имеет целью проверять правильность сборки; в этом отношении X -лучи имеют особенно большое поле применения в области электротехники.

Для просвечивания стальных болванок с целью нахождения в них пороков в виде раковин и пузырей X -лучи были впервые применены в Америке в 1915 г. Первое просвечивание металлов у нас в СССР произведено в 1924 г. ³

В данное время для просвечивания применяются высоковольтные установки (250 и более kV), позволяющие просвечивать стальные болванки на глубину до 10 см.

¹ Н. Я. Селяков, Труды Агр. физико-технич. лаб., вып. I, стр. 25—33, 1925.

² Fortschritte d. Geb. d. Röntgenstr., XXXI, стр. 91, 1923.

³ 1) Труды Агр. физико-техн. лабор. вып. I, 1925, статья Н. Я. Селякова, Методика просвечивания металлов на отыскание пороков. 2) Техника и производство, № 2, статья Г. Аксенова, Просвечивание металлов рентгеновыми лучами, 1926.

Определение пороков путем просвечивания X-лучами основано на поглощении рентгеновых лучей в материале. Например при прохождении сквозь металлическую пластинку часть лучей поглощается, и выходящие лучи будут отличаться по интенсивности от лучей, входящих в материал. При однородном материале поглощение будет равномерное по всей просвечиваемой плоскости. В случае же нахождения в исследуемом объекте каких-либо пороков, например пузырей, поглощение будет не одинаковое по всей просвечиваемой плоскости. Лучи, прошедшие через раковину, по выходе из металла будут большей интенсивности, нежели соседние лучи, не встретившие на своем пути порока. Фотографическая пленка зафиксирует такую неравномерность в виде отдельных пятен. Производя просвечивание в двух различных положениях, можно на основании этих пятен судить о форме и величине включений.

Чувствительность этого метода может достигнуть довольно больших пределов: например при просвечивании алюминия толщиной в 10 см удалось обнаружить раковины до 0,3 мм толщиной.

5. Термоэлектрический метод.

Принцип этого метода уже известен из гл. 1, когда речь шла об измерении температуры термопарами. Испытание по этому методу сводится к измерению электродвижущей силы спая, образованного из металлического проводника какого-либо металла (эталоны) и проводника исследуемого сплава; 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 этим 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) 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 тела (например значения A и B), а по вертикальной оси — значение электродвижущих сил для соответству-

ющих сплавов. Характер получаемых при этом кривых зависит от фаз, составляющих испытуемый сплав.

В случае, когда сплав состоит из двух фаз (диаграмма состояния согласно рис. 51), кривая изменения электродвижущей силы будет близка к прямой (*bb* рис. 51). Если же два компонента образуют одну фазу — беспрерывный ряд твердых растворов (диаграмма состояния согласно рис. 54), кривая изменения электродвижущей силы изобразится в виде гиперболической кривой, вогнутой или выпуклой в отношении оси *X* (*bb* рис. 54). При замене одной фазы двумя, при переходе одной фазы в другую и т. д. кривая электродвижущих сил будет представлять собой комбинированную кривую, составленную из отдельных кривых. На рис. 57 представлена кривая изменения электродвижущей силы для случая, когда два компонента обладают ограниченной растворимостью в твердом виде (диаграмма состояния согласно рис. 57). Участки твердых растворов (одной фазы) дают кривую гиперболического характера, на участке двух фаз кривая переходит в прямую (или пологую кривую).

При пользовании термоэлектрическим методом для исследования состояния твердого сплава при различных температурах Н. Le Chatelier 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)*.

6. 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 электролит. 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 электрода, образованного из сплава, будет p_2 , а электродвижущая сила всего элемента определится разностью $p_1 - p'_3$. При изменении состава сплава, как только дойдем до границы фазы с потенциалом p'_2 , последняя сменится новой, и величина потенциала сложного электрода сразу изменится до величины, соответствующей структурной составляющей нового конгломерата с наибольшим потенциалом.

Можно нагрузить *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 нашему элементу какой-либо другой источник электричества и, направив ток от него обратно направлению тока в нашем 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 и резко меняющую свое значение при c (см рис. 51). Для случая твердых растворов получаем кривую, вогнутую или выпуклую по отношению оси X (см рис. 54). В случае же предельной растворимости, кривая получается комбинированной (см рис. 57).

7. 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. 206). 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.

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 b , уравнение которой будет:

$$v = \frac{p_1}{d_1} + \frac{100 - p_1}{d_2}$$

и которая будет прямою (рис. 207). Если же по оси абсцисс отложим состав, выраженный не в весовых, а в объемных процентах, а по оси

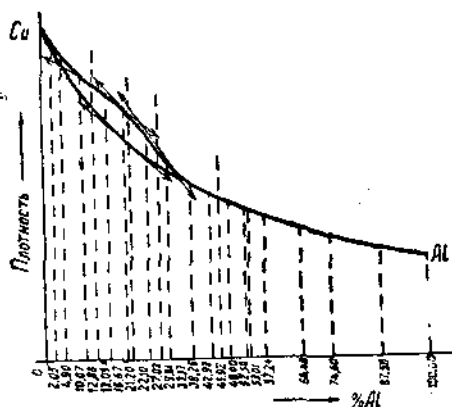


Рис. 206.

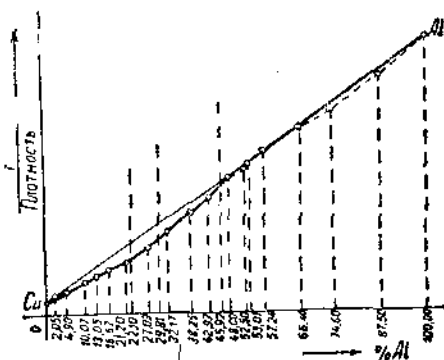


Рис. 207.

ординат — плотность, то получим кривую c (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_1 ,

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 Guillet,¹ может быть осуществлен при посредстве любых достаточно точных весов. Описание 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 μ 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 Le Chatelier, заключается в том, что образец, имеющий некоторый заранее определенный вес, погружается в жидкую среду, хорошо смачивающую твердые тела (алкоголь, бензин), после чего измеряется приращение объема, создавшееся под действием этого погружения. Для суждения о точности, которой можно достигнуть при пользовании этим методом, укажем, что Le Chatelier пользовался трубкой, имевшей внутренний диаметр 6 мм. Таким образом высота столбика жидкости, отвечающего 1 см^3 , была равна 35 мм. Деления были нанесены на трубке через каждую десятую часть см^3 , 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 см^3 .

Для определения плотности жидких сплавов при высоких температурах можно пользоваться предложенным Edwards и Moorman² прибором, изображенным на рис. 208. 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. Edwards

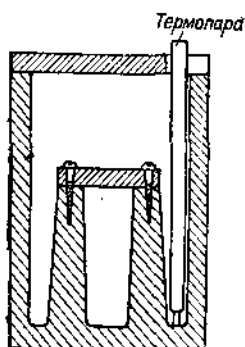


Рис. 208.

¹ Léon Guillet, Méthodes d'étude des alliages métalliques, Dunod, стр. 95. Paris, 1923.

² Edwards and Moorman, Met. Engg., XXIV, 12/I, 1921.

и Моогман¹ определяли таким способом плотность алюминия вплоть до 1000° С.

В нижеследующей таблице мы даем плотности некоторых металлов.

ТАБЛИЦА XI.
Плотность (удельного веса) некоторых металлов.
(по Hütte, Werkstoffhandbuch)

Металл	Химический символ	Плотность ρ	
		при + 20°С	жидкого металла при температуре 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 (кристаллический) .	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

¹ Там же

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

1. Испытание статической нагрузкой.

а) Растяжение. Диаграмма растяжения. Если начать растягивать например железный стержень и при возрастании растягивающей силы R определять для каждого значения этой силы соот-

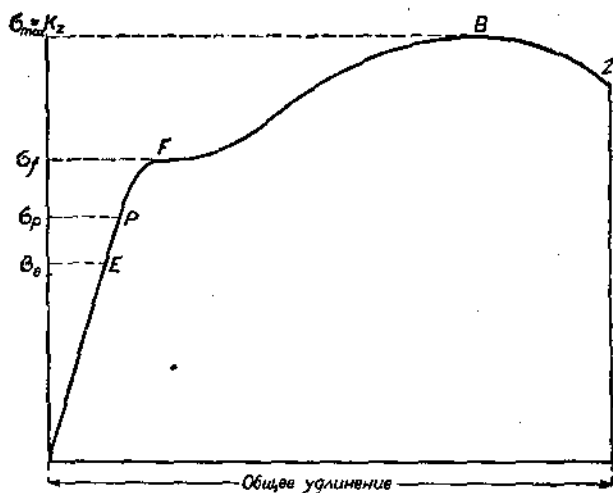


Рис. 209.

ветствующую величину удлинения λ и откладывать в каком-либо условном масштабе эти величины на чертеже по осям координат: λ — как абсциссы, а R — как ординаты, то конечные точки ординат опишут диаграмму, выражающую зависимость между удлинениями образца и растягивающими его силами. На рис. 209 линией $OEPFBZ$ изображена такая диаграмма. Вид ее в зависимости от мате-

риала несколько меняется, но все же общий характер ее для различных металлических сплавов остается одним и тем же.

На этой диаграмме можно ясно различить следующие периоды деформации:

1) В первом периоде OP нагрузка R возрастает пропорционально удлинению λ до некоторого предела в точке P , называемого пределом пропорциональности; до этого предела существует линейная зависимость между силой R и деформацией λ .

2) Выше предела пропорциональности кривая имеет перелом, и, начиная с этого момента, удлинение возрастает почти без приращения силы R . Такое состояние начинается в некоторый момент F , и соответствующая ему нагрузка называется пределом текучести.

3) Выше предела текучести металл вновь начинает оказывать сопротивление удлинению, но деформация возрастает уже не пропорционально возрастанию силы R , а скорее. Этот третий период заканчивается в точке B , характеризующей собой максимальную нагрузку, какую выдерживает образец. Эта нагрузка носит название временного сопротивления разрыву.

4) В периоде от предела текучести и до временного сопротивления разрыву растягиваемый стержень удлиняется более или менее равномерно по всей длине. Начиная же с точки B или несколько позже, деформация концентрируется в одном каком-либо месте стержня, которое начинает быстро растягиваться и уменьшать площадь своего поперечного сечения. При этом нагрузка падает с B до Z , и здесь происходит разрыв бруска. Значение нагрузки Z , при котором происходит фактическое разрушение материала, специального названия не имеет. Оно зависит от целого ряда факторов, как например скорости растяжения, и поэтому при испытании не принимается во внимание.

При испытании определяются величины удлинения, уменьшения поперечного сечения образца, временное сопротивление, предел текучести и пропорциональности. Предел пропорциональности, который для конструкции имеет большее значение, нежели предел текучести, определяется реже, так как для его определения необходимы специальные приборы, и самое испытание отнимает много времени. Предел текучести определяется значительно проще — по диаграмме, записываемой машиной.

Несколько ниже точки P лежит еще одна замечательная точка E , характеризующая предел упругости материала. Это есть такая нагрузка, которая после снятия ее вызывает некоторую остаточную деформацию в образце. Величина такой деформации принимается равной от 0,01 до 0,001% и даже меньше.

Значения усилий F , P и E в некоторых материалах весьма близки друг другу, ввиду чего очень часто понятия эти смешивают, называя их все пределом упругости. 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 разнятся друг от друга на значительную величину.

Площадь, ограниченная линией изменения нагрузки ($OEPF...$ и т. д.) и осью абсцисс, дает значение работы, потраченной на разрушение испытуемого бруска. При равных значениях E , P , F и R работа, потребная для разрыва двух брусков, будет больше для того бруска, материал которого способен больше удлиняться.

Форма образца. Форма образца оказывает весьма существенное влияние на результаты испытания. Расчетная длина образца, как будет указано ниже, имеет большое влияние на значение относительного удлинения. Головка же образца и форма перехода от головки к растягиваемой части образца влияет не только на удлинение, но и на значение напряжений в образце. Поэтому вполне понятно стремление пользоваться однотипными образцами, дабы иметь возможность сравнивать результаты испытаний, произведенных в различных лабораториях.

На рис. 210 и 211 представлены так называемые нормальный (слева) и пропорциональный (справа) образцы. Нормальным круглым образцом называют образец диаметром $d=20$ мм и площадью поперечного сечения $\frac{\pi d^2}{4}$, где $\pi=3,14$ см². Такую же площадь имеет и нормальный плоский образец, причем отношение сторон $a:b$ сечения образца может колебаться от 1:1 до 1:6. Расчетная длина l нормального образца принимается $l=10d=200$ мм. Остальные размеры указаны на чертежах.

Однако не всегда имеется возможность применять при испытании образцы нормального типа. Очень часто нельзя вырезать столь мас-

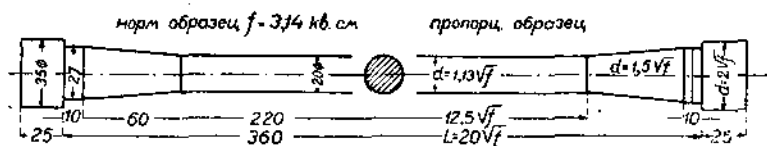


Рис. 210.

сивный образец и тогда пользуются пропорциональным образцом (рис. 210, справа), размеры которого высчитываются в зависимости от расчетной площади поперечного сечения.

Наиважнейшим соотношением здесь является отношение расчетной длины l к площади поперечного сечения f , которое принимается

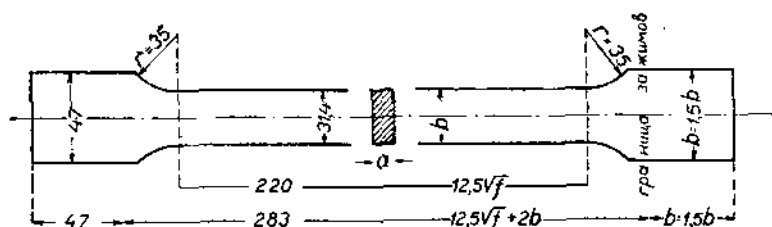


Рис. 211.

равным $\frac{l}{\sqrt{f}}$. Для нормальных образцов мы имели $\frac{l}{\sqrt{f}} = \frac{20,0}{\sqrt{3,14}} = 11,3$, поэтому для образцов с диаметром меньшим или большим 20 мм должно быть $\frac{l}{\sqrt{f}} = 11,3$ или $l' = 11,3 \sqrt{f}$.

В нормах германской промышленности (DIN) предусмотрены также и так называемые короткие образцы,¹ для которых расчетная длина принимается равной:

$$l = 5d = 5,64 \sqrt{f}.$$

¹ Обстоятельное параллельное исследование с длинными ($10d$) и короткими ($5d$) образцами произвел М. Rudell of, Forschungsarbeiten, Н. 215, 1919.

Согласно этим нормам ¹ сечение пробного образца может быть круглым, квадратным, призматическим (в общем с соотношением сторон не более 1 : 4) или в исключительных случаях другой формы; небольшие профильные прутки, трубы и т. п. могут испытываться в целом виде. Образцы разделены согласно табл. XII.

ТАБЛИЦА XII.

Наименование образца	Испытуемая длина l_0	Расчетная длина $l_{м.м.}$	Диаметр $d_{м.м.}$	Сечение образца $мм^2$	Обозначение относительного удлинения после разрыва
Нормальный:					
с голов- кой { 1. Длинный . . 2. Короткий . .		$10d = 200$ $5d = 100$	20	314 (100π)	δ_{10} δ_5
Пропорциональный					
с голов- кой { 3. Длинный . . 4. Короткий . .	$l + d$	$10d = 11,3 \sqrt{F_0}$ $5d = 5,63 \sqrt{F_0}$	Произ- вольный	Произ- вольное	δ_{10} δ_5
без го- ловки { 5. Длинный . . 6. Короткий . .		200 100	Произ- вольный	Произ- вольный	δ_e δ_k

Часть образца — переходная к головкам — в этих нормах не устанавливается, так как форма ее зависит от конструкции испытательной машины.

Удлинение. Пробный брусок с первоначальной расчетной длиной в l после разрыва укажет расстояние между кернами l_1 . Величина $\delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100$ называется относительным удлинением.

Удлинение бруска после разрыва определяется измерением расстояния между кернами, но при таком способе неминуемы ошибки, так как даже при вполне однотипных образцах, изготовленных из одного и того же материала, удлинение, рассчитанное таким способом, может быть разным и 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 частиц будет падать по направлению к головкам.

На рис. 212 изображен нормальный круглый образец, на котором нанесены штрихи через каждые 10 мм. Таким образом его расчетная длина разделена на 20 частей. Выше изображена кривая, характеризующая удлинение отдельных разграфленных частей, причем

¹ DIN 105.

предположено, что разрыв произошел по сечению 10, т. е. в середине образца. Среднее удлинение можно рассматривать как высоту площади $adec$, равновеликой 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 таксе удлинение не может ха-

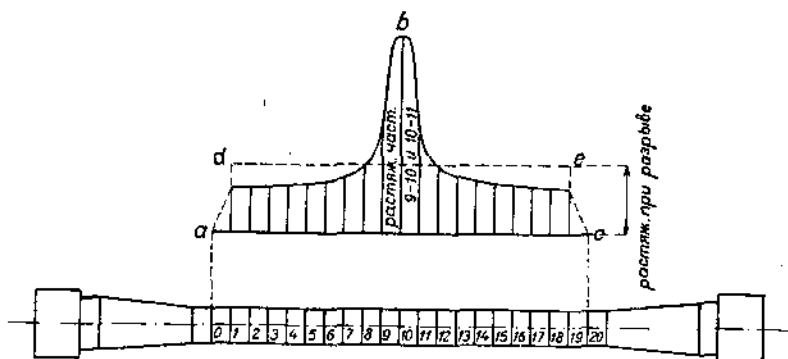


Рис. 212.

ктеризовать материал, так как значение его случайное и зависит от места разрыва. Поэтому предложен способ учитывать влияние места разрыва на значение удлинения материала, сделав при этом практически допустимое предположение, что деформация происходит симметрично к месту разрыва.

Предположим, что разрыв произошел в средней трети образца (рис. 213). 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

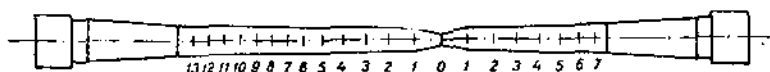


Рис. 213.

образом: измеряют длины 0—10', 0—7' и 7'—10', находят их сумму l ; разность $l' - l$ (где l — первоначальная расчетная длина) даст искомое 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.

Весьма часто бывает необходимо пересчитать удлинение с одной расчетной длины на другую. Этим вопросом много занимался Bach,¹ предложивший следующую эмпирическую формулу для пересчета удлинения.

$$\delta = A + \frac{B}{\sqrt{l}},$$

где δ — относительное удлинение в ‰,

l — расчетная длина в мм,

A и B — коэффициенты, зависящие от материала и формы поперечного сечения образца.

Этой формулой пользуются следующим образом: положим нам известно удлинение: $\delta_{50} = 62,1\%$ (δ_{50} — удлинение при расчетной длине $l = 50$ мм) и $\delta_{200} = 35,3\%$ (δ_{200} — удлинение при $l = 200$ мм); необходимо найти удлинение δ_{250} (при расчетной длине в $l = 250$ мм).

Имеем:

$$\delta_{50} = A + \frac{B}{\sqrt{50}} \quad \text{и} \quad \delta_{200} = A + \frac{B}{\sqrt{200}}$$

и далее:

$$A = \delta_{50} - \frac{B}{\sqrt{50}} \quad \text{и} \quad B = (\delta_{200} - A)\sqrt{200},$$

$$A = 62,1 - (35,3 - A) \cdot \frac{\sqrt{200}}{\sqrt{50}},$$

откуда:

$$A = 8,5 \quad \text{и} \quad B = 379$$

и тогда:

$$\delta_{250} = 8,5 + \frac{379}{\sqrt{250}} = 32,4\%.$$

Сжатие поперечного сечения. 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:

$$\psi = \frac{\frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d_1^2}{4}}{\frac{\pi d^2}{4}} 100 = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d} \right)^2 \right] 100.$$

¹ Mitt. über Forschungsarbeiten, H. 29, Zeitschr. d. V. d. S., стр. 854, 1919.

Временное сопротивление разрыву. Напряжение временного сопротивления разрыву высчитывают из наивысшей достигнутой нагрузки B , отнеся ее обычно к единице первоначальной площади, т. е.

$$\sigma = \frac{B}{f} \text{ кг/мм}^2 \text{ или кг/см}^2.$$

Определение E , P и F . Предел текучести F обычно определяется из диаграммы, ибо все металлические сплавы при растяжении дают более или менее четкий перегиб в 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 F и служит причиной того, что предел текучести в практике определяется чаще чем E и P . Знание временного сопротивления B

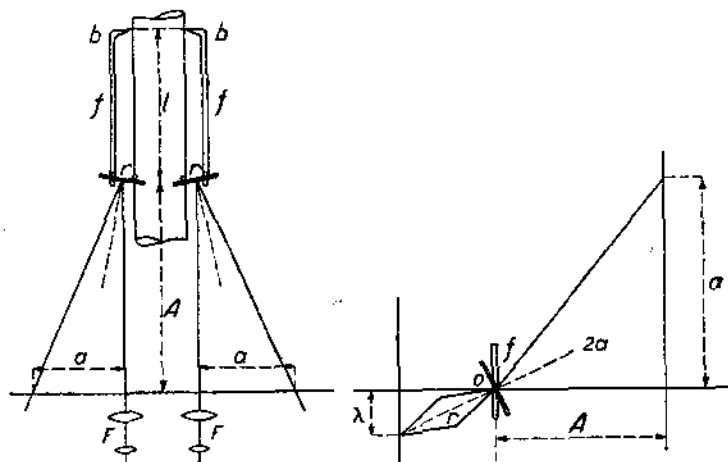


Рис. 214.

далеко недостаточно для правильного расчета конструкции. Значением B пользуются для того, чтобы приблизительно определить положение P и E , ибо конструкция должна быть рассчитана так, чтобы части при нагрузке не давали остаточного удлинения. Поэтому важнейшей величиной, характеризующей материал, является предел упругости E . Но определение E несколько сложно, и потому, чтобы подойти к этой величине возможно ближе, не усложняя при этом испытания, довольствуются определением F . В некоторых случаях определять F вышеупомянутыми 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 текучести.¹

Таким же способом определяется и предел упругости E , только для него предельным остаточным удлинением считается от 0,03%

¹ В некоторых условиях требуется остаточное удлинение 0,5%.

до 0,01% от первоначальной расчетной длины. Если принять расчетную длину равной 50 мм, то определенное остаточное удлинение выразится от 0,015 до 0,005 мм. Кроме того для определения E и P нагрузку обычно увеличивают ступенеобразно на 1—2 кг на мм², и деформации, получаемые при этом, весьма малы. 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 Martens'a и экстенсометр Cambrige.

Прибор Martens'a (рис. 214) состоит из двух пластин f , которые прикрепляются к испытываемому стержню l . С одного конца пластины f устанавливаются своими заостренными краями в керны стержня l , на другом же конце пластины имеют по стальному ножу 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 трубок 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:

$$a = A \operatorname{tg} 2\alpha.$$

Переходное отношение 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:

$$\lambda = \frac{a + a_1}{2} \quad n = (a + a_1) \cdot \frac{r}{4A}.$$

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 правильными.

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 необхо-

димо 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 Martens'a, работая с большой точностью, все же несколько громоздок. Более компактные приборы с микрометрическим винтом. Одним из наиболее распространенных типов этого прибора является экстенсометр Cambrige. Схема этого прибора изображена на рис. 215, а общий вид его — на рис. 216.

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

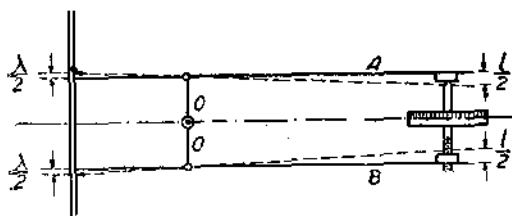


Рис. 215. Схема экстенсометра Cambrige.

головки будет соответствовать $\frac{1}{1000}$ мм. С достаточ-

ной точностью можно отсчитать $\frac{1}{2}$ деления, т. е.

$\frac{5}{10000}$ мм. Если принять ра-

счетную длину $L=50$ мм, то легко видеть, что этим

прибором можно отсчитать удлинение $\frac{100 \cdot 50}{50 \cdot 10000} = 0,001\%$ первоначальной расчетной длины.

Для точного измерения l часть снабжена пружинящей пластинкой. Вибрируя этой пластинкой и приподымая или опуская острие винта, легко производить измерения этим прибором.

Зажимы. Круглые образцы нормального и пропорционального типа закрепляются так, как это указано на рис. 217. Зажимы должны иметь шаровую поверхность, дабы избежать перекосов в образце при растяжении.

Круглые образцы, не имеющие головки, зажимаются в губки с насечкой (рис. 218).

Плоские образцы или зажимаются в губки, имеющие насечки (рис. 219), или же укрепляются так, как это изображено на рис. 220.

При проектировании зажимов необходимо руководствоваться стремлением избежать перекосов в образцах при их растягивании. Как легко видеть, это требование удовлетворяется тем, что опоре зажима придается шаровая поверхность.

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.

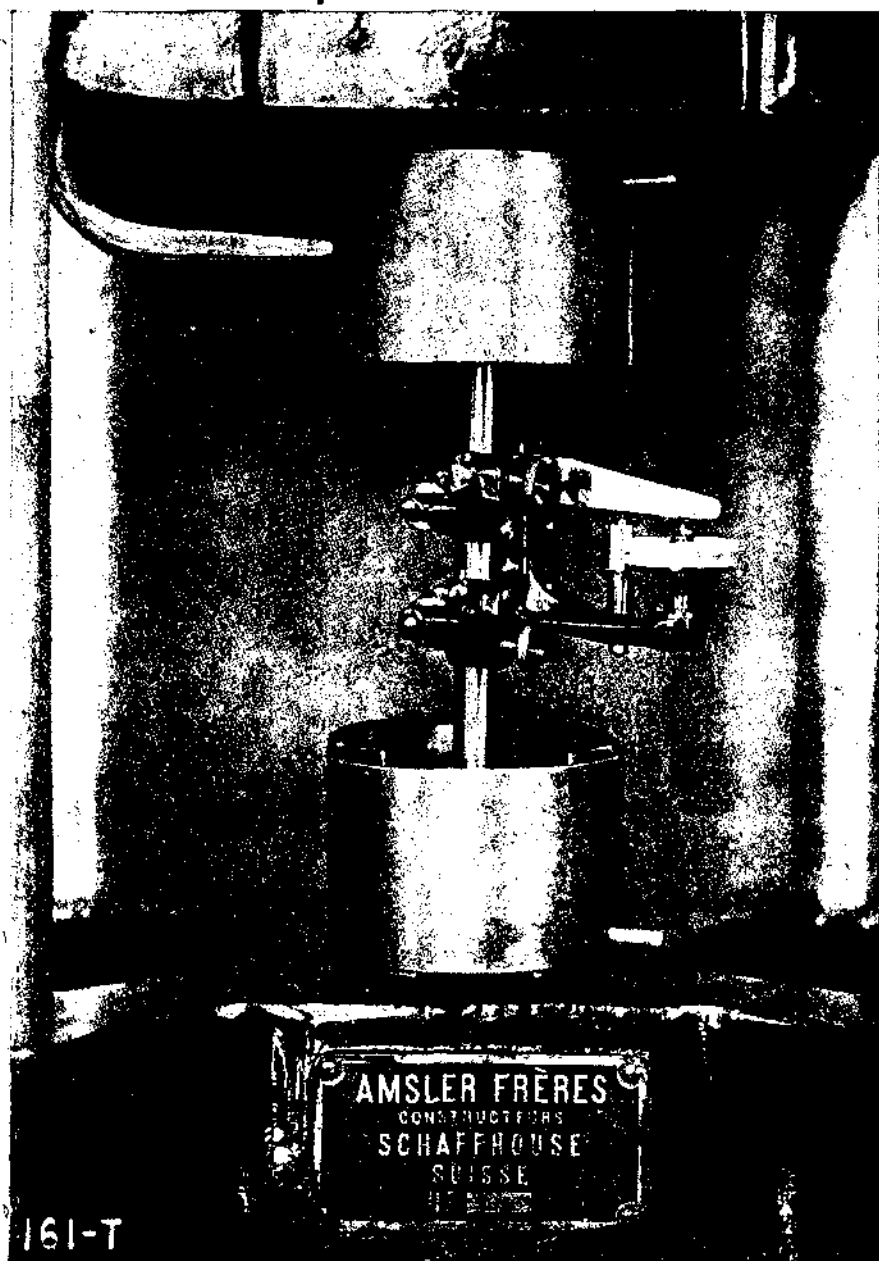


Рис. 216. Общий вид экстенсометра Cambridge.

одну — рычажную, системы фирмы Mohr и Federhaff (Маннгейм) и другую — гидравлическую, системы фирмы A. J. Amsler u. Co (Шаффгаузен).

Устройство разрывной машины Mohr и Federhaff'a изображено на рис. 221. При помощи фрикционных колес 31—32 и ременной передачи приводится во вращение червячное колесо 2. Последнее служит гайкой винта 3 и при своем вращении в зависимости от направления отпускает или поднимает винт 3. Шариковый подшипник 4 служит опорой. Винт 3 имеет приспособления 5 для закрепления образца. Зубчатое скрепление 9 и 8 служит для подъема или опускания винта вручную при установке образцов. На станине 1 установлены две массивные колонны 6 и 7, на которых установлена

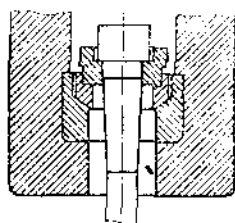


Рис. 217.

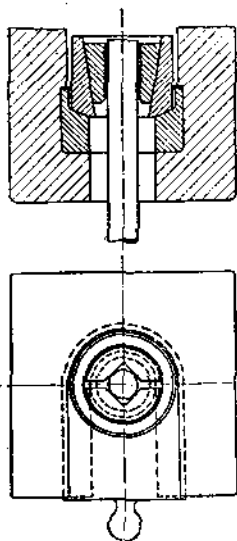


Рис. 218.

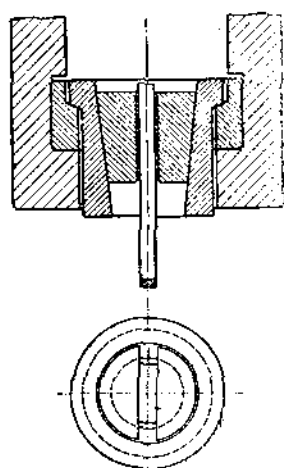


Рис. 219.

перекладина 10. Детали 12—13 являются приспособлениями для верхних зажимов. Силомер в машинах этой конструкции представляет собой рычажные весы, действующие по схеме, изображенной на рис. 222. Равновесие устанавливается передвижным грузом 21. Точность работы всей этой конструкции зависит от состояния опорных

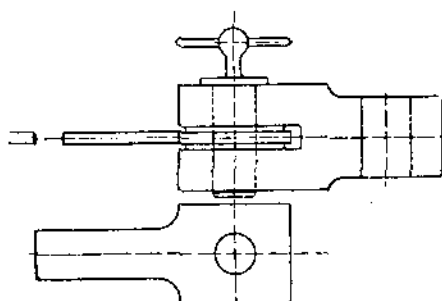


Рис. 220.

призм, которые и являются наиболее ответственными деталями силомера. Усилие, испытываемое образцом при растяжении, определяется положением груза 21, т. е. расстоянием l . Рычаг 22 обычно имеет шкалу, по которой и отсчитывается нагрузка.

В новейших системах разрывных машин Mohr и Federhaff'a передвижение груза 21 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 А. J. Amsler и Co. На рис. 223 изображен общий вид универсальной машины этой фирмы, предназначенной для работы на растяжение, сжатие и изгиб, а на рис. 224 — схема ее устройства. Испытуемый образец 8 (рис. 224) захватывается зажимами 9 и 7, из которых 7 — подвижной. Накачивая масло в цилиндр 1, приподы-

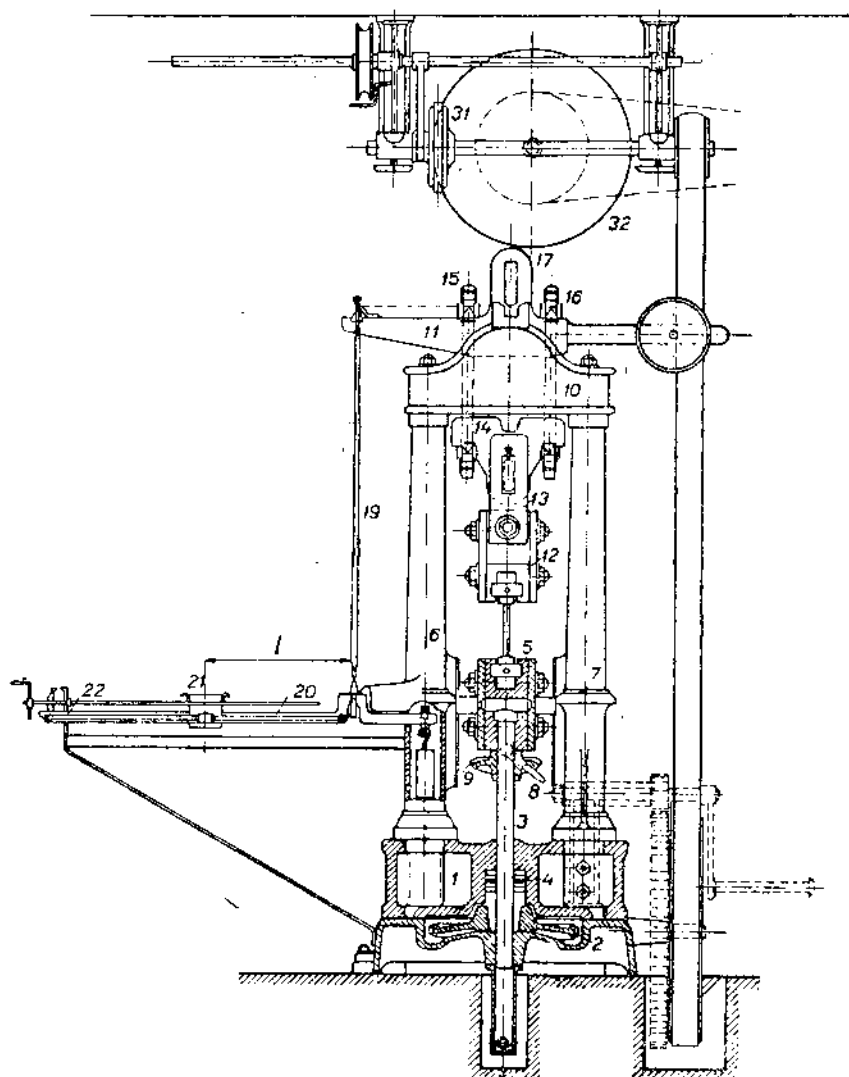


Рис. 221. Разрывная машина Mohr и Federhaff.

мают поршень 2, соединенный тягами 5 с перекладной 6, к которой и прикреплен зажим 7. При работе на сжатие или изгиб образец устанавливается на опоры 10. Верхней опорой служит опора 11. Давление поршня передается на фундамент помощью стоек 3. Силомером этой машины служит маятниковый прибор, работающий

по схеме, изображенной на рис. 225. Цилиндр машины соединен с цилиндром 1 прибора. В обоих цилиндрах давление будет одинаковое. Давлением масла поршень 2 действует на рычаг 3 и отклоняет маятник 4, вес которого G . Угол отклонения маятника 4 указывает на нагрузку испытуемого образца.

б) 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.

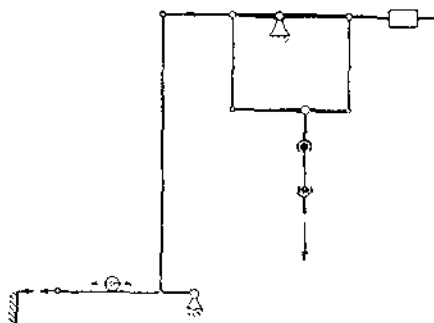


Рис. 222.

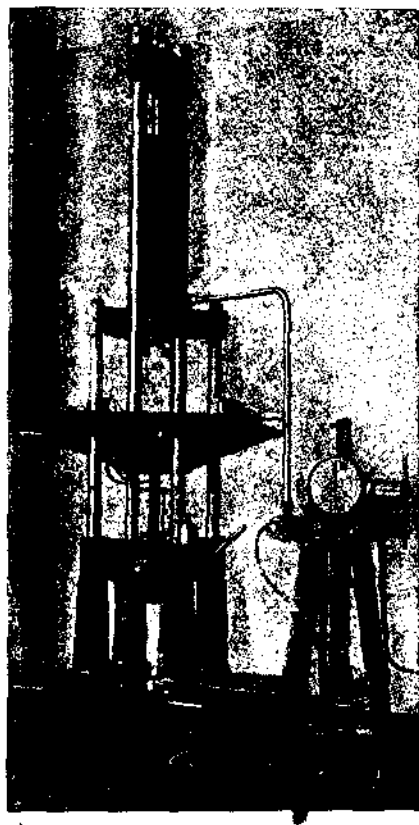


Рис. 223.

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 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 вообще:

$$\frac{V\bar{f}}{l} = 1.$$

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

$$\frac{V\bar{f}}{l} < 1.$$

Ход испытания. При испытании на сжатие определяются те же величины, что и при испытании на растяжение.

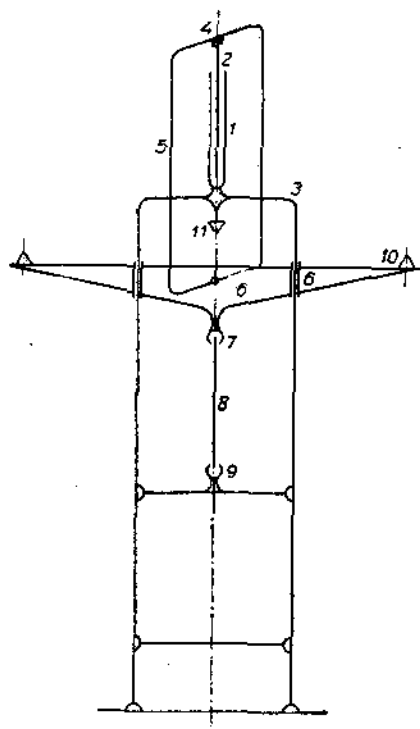


Рис. 224.

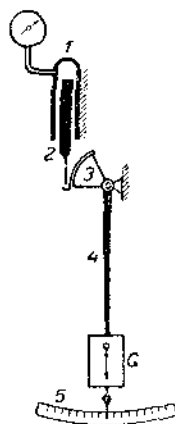


Рис. 225.

Относительное укорочение здесь выражается также в процентах по отношению к первоначальной длине, т. е.:

$$\delta = \frac{l - l_1}{l} \cdot 100 = \frac{\lambda}{l} \cdot 100.$$

Расширение поперечного сечения при сжатии определяют также в процентах относительно величины первоначального сечения, т. е.

$$\psi = \frac{f - \bar{f}}{f} \cdot 100.$$

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 нагрузки (рис. 226). В случае, если вертикальная машина снабжена лишь одним зажимом, имеющим шаровую опору, то последний должен быть расположен сверху (рис. 227). При горизонтальной машине зажим с шаровой опорой должен быть расположен на неподвижной части машины (рис. 228). 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. Мы остановимся здесь лишь на чрезвычайно интересной машине, которая по точности и по

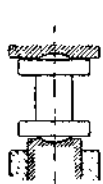


Рис. 226.

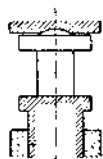


Рис. 227.

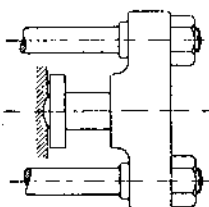


Рис. 228.

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 до-

стоинство 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 с 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. 229) 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

¹ Наиболее распространенный тип; иногда пользуются еще меньшими образцами.

² Н. Н. Митинский, сопротивление материалов, вып. I, стр. 254—257.

колонке 8. Сила, сжимающая образец, вызывается вращением колеса 29, соединенного с колоколообразной 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 враще-

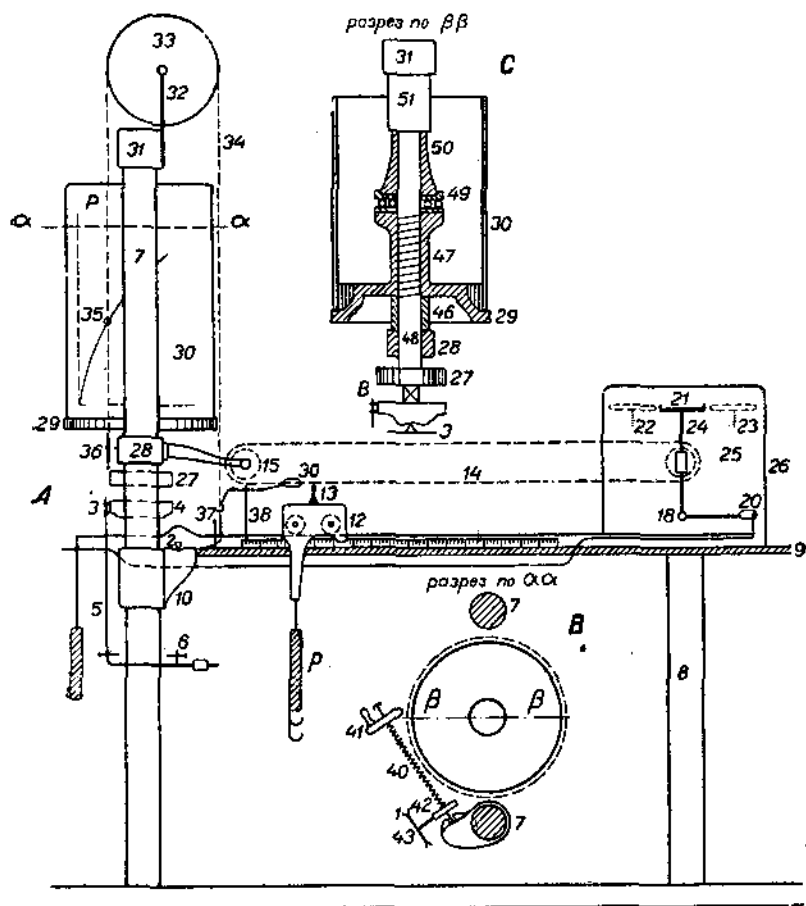


Рис. 229.

нии колеса 29 и отливки 47 болт 45 опускается вниз и сжимает образец B между подушками 27 и 4. Чтобы винт 45 вывинчивался, а не вращался вследствие возможного трения вместе с частью 47, на болту 45 — вдоль него сделана борозда, а в отверстиях 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 44, 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 выключается из него по желанию исследователя. Величина сжимающей силы измеряется при помощи рычага 1, который опирается призмю 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 подвешенным 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, двух величин, отличающихся по весу в пять раз; при одной величине груза p каждое деление рычага 1 соответствует приращению давления p на 2 кг от 0 до 1000 кг, при большей величине — 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 шкивы 15 и 16. При вращении шкива 16 в одну или другую сторону цепочка приходит в движение и перемещает тележку 12. Для постоянного уравнивания 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 колесико 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 клетчатая бумага. Барабан вращается вместе с колесом 29 при опускании винта 45, и вращение его на 1 мм соответствует опусканию подушки 26 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 ходит конец карандаша или пера 35, который перемещается вверх и вниз пропорционально движению цепочки 14 соответствующему положению тележки 12. Перо висит на шнуре 34, натянутом грузом 36, переброшенным через шкив 33, прикрепленный на ножках 32 к поперечине 31, шкивы 37 и 38, стоящие на столе 9, и наконец, прикрепленном к звену 39 цепочки 14.

О показаниях пресса Гагарина.¹ Пресс Гагарина служит для испытания образцов растягивающей, сжимающей и изгибающей нагрузкой. Этот пресс является наиболее совершенной машиной для механических испытаний материалов, и достоинство его, кроме простоты 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 конструктивных целей.

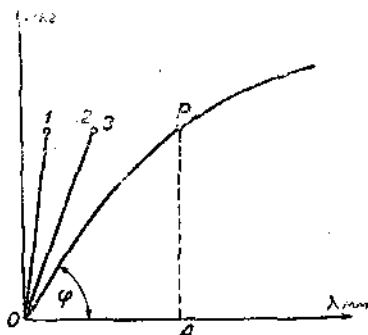


Рис. 230.

Общая деформация OP (рис. 230), автоматически зарисовываемая прессом, в зависимости от нагрузки представляет собой сумму из:

- | | |
|---------------------------------|---------|
| деформации частей самого пресса | — 0 — 2 |
| „ испытываемого образца | — 0 — 1 |
| „ 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 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_1 . Если же скорость вращения барабана начать увеличивать, то может наступить момент, когда скорость передвижения тележки не будет соответствовать скорости нарастания нагрузки.

¹ И. А. Одинг, Изв. ГЭТ, № 12, 1928.

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

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{P}{t} = \frac{PA}{OA}$$

и как скорость передвижения тележки

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{S}{t} = \frac{PA}{OA}$$

До тех пор пока максимальная возможная скорость тележки будет равна или больше скорости нарастания нагрузки, пресс будет записывать правильную диаграмму. Но лишь только действительная ско-

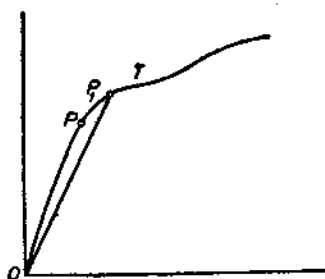


Рис. 231.

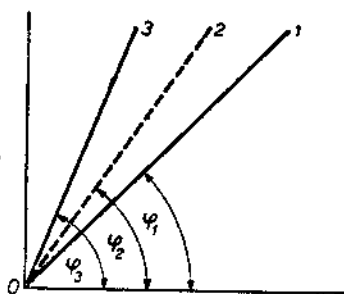


Рис. 232.

рость нарастания груза станет больше максимальной скорости тележки как диаграмма покажет неправильные данные.

На рис. 231 представлен такой случай. Машина должна была бы записать кривую OPT , но вследствие того, что скорость тележки была недостаточна, диаграмма представилась в виде кривой OP_1IT . Результатом этого обстоятельства явилось неправильное определение предела пропорциональности: вместо значения P на диаграмме он определялся 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 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. 232). Пусть далее прямая $0-2$ характеризует деформацию пресса. Сравнивая кривые $0-1$ 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 мало мощным 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. 231).

Это обстоятельство побудило заменить часовой механизм прессы Гагарина более мощным прибором, дабы увеличить скорость движения тележки. Схема этого прибора представлена на рис. 233.

На ведущий вал 6, который приводится во вращение тем же мотором, что и вся машина, насажена зубчатка 7, которая находится в постоянном сцеплении с зубчатками 8 и 9. Зубчатка 8 насажена на вал 10, зубчатка 9 — на вал 11. На валу 10 закреплена магнитная муфта 12, на валу 11 — такая же муфта 13. Против магнитных муфт 12 и 13 установлены железные шайбы 17 и 18, которые со шпонкой насажены на оси 19 и 20. Шайбы имеют возможность несколько ($0,2-0,3$ мм) передвигаться вдоль осей. Вращением осей 19 и 20 приводятся во вращение шкивы 21 и 22. Шкивы соединены гибкой

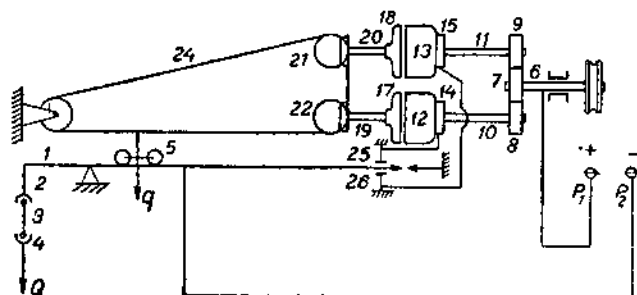


Рис. 233.

связью 24 (например ремень, цепочка), которая в свою очередь соединена с тележкой 5.

Один конец обмотки электромагнитных муфт соединен с корпусом механизма, который в свою очередь соединен с полюсом P_2 — электрической сети, вторые же концы выведены на изолированные контактные кольца 14 и 15 и подведены к контактам 25 и 26. Рычаг 1 соединен электрически с полюсом P_1 электрической сети.

Из схемы легко видеть, что ведущее звено 6 вращает электромагнитные муфты 12 и 13 в противоположных направлениях (например 12 по часовой стрелке, а 13 против или наоборот). В течение всего испытания муфты вращаются непрерывно. До тех пор пока рычаг 1 будет в равновесии и не будет касаться контактов 25 и 26, ни в одной из электромагнитных муфт тока не будет, и они не притянут шайбы 17 или 18 и не заставят вращаться валы 19 и 20.

Как только нагрузка Q выведет рычаг 1 из равновесия, он коснется контакта 25 и этим замкнет ток через вращающуюся муфту 12. Образовавшийся магнитный поток притянет шайбу 17, и вращающаяся муфта 12 приведет во вращение вал 19 и стало-быть начнет передвигать тележку до тех пор, пока рычаг 1 не примет горизонтального положения.

Если рычаг 1 соединяется с контактом 26 (например при разгрузке машины и т. п.), то электрический ток пойдет через вращающуюся в противоположном направлении муфту 13. Последняя намагнитится, притянет шайбу 18, приведет во вращение вал 20, передвинет тележку 5 в обратном направлении.

Таким образом, включая контакт 25 или 26, 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 легковесные 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. 234. 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. 232), характеризующий максимальную скорость тележки, был больше угла φ_2 . В этом случае уже невозможно получить ошибки, указанной на рис. 231, а кроме того можно

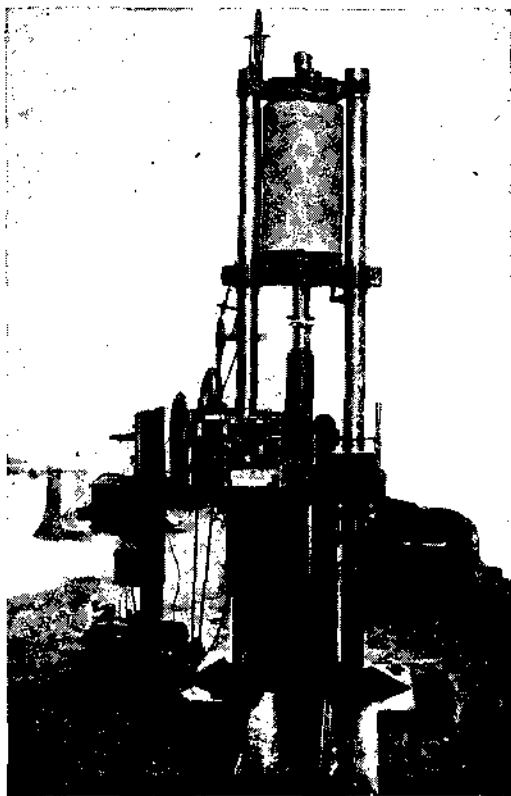


Рис. 234. Пресс Гагарина (общий вид).

увеличить скорость работы всего пресса, увеличивая таким образом его производительность.

в) Изгиб, кручение и срез. Изгиб. При испытании металлов пробы на изгиб применяются в весьма ограниченной степени, и в этих случаях стараются употребить возможно простой способ. Чаще всего пробный брусок укладывается на двух опорах, и посредине между ними его нагружают силой 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 аналогичная же, 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_S и σ_B и соответствующие прогибы f .

Из уравнения для прогиба и найденных величин для f можно вычислить:

$$\alpha = 48 \cdot \frac{Jf}{l^3 p}$$

или, если обозначить отношение $\frac{f}{l}$ как стрелу прогиба,

$$\alpha = 48 \cdot \frac{J}{l^3 p} \cdot \frac{f}{l}.$$

Так как модуль упругости $E = \frac{1}{\alpha}$, то получим:

$$E = \frac{1}{\alpha} = \frac{l^3 p}{48 J} \cdot \frac{l}{f}.$$

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 производить 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. 235

изображен захват, применяемый преимущественно для литых образцов. Головка образца имеет квадратную форму, тело образца — цилиндрическую.

На рис. 236 и 237 изображены способы закрепления цилиндрических брусков. В первом случае образец удерживается губками с насечкой, во втором при помощи шпонки.

На рис. 238 представлена схема машины А. Амслера для испытания на кручение с максимальным крутящим моментом 6 мкг. Пробный брусок 1 закрепляется в зажимах 2 и 3 и закручивается вращением рукоятки 4. Полное число оборотов регистрируется счетчиком 5,

дробное же отсчитывается по шкале 6. Захват 3 укреплен на оси 7 маятника 8. В зависимости от усилия кручения маятник 8 отклоняется на тот или иной угол, величина которого отсчитывается на шкале 9, и также и на шкале 11 (точный отсчет с нониусом). Детали 12—14

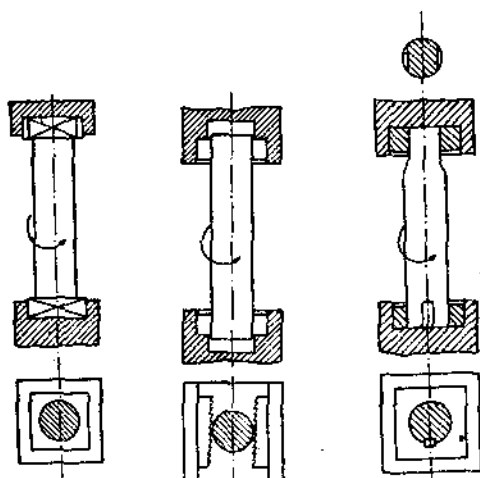


Рис. 235.

Рис. 236.

Рис. 237.

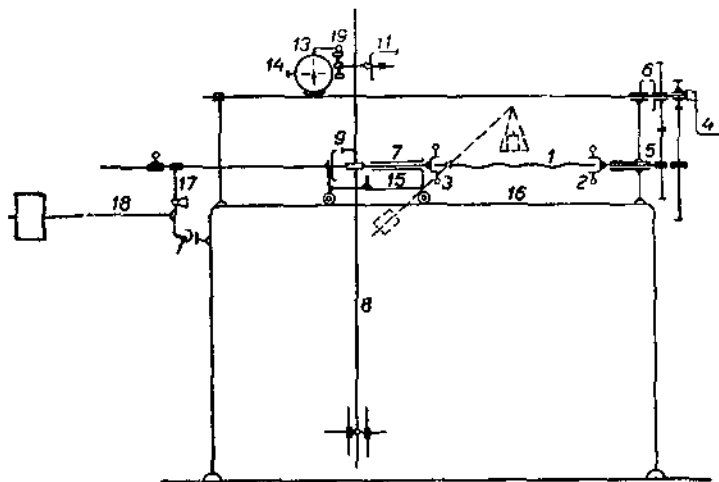


Рис. 238.

являются частями самопишущего прибора. Маятник и самопишущий прибор установлены на тележках, которые могут передвигаться вдоль станины станка. Нагруженный рычаг 18 помощью рычага 17 втягивает с требуемым усилием испытуемый образец.

При испытании на кручение определяют угол кручения γ при ступенькообразном увеличении крутящего момента M_d .

При этом в случае материалов с неизменяющимся удельным сдвигом β находят сначала напряжение τ , пропорциональное сдвигу γ , и далее предел пропорциональности, предел кручения, соответственный пределу текучести и пределу изгиба, и наконец разрушающее усилие, выраженные в напряжениях τ и соответственных изменениях формы γ , отнесенные к расстоянию слоев друг от друга, равному единице, и расстоянию волокна от оси кручения $r=1$.

Удельный сдвиг 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:

$$\varphi_1 = \frac{2\beta}{\pi} \cdot \frac{M_d}{r^4} l.$$

Срез. Сопротивление срезанию τ_s — это то сопротивление, которое оказывает тело сдвигу своих частей, в какой-либо из плоскостей. Испытание материалов на срез производится так же, как и 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. 239, пользуясь при этом захватами, подобными изображенным на рис. 240.

Испытуемый образец 4 вложен в закаленные стальные кольца 1, 2, 3. Направление действия сил указано стрелками на рис. 239.

Обозначая через f — площадь поперечного сечения бруска и p — срезающее усилие, можно для этого случая написать, что напряжение срезывания:

$$\tau_0 = \frac{p}{2f}.$$

Однако и при таком устройстве зажимов трудно избежать изгибающих напряжений. Точно подсчитать эти добавочные напряжения не представляется возможным. Кроме того для точного подсчета

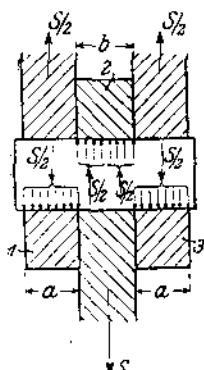


Рис. 239.

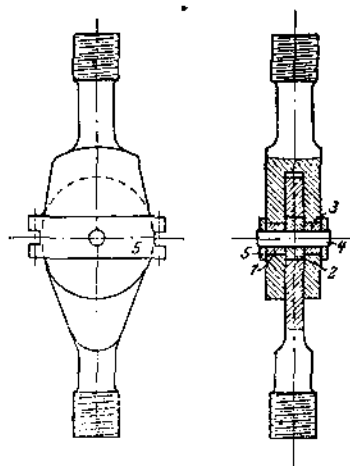


Рис. 240.

необходимо также принять во внимание трение на опорах и влияние его на распределение напряжений.

Если же не принимать во внимание трение и предположить, что силы распределяются равномерно в пределах a и b , то можно для изгибающего момента написать:

$$M_b = \frac{p}{2} \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{2} \right) - \frac{p}{2} \cdot \frac{b}{4} = \frac{p}{4} \left(a + \frac{b}{2} \right).$$

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.

2. Испытание динамической нагрузкой.

а) **Растяжение и сжатие.** Как показала практика, испытание материалов статической нагрузкой не является всегда 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 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 приеме 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 наковальной, а с другой — принимают удар бабы и передают его бруску.

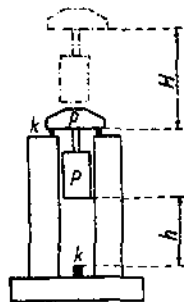


Рис. 241.

Наиболее удачно разрешил эту задачу Н. Н. Давиденков.¹ Предложенная им схема устройства изображена на рис. 241. 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.

Действием падающей нижней бабы P образец разрывается, и деформация нижнего калиброванного крешера k учитывает неизрасходованную работу нижней бабы. Работа, затраченная на разрыв образца, будет равна:

$$T = P(H + h) + \rho H - N_1 - N_2,$$

где ρ — вес верхней бабы,
 P — „ нижней „
 H — высота падения верхней бабы,
 $H + h$ — „ „ нижней „
 N_1 и N_2 — работы деформации верхних и нижних крешеров.

¹ Н. Н. Давиденков, Динамические испытания металла, стр. 35, ГИЗ, 1929.

Значительно проще производить испытание материалов динамической нагрузкой на сжатие. В этом случае пропадают промежуточные звенья механизма, и удар падающей бабы воспринимается полностью испытуемым 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:

$$a = \frac{gh}{i} \left(\frac{\text{кгсм}}{\text{см}^3} \right)$$

$$a' = \frac{gh}{g} \left(\frac{\text{кг см}}{\text{г}} \right),$$

где i — объем испытуемого тела в см^3 ,

g — вес испытуемого тела в граммах.

Если тело подвергалось нескольким ударом, 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. в процентах:

$$\delta = \frac{\lambda}{l} 100.$$

При испытании несколькими ударами деформация выразится суммой отдельных деформаций, тогда в процентах:

$$\delta = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots \lambda_n}{l} \cdot 100.$$

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 Charpy, создав

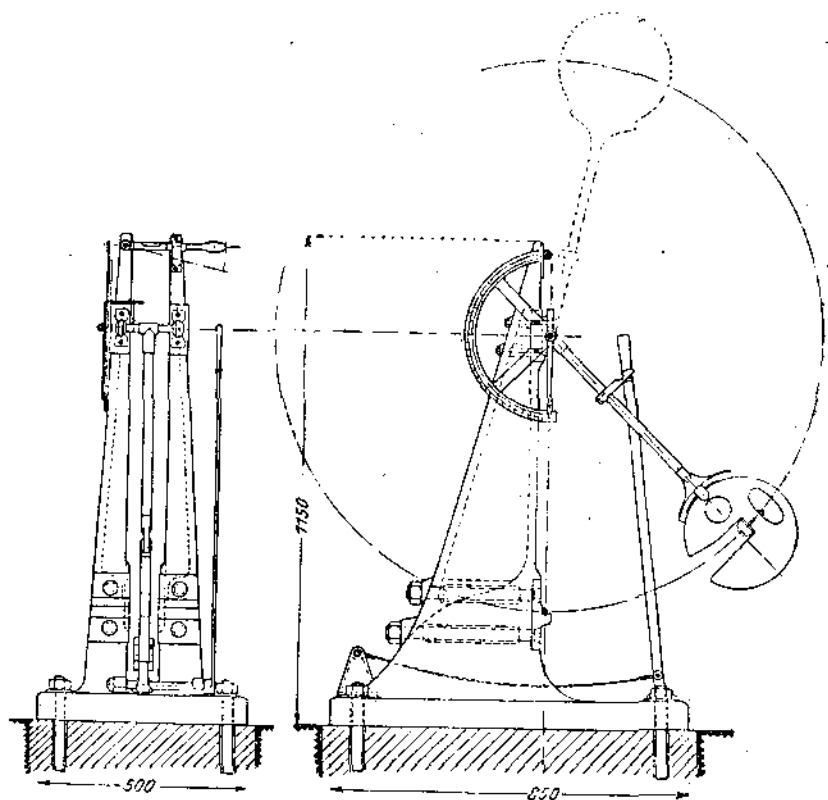


Рис. 242.

весьма упрощенной конструкции маятниковый копер. Этот прибор разрушает образец одним ударом, и работа, потраченная на разрушение, учитывается довольно точно.

На рис. 242 представлен маятниковый копер на 10 к.м. Схема работы такого копра изображена на рис. 243. 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 W_1 пойдет на разрушение образца, оставшаяся же часть израсходуется на подъем маятника на высоту h_2 , и эта работа равна:

$$A_2 = Gh_2,$$

где

$$h_0 = l(1 - \cos \alpha_0).$$

Работа, потраченная на разрушение образца, определится как разность:

$$A = A_1 - A_2 = G(h_1 - h_2) = G[\cos(180 - \alpha_1) - \cos \alpha_1] \text{ км.}$$

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

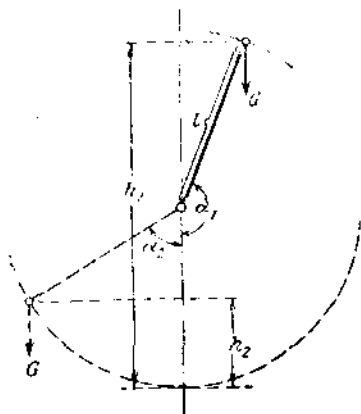


Рис. 243.

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.

Образец устанавливается на копре так, как указано на рис. 244, образуя балку на двух опорах. Удар приходится посредине образца (направление указано стрелкой *P*). Необходимо следить, чтобы образец плотно прилегал к поверхности опоры.

Подобные копры изготавливаются различной мощности. Наиболее распространенными являются копры на 250 кг, 75 кг, 25 кг и 10 кг; 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. 244 представлен наиболее распространенный образец, так называемый малый образец Charpy. Прорезь получается сверловкой образца и последующей затем над-

¹ См. например P. Fischer, Stahl und Eisen, стр. 541, 1928.

пиловкой. На рис. 245 представлены другие типы образцов, также имеющие большое распространение. Из них видно, что расстояние между опорами меняется от 120 мм 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, чтобы результаты испытаний различных лабораторий можно было сравнивать между собой.

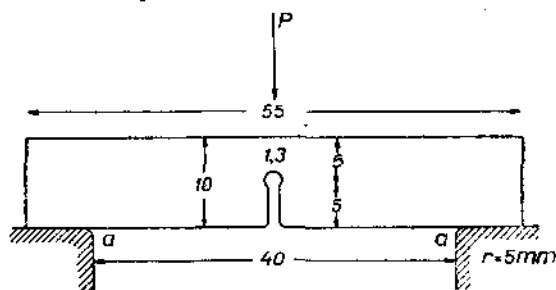


Рис. 244.

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. 245, 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, которые имеют меньшую длину, следовательно образцы с расстоянием между опорами в 40 мм.

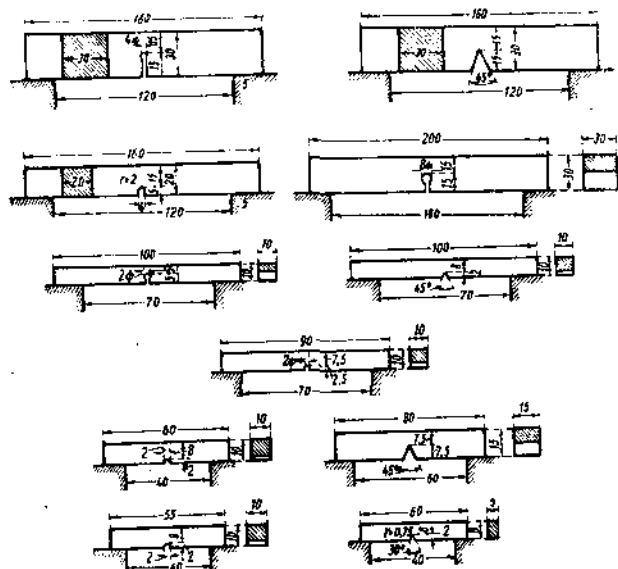


Рис. 245.

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 прорезью. В последних состояние режущих кромок инструмента, при помощи которых вырезают прорези, будет, конечно, играть

решающую роль. Притупленный инструмент будет измерять радиус закругления прорези, 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 отступления 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 кж, затраченную на разрушение образца, делят на площадь сечения образца S см². Таким образом получается значение работы a , кж/см², приходящейся на 1 см² сечения образца, т. е.

$$a, \frac{\text{кж}}{\text{см}^2} = \frac{A \text{ кж}}{S \text{ см}^2}.$$

Однако совершенно недавно М. Moser¹ 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.

$$a \frac{\text{кж}}{\text{см}^3} = \frac{A \text{ кж}}{v \text{ см}^3}.$$

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.

¹ Stahl u. Eisen, № 29, стр. 935—946, 1923.

В зависимости от формы образца и скорости удара, а также и от природы материала, испытываемый образец может или быстро деформироваться, быстро изменяя свою форму, или же сравнительно медленно. Быстрота, с которой металл изменяет свою форму при ударе, называется рабочей скоростью. Чем больше рабочая скорость, тем больший объем воспринимает работу удара и тем больше требуется 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 Чаггу. Далее нужно приготовить из каждого сорта стали по два образца, один сечением по месту надреза $S' = 15 \times 15$ мм, другой более широкий $S'' = 30 \times 15$ мм. При диаметре цилиндрического надреза в 4 мм рабочий объем первого равен:

$$v' = 63 \text{ см}^3,$$

и второго:

$$v'' = 12,5 \text{ см}^3.$$

Допустим, что сталь A дала работу удара:

$$\text{для I образца } A' = 32 \text{ к.м.}$$

тогда:

$$a' = \frac{32}{6,3} = 5,2 \text{ к.м./см}^3$$

$$\text{для II образца } A'' = 62,5 \text{ к.м.}$$

и

$$a'' = \frac{62,5}{12,5} = 5,0 \text{ к.м./см}^3$$

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 B :

$$\begin{array}{l} A' = 80 \text{ к.м.} \\ A'' = 100 \text{ „} \end{array} \left| \begin{array}{l} a' = \frac{80}{6,3} = 12,7 \text{ к.м./см}^3 \\ a'' = \frac{100}{12,5} = 8,0 \text{ „} \end{array} \right| \frac{a''}{a'} \cdot 100 = \frac{8,0}{12,7} \cdot 100 = 63\%,$$

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.

3. Испытание на усталость.

В вышеописанных способах испытания образцов 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 крупных дефектов, и причину таких поломок объясняют усталостью материала.

Нагрузка, вызывающая усталость материала, лежит часто ниже предела упругости, и характер действия ее — от нуля до некоторого максимального значения или же меняющийся от — максимума до + максимума. Меняющаяся 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 Wöhler'a,¹ вслед за которым испытанием материалов на усталость начали заниматься Bauschinger, Spragenberg² и другие.

Число работ, произведенных в этой области, чрезвычайно велико, но, ввиду сложности такого испытания и необходимости учесть целый 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 на очередь.

¹ Zeitschr. f. Bauwesen, S. 583 1860; S. 233 1863; S. 67 1866; S. 73 1870.

² До Wöhler'a вопросом об усталости материалов занимались Albert (1829) и Hodgkinson (1847), однако их работы не носили столь систематического и обширного характера, как работы Wöhler'a.

К. Mailander¹ дал весьма интересный и ценный обзор работ и достижений в области испытания материалов на усталость, произведенных вплоть до конца 1923 г. Более поздние работы описаны Н. Давиденковым.²

В целом ряде вопросов не достигнуто еще общего взгляда, но все же результаты многочисленных исследований позволяют сделать некоторые весьма существенные заключения. Прежде всего интересны работы, в результате которых старались выяснить процесс разрушения материалов от усталости. Как известно, 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. 246 представлен излом усталого металла от действия, происходившего в одном направлении. На рис. 247 и 248 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.

Процесс разрушения при действии сил в переменном направлении по последним данным, подтверждаемым микроанализом, протекает в следующем порядке.³

Первоначально на отдельных зернах металла, состоящих из ряда маленьких кристалликов (Stead), получается ряд линий скольжения, характеризующих собой перемещение этих кристалликов в отношении друг к другу; количество этих линий постепенно увеличивается, образуя компактные скопления. Линии скольжения образуются не на всех зернах металла, а лишь на некоторых в зависимости от их ориентировки, которая обуславливает различную восприимчивость к сдвигам.



Рис. 246.



Рис. 247.



Рис. 248.

¹ Stahl und Eisen № 21, стр. 585—591, 1924; № 22, стр. 624—29; № 23, стр. 657—61; № 24, стр. 684—91; № 25, стр. 791—25; в конце статьи богатый указатель литературы по данному вопросу (приведено 225 названий).

² Техника и производство № 6, стр. 25—37, 1925.

³ Gough и Hanson, Proc. Royal Soc. Vol. 104, стр. 538, 1923.

Появление линий скольжения не всегда ведет к разрушению металла и может пройти и без всякого вреда. По теории Веилбу усталость материалов сопровождается образованием вдоль поверхностей скольжения аморфного вещества, которое в твердом состоянии обладает большой жесткостью и хрупкостью (как стекло). В результате в местах появления линий скольжения материал становится более жестким, и если напряжения не слишком высоки, то разрушение материала остановится, и полученные деформации останутся безвредными. В противном же случае число пораженных зерен будет увеличиваться, а вместе с этим материал будет постепенно терять способность к пластическим деформациям. В результате появится трещина, распространение которой будет способствовать концентрации энергии вдоль ее краев, что приведет в конце концов к разрушению металла.

При испытании материалов на усталость пользуются теми же видами нагрузок, как и при статическом испытании. Наиболее же распространенным видом является испытание изгибающей и растягивающей нагрузками, меняющими свое направление. В результате такого испытания стремятся найти ту нагрузку, которая при достаточно

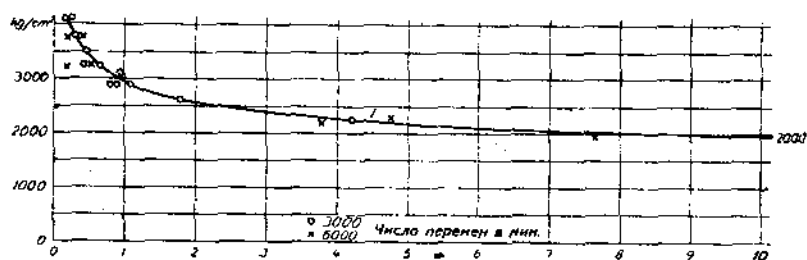


Рис. 249.

большом числе перемен не вызывает поломку материала. Такая нагрузка называется пределом усталости.

На рис. 249 представлена кривая изменения предела усталости 5% никелевой стали.¹ Сталь при статическом испытании на растяжение имела предел упругости около 50 кг на мм². При испытании на усталость переменной нагрузкой с частотой 3000 (кружок) и 6000 (крестик) перемен в минуту предел усталости определился около 20 кг на мм². При такой нагрузке материал выдерживал свыше 10 миллионов перемен. Однако из этого примера видно, что нахождение предела усталости является довольно кропотливой работой, требующей, во-первых, много материала для изготовления образцов, что не всегда выполнимо, и, во-вторых, много времени для производства испытания (например для 10 миллионов перемен при 1000 перемен в минуту испытание длится непрерывно свыше недели). 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.

¹ O. Lasche, Konstruktion und Material im Bau von Dampfturbinen und Turbodynamos.

Первым решением этого вопроса было увеличение числа перемен нагрузок в минуту. В первоначальных опытах Wöhler'a они не превышали 40—60; в опытах O. Lasche и Hopkinson'a число перемен доходит уже до 6000—7000 в минуту, и наконец Дженкин,¹ 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 большой частотой нагрузок, а необходимо выбрать число перемен в 1 минуту сообразно с характером службы той детали, которая будет изготовлена из испытываемого материала.

Gough² предложил для ускорения времени испытания на усталость изготовлять пробный образец просверленным в виде цилиндра. В этом случае кривая $\delta-n$ (рис. 249) ложится при меньшем n , но, как показали работы Mason'a,³ при этом происходит увеличение предела усталости.

Весьма точно и быстро определяется предел усталости тепловым методом, предложенным Stromeyer'ом. Этот метод неоднократно проверялся целым рядом исследователей (Gough, H. Moore, M. Jasper, Lea F. C. и др.), результаты которых довольно хорошо совпадают. Метод заключается в следующем: испытываемый брусок подвергают переменной нагрузке, увеличивающейся ступенчато, и при этом измеряется температура образца. Первоначальное нагревание образца до определенной нагрузки незначительное; после же, при незначительном увеличении напряжения температура сильно повышается. Эта нагрузка очень близко совпадает с пределом усталости, найденным прямым испытанием.

Выделение теплоты в образце, испытываемом переменной нагрузкой, объясняется петлей гистерезиса, получаемой на протяжении одного цикла. Площадь петли гистерезиса будет пропорциональна выделившейся теплоте. Gough предполагает существование двойного рода петель гистерезиса: чисто упругих, безвредных для материала, и полупругих, сопровождающихся появлением внутри кристаллических 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.

Smith⁴ 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.

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.

Методы Stromeayer'a и Smith'a в значительной степени сокращают время испытания материала на усталость, а упрощение в аппаратуре 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 пропорциональности. По данным Моога, 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 и других механических свойств, хотя опять-таки строгой зависимости здесь не найдено. Весьма интересны данные, полученные при изучении влияния холодной обработки на предел усталости. Известно, что наклепанный материал обладает большей жесткостью и имеет более повышенный предел текучести. В отношении же предела усталости пришли к таким заключениям, что при статическом наклепе усилием, превышающим предел усталости, но не выходящим за предел пропорциональности, изменение сопротивления усталости не наблюдается; в случае же перехода предела пропорциональности начинается заметное повышение предела усталости.

Из всего вышесказанного 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 позволяли 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 те средства, которые начинают отпускаться для исследования в этой области отдельным комиссиям (Моог, Америка), и тот широкий масштаб, с которым начаты эти работы.

4. Машины для испытания усталости металлов.

а) Машина, работающая на изгиб. Конструкция этих машин весьма разнообразна. Мы ограничимся здесь кратким описанием лишь двух машин, изготовляемых фирмой К. Шенк в Дармштате¹ 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. 250, состоит из двух неподвижных подшипников, связанных посредством тяг с ры-

¹ E. Lehr. Diss. TH, Stuttgart 1925.

чажной системы, по которой движется груз $G=10$ кг. Для того чтобы вся система в момент начала опыта находилась в равновесии, с противоположной стороны приложен противовес. 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 формулам изгибающий момент, деление которого на момент сопротивления сечения дает нам искомое напряжение в крайнем волокне.

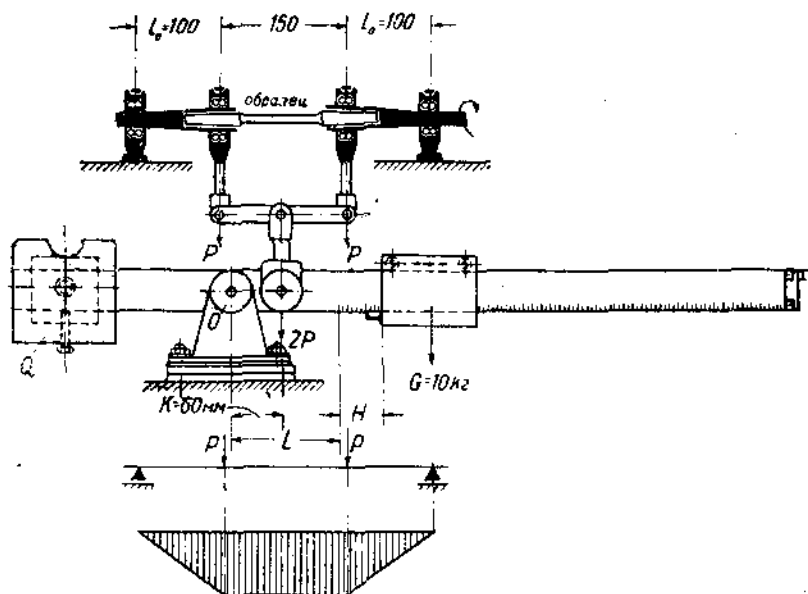


Рис. 250.

Первоначально определяем силу P , составив предварительно уравнение моментов сил, приложенных к рычагу, относительно точки O .

$$2PK - G(H + L) + Ql = 0$$

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 $l_0 = 10$ 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

$$\sigma_u = \frac{M}{W} = \frac{100}{6 \cdot 0,0417} L.$$

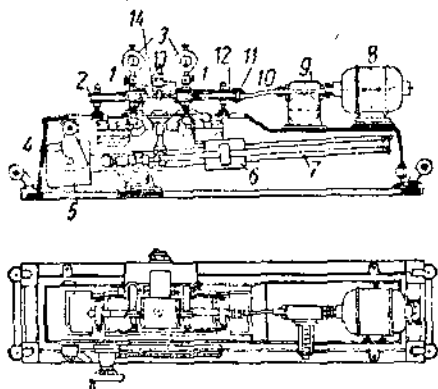


Рис. 251.

Переходя к устройству машины Шенка, проследим, каким образом передается вращение испытываемому образцу. Постоянный ток из сети с напряжением в 110 вольт вращает нижний мотор, соединенный посредством муфты с генератором, дающим постоянный ток в 220 вольт верхнему свободно подвешенному на двух опорах мотору в 0,25 л. с., снабженному шкалой, по которой ведутся отсчеты крутящего момента (рис. 251).

Верхний мотор 8 с присоединенным к нему счетчиком оборотов 9 передает вращение посредством гибкого вала 10 конусным зажимам 12, в которых и закреплен образец 14 при помощи двух винтов 2.

Вся эта система (образец и конусные зажимы) представляет собой свободно лежащую балку на двух опорах. При закладывании образца, что является вообще довольно сложной задачей, требующей большой сноровки и опыта, необходимо следить по индикаторам 3, чтобы образец не был 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 заложенного образца, что в свою очередь сказывается на точности определения предела усталости.

Нагрузка прикладывается на два свободные шариковые подшипника 1 и передается системой рычагов от груза 6, передвижение которого вдоль рычага 7 позволяет изменять нагрузку, передаваемую на образец. Груз 5 является противогрузом, который арретируется захватом 4.

При помощи термопары, надетой на образец, измеряется температура образца, индикаторы 3 указывают прогиб образца при различной нагрузке; а амперметр, как и шкала педальмотора, позволяют определить мощность, затрачиваемую на вращение образца при различной нагрузке. Эти устройства позволяют с большой точностью определять предел усталости за сравнительно короткий промежуток времени. Все эти четыре величины: температура, стрела прогиба, крутящий момент педальмотора и сила тока, потребляемая мотором, фиксируются через определенный промежуток времени, например 5 или 10 минут. Отсчитав эти величины, увеличивают нагрузку на образец на 1—2 кг/мм² и опять через 5—10 минут производят запись показания приборов. По этим записям строятся четыре кривые, указанные на рис. 252, по которым и определяют предел усталости. Как видно из кривых, до предела усталости мы всюду имеем прямолинейный участок или во всяком случае близкий к прямолинейному. Переход за предел усталости совпадает с отклонением этих линий от прямой. Нужно однако отметить, что различные материалы разное реагируют на точки перегибов. Поэтому, если производить это испытание наблюдая лишь за одним фактором, например за стрелой 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 почти совпадающим с таковым, определенным классическим прибором Велера.

А. Ефремов и И. Одинг¹ производили параллельное определение предела усталости на этой машине как методом Велера, так и быстрыми способами. Результаты этих испытаний сведены в табл. XIII (стр. 208).

Для испытания классическим способом нужно было иметь 6 образцов, которые в сумме требовали 20 миллионов перемен. Машина работала на 3000 об./мин., и испытание всех десяти материалов потребовало около 1200 часов. Для испытания быстрым методом брались два образца, которые можно было испытать в течение 8 часов. Таким образом все десять материалов потребовали 80 часов.

Легко видеть из таблицы, что результаты быстрого метода весьма близко совпадают с результатами классического метода, и это обстоятельство заставляет конечно широко пользоваться быстрым методом.

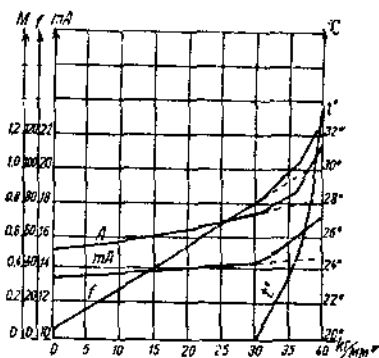


Рис. 252.

¹ Вестн. Металлопромышл. (1931) № 10.

ТАБЛИЦА XIII
Результаты испытания на усталость.
(А. Ефремов и И. Одинг)

№ образ- цов	Материал	Предел усталости кг/мм ²		Предел про- порцион. кг/мм ²	Предел текучести кг/мм ²	Бр. сопр. разрыву кг/мм ²	Удлине- ние %	Сужение площади %
		по Велеру	быстрым методом					
1	Сталь 50 П	23,6	24,0	28,3	31,1	57,3	21,9	44
2	" 50 Н	19,0	18,8	26,5	34,0	58,7	23,6	49
3	" 53 П	34,5	34,5	51,3	—	74,6	17,7	56
4	" 53 Н	35,8	36,0	47,5	—	74,6	17,9	49
5	Сталь 93	23,5	23,5	26,1	29,0	61,2	24,8	56
6	" 9 П	26,0	27,0	29,0	—	83,0	10,0	13
7	Роторная сталь Б	31,5	34,0	38,2	39,5	68,2	10,4	39
8	Роторная сталь III 1	23,0	25,0	22,9	26,1	52,3	22,7	51
9	Роторная сталь III 2	24,0	24,1	23,0	26,8	52,5	21,4	54
10	Красная медь	8,0	8,0	7,0	—	20,6	31,9	67

В литературе имеется много указаний о неточности быстрых методов. Если пользоваться лишь отдельным каким-либо из перечисленных способов, например температурным, то действительно получается много несогласованности. В вышеуказанных же испытаниях предел усталости определялся или как арифметическое среднее из четырех кривых или же по данным трех кривых, если все три дают одно показание.

Кроме того на результаты испытания сильно влияет состояние машины. Загрязненность коллектора мотора, неудовлетворительное состояние подшипников, малая или обильная смазка — сильно искажают кривые мощности; неудовлетворительное состояние термпары и ее контактов также дает искажающие результаты кривой температуры, как и неплотное закрепление образца в захватах машины искажает кривую прогиба. Поэтому, если во время испытания замечается малейшее отступление в правильной работе какой-либо детали или аппарата, то как правило испытание необходимо тотчас же прервать и исправить дефект. Внимательный уход за машиной гарантирует получение вполне удовлетворительных результатов, которые позволяют просто и точно определять предел усталости.

б) Машина, работающая на растяжение — сжатие. Наиболее удачную конструкцию машины для испытания материалов на усталость попеременно растягивающей и сжимающей нагрузкой предложила фирма Е. Шенк в Дармштадте.¹ 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 де-

¹ Engg. London, Bd. 122, p. 722/24 1926; E. Lehr, Diss., T. H., Stuttgart p. 67/80, 1925; K. Memmler und K. Laute, Forschungsarbeiten, V. D. J., Heft 329.

формацию в образце, и механизм, измеряющий эту деформацию. Первый представляет собой систему масс, приводимых в колебание переменным током 500 периодов в секунду. 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. 253). Последняя связана с массой m_2 сильной пружиной c и с массой m_3 образцом c_p . Так как массы m_2 и m_3 примерно в десять раз больше массы m_1 , а сила упругости постоянной пружины c также больше таковой образца c_p , 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_1 таким образом, чтобы собственное число колебаний всей системы было равно примерно 500 периодов в секунду.

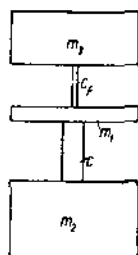


Рис. 253.

На рис. 254 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.

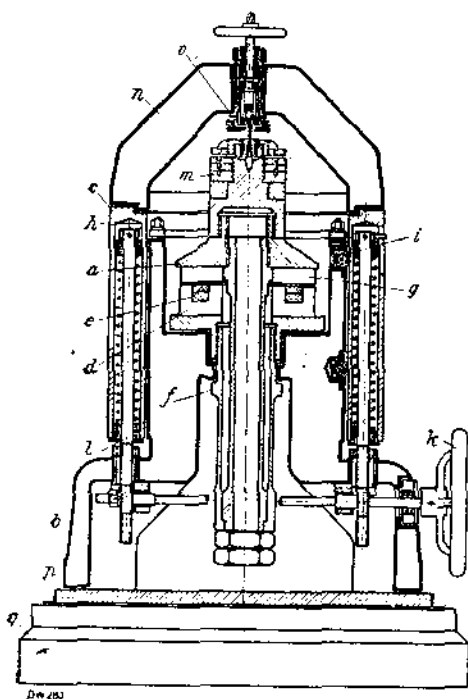


Рис. 254.

На рис. 255 изображена электрическая схема приводного механизма. Мотор d приводит во вращение генератор высокой частоты a и постоянного тока b . В цепь высокочастотного тока (500 периодов в секунду) включается конденсатор e , ваттметр f и обмотка электромагнита, приводящего в колебание массу m_1 .

Цепь постоянного тока (40 вольт) 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_1 или, что то же самое, амплитуда деформации испытуемого образца.

Величина амплитуды деформации образца измеряется по схеме, изображенной на рис. 256. Это устройство позволяет производить

отсчеты в отдалении от машины, так как при работе машина издает сильный и пронзительный звук.

Пластина массы m_1 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.

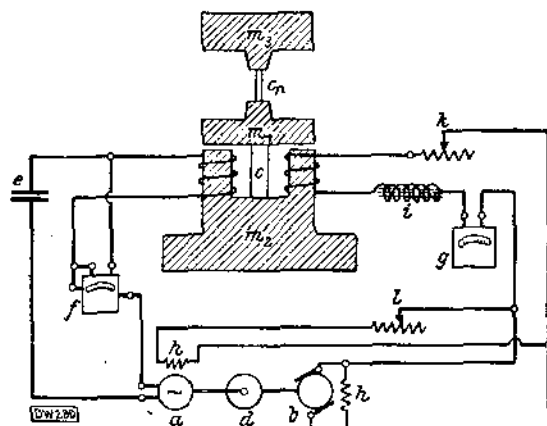


Рис. 255.

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

Число перемен нагрузки на образце подсчитывается из числа оборотов электромотора приводного механизма. На случай поломки образца предусмотрено реле, которое останавливает всю машину.

в) Машина для испытания ударной усталости. Весьма сильно распространены машины, испытывающие усталость металлов при действии ударной нагрузки. Машины эти

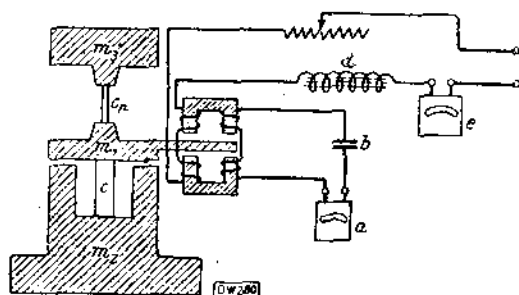


Рис. 256.

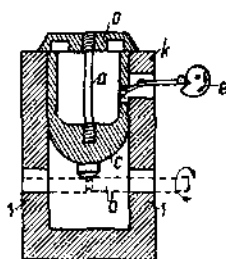


Рис. 257.

лишь качественно о достоинстве материала и не дают еще возможности практически использовать количественные данные. Одна из машин для испытания металлов на ударную усталость изображена на рис. 257. Образец может испытываться как на растяжение, так и на изгиб.

При испытании на изгиб обычно применяется образец с выточкой; он устанавливается на двух опорах, в которых после каждого удара поворачивается на некоторый угол специальным крановым механизмом.

Падающая баба изгибает образец, а счетчик оборотов регистрирует число ударов, потребное на разрушение образца. Баба подымается эксцентриком. 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 отказываться 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 постоянным и высоту падения и вес бабы. Произведение 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 закрепляется, как видно из рис. 257, одним концом в бабу, а другим в обойму. 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.

5. 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. 258 представлено устройство, которым пользовался А. Е. White.¹

Образец *a* закрепляется в державки *a*₁, которые в свою очередь закреплены в зажимы машины. К образцу прикрепляется аппарат, который позволяет при помощи индикаторов *b* 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 А. Е. White производил разрывы стальных образцов при различной температуре, и большая чувствительность примененных им индикаторов позволяла кроме обычного временного сопротивления с большой точностью определять предел пропорциональности.

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 де-

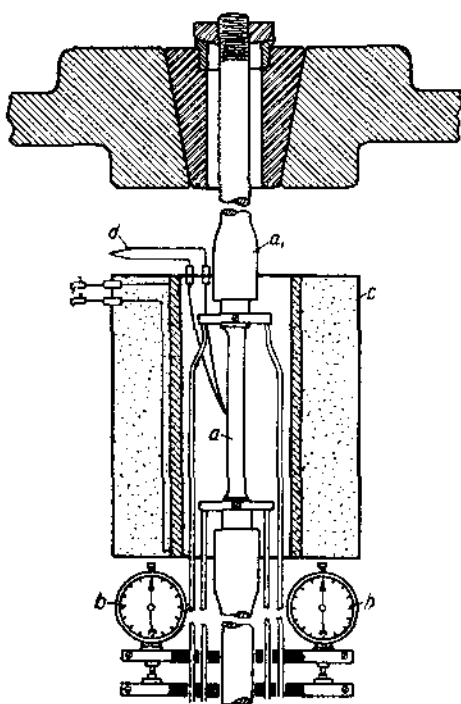


Рис. 258.

формироваться (ползти — creep), причем эта нагрузка может быть в несколько раз меньше предела пропорциональности для данной температуры.

Welter² 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 сло-

¹ International congress for testing materials, p. 431, Amsterdam 1927.

² Zeitschr. f. Metallkunde, S. 75 u. 111, 1926.

мался через день, при 30 кг/мм^2 — через 25, и наконец при нагрузке в 16 кг/мм^2 образец сломался через 110 дней. В течение всего опыта образец непрерывно удлинялся.

В отношении стали, как показал Леа,¹ 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 занимается целый ряд исследователей. В общем задача сейчас сводится к тому, чтобы определить при различной температуре степень (скорость) деформации образцов, подверженных различным нагрузкам, и находить те нагрузки и температуры, при которых материал дает допустимую скорость ползучести.

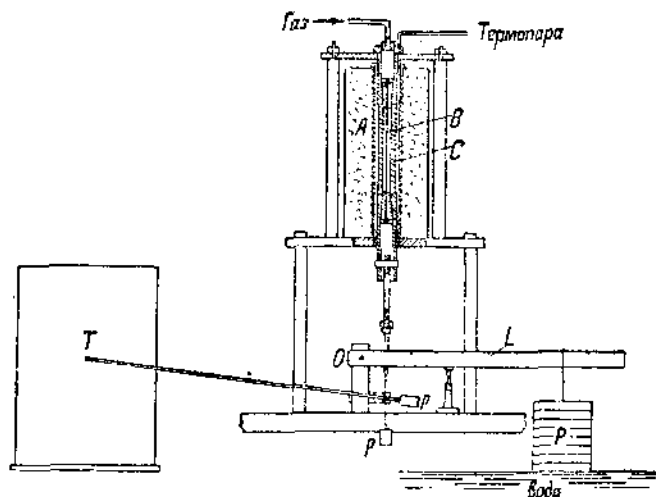


Рис. 259.

На рис. 259 представлена схема устройства для такого испытания, которой пользовались К. Michel и J. Cournot.² 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 *T*, 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 и этим компенсируется уменьшение площади сечения — с уменьшением сечения образца уменьшается нагрузка и следовательно напряжение остается постоянным.

¹ Proc. Inst. Mech. Eng., Decembre 1924; Engineering, 12 and 19 Dec. 1924.

² Internat. Congress for testing materials, S. 397. Amsterdam, 1927.

Общий вид диаграммы, получающейся при таком испытании, изображен на рис. 260. Участок ab соответствует мгновенному и 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.

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:

$$t_1 = 400^\circ \text{ C}$$

$$t_2 = 500^\circ \text{ C}$$

$$t_3 = 600^\circ \text{ C}$$

Для каждой температуры выбираем не менее трех напряжений,

для t_1	σ'_1	σ''_1	σ'''_1
„ t_2	σ'_2	σ''_2	σ'''_2
„ t_3	σ'_3	σ''_3	σ'''_3

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 наносят

на диаграмму рис. 261, в которой по оси ординат отложены напряжения, а по оси абсцисс скорость равномерной ползучести. Эти результаты суть девять точек:

v_1	v_1''	v_1'''
v_2	v_2''	v_2'''
v_3	v_3''	v_3'''

индексы которых соответствуют избранным температурам и напряжениям.

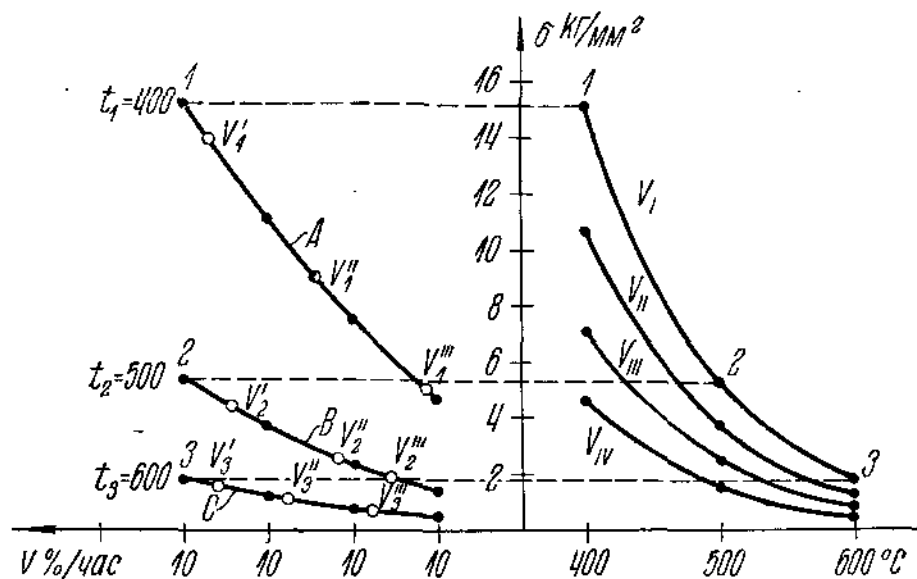


Рис. 261.

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.

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. 261 переносом точек 1, 2, 3. Таким же способом определяются зависимости между σ и t для скоростей v_{II} , v_{III} , 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) температура,
- б) деформация,
- в) нагрузка,
- 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 допустимые пределы

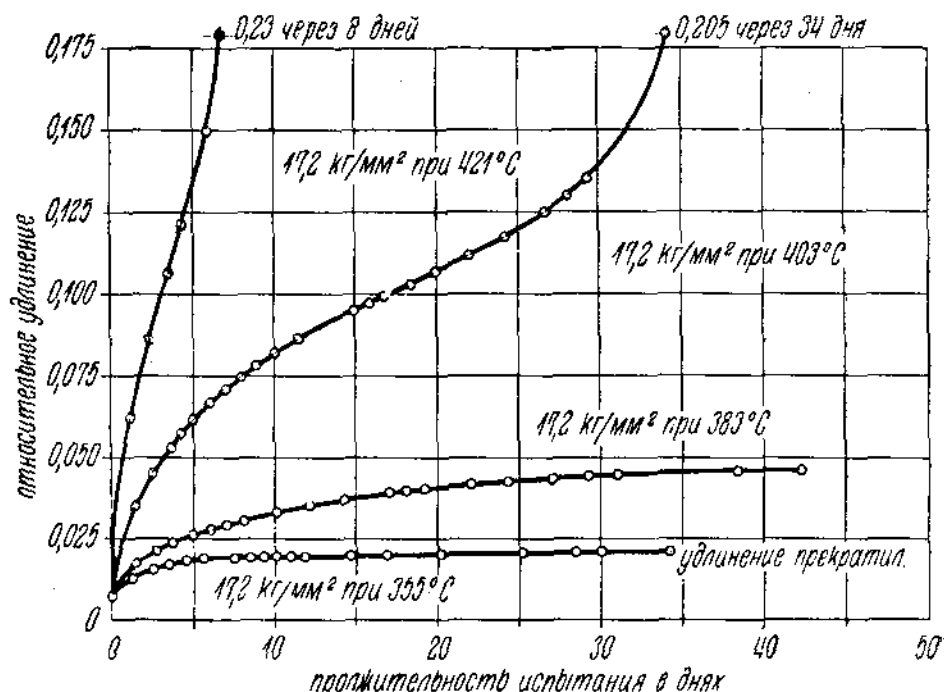


Рис. 262.

колебания. Последний фактор — время, не вызывает затруднений в отношении точности измерений, но заслуживает большое внимание в смысле определения общей длительности испытания одного образца.

Ниже мы рассмотрим значение каждого фактора в отдельности.

а) Температура. Насколько чутко реагирует температура на скорость ползучести, легко видеть из диаграммы рис. 262, в которой воспроизведены четыре кривых ползучести для очень чистого железа армо. Нагрузка для всех образцов избрана в $17,2 \text{ кг/мм}^2$. Легко видеть, что если при $t_1 = 355^\circ$ деформация образца прекратилась после 30—35 дней испытания, то при $t' = 383^\circ$, т. е. всего на 28° выше скорости ползучести, имеет значительную величину. Дальнейшее повышение температуры до $t'' = 403^\circ$, т. е. всего 20° , как и с 403° до 421° вызывает уже чрезвычайно большие изменения в диаграмме

ползучести. Например Р. Бейли⁽³⁾ сообщает, что колебание температуры в течение всего периода испытания могут быть допущено не более $\pm 0,25^\circ\text{C}$ и лишь в этом случае получаются кривые, позволяющие определять скорость равномерной ползучести порядка 10^{-4} — $10^{-6}\%$ /час. Следовательно для этих испытаний нужно предусмотреть весьма точный терморегулятор, учитывающий также и изменение температуры помещения, в котором производится испытание.

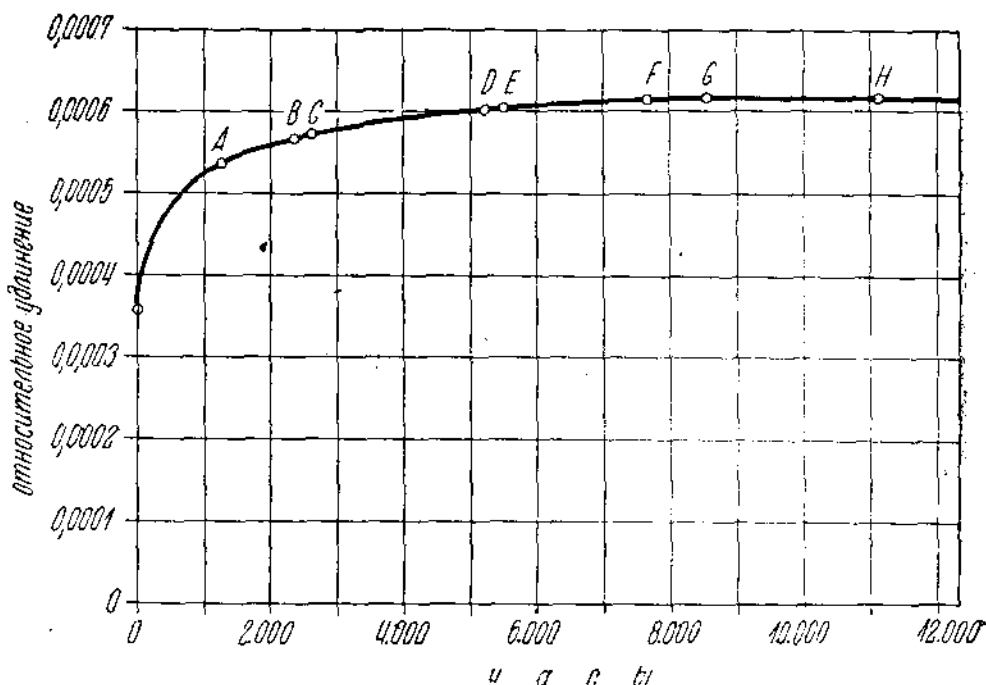


Рис. 263.

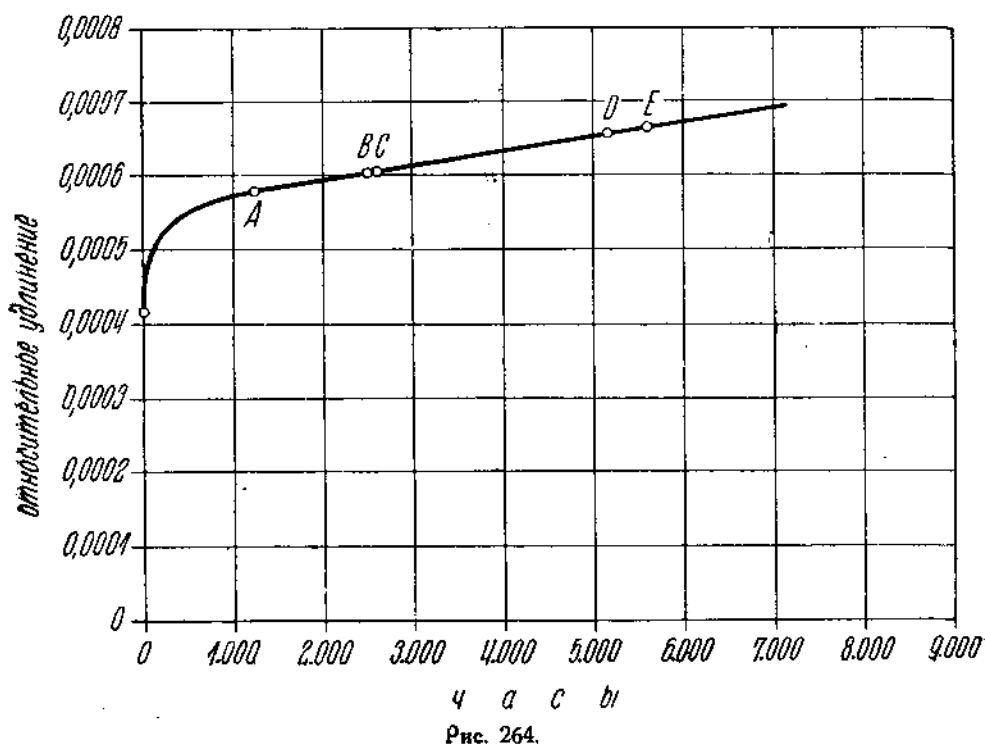
б) Деформация. Для определения скорости ползучести порядка $v = 10^{-6}\%$ /час. на образце с расчетной длиной в 200 мм общая деформация образца в течение 500 часов составит:

$$\Delta l = \frac{10^{-6} \cdot 200 \cdot 500}{100} = 0,001 \text{ мм.}$$

Из этого примера уже ясно, что для измерения ползучести необходимо пользоваться чрезвычайно точными экстенсометрами, позволяющими измерять удлинение образца с точностью 0,0001—0,0005 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 арриетиром с, позволяющим нагружать образец достаточно плавно.

г) **Время.** Этот фактор, не вызывающий каких-либо затруднений в отношении точности измерения, чрезвычайно усложняет и удорожает испытание своей величиной. Длительность испытания ползучести является большим недостатком, с которым все же приходится мириться. Изучая например кривые ползучести, представленные на рис. 263 и 264, легко видеть, что общая длительность испытания



каждого образца доведена до 7000—11000 часов, т. е. занимает в среднем от 0,5—1,0 года. При этом участок равномерной ползучести начинает определяться лишь после 2000—4000 часов. Конечно, такая большая продолжительность требуется для определения весьма малых скоростей ползучести, но такие скорости как раз и представляют наибольший практический интерес.

5. Быстрые методы изучения ползучести металлов

а) **Общев.** Чрезвычайно большое время, требуемое для изучения ползучести металлов способом, изложенным выше, заставило ряд исследователей уделить много времени на отыскание 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 не мудрено: в явлении ползучести наиболее важным фактором является время, и при исключении или при сокращении его теряется в большой сте-

пени ценность испытаний, так как получающиеся результаты исследований не отражают в себе влияния этого важного фактора.

Но все же, несмотря на это, некоторые из быстрых способов изучения прочности металлов при повышенных температурах имеют большое практическое значение: они хотя и не дают точной количественной характеристики сопротивляемости металла механическим силам при повышенных температурах, но 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.

Таким образом удастся сэкономить много времени, не испытывая материалы с малой прочностью при повышенных температурах.

Из многих предложенных методов быстрого изучения ползучести мы рассмотрим только три, заслуживающих с нашей точки зрения наибольшего внимания:

- 1) метод Бейли и Робертса.
- 2) „ Помпа и Дамена
- 3) „ Гадфильда.

б) Метод Бейли и Робертса.¹ Для качественной характеристики металлов при повышенных температурах, эти авторы предложили принимать временное сопротивление разрыву металла, определенного при температуре 550°C и при скорости растяжения равной $0,1\%$ в минуту.

Избранная скорость позволяет в среднем разорвать один образец в течение семи часов. Это время фактически сокращается до 2—3 часов, в течение которых уже определяется максимальная нагрузка на образец — его временное сопротивление разрыву. С точки зрения длительности предложенный метод следует признать удовлетворительным. Напрашивается здесь некоторое уточнение: определять напряжение временного сопротивления разрыву не по первоначальной площадке соответствующей рассматриваемой нагрузки.

Свой выбор температуры в 550°C 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°C . 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.

¹ R. W. Bailey and A. M. Roberts, J. Inst. Mechan. Eng. (Febr. 1932), стр. 1—75.

в) Метод Помпа и Дамена.¹ 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.

Практически эта нагрузка определяется следующим образом (рис. 265). 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 $v_{0,001}$.

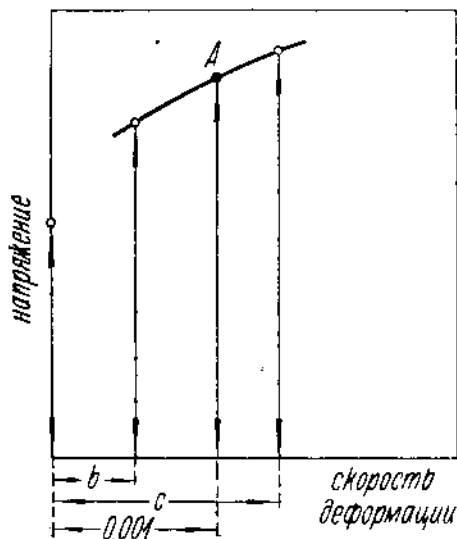


Рис. 265.

Легко видеть, что по первому варианту длительность испытания для одного образца занимает 6 часов, а по второму — 10 часов, вместо 2—3 часов, 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 требует 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 часов. По способу Бейли и Робертса на эту операцию можно расходовать не более 1—2 часов 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 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.

¹ A. Pomp und Dahmen, Mitt. a. d. K.-W. Inst. f. Eisenforschung, vol. 9, № 3, стр. 38 (1927).

² A. Pomp und W. Enders, Stahl und Eisen (1931), № 6.

в) 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 часов 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%, и в последующие 48 часов скорость ползучести, не превышающую $v_2 = 10^{-4} \%/\text{час}$.

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.

¹ Hatfield W. H., J. Iron. and Steel Inst., vol. 117, № 1, стр. 288 (1928).

² Hatfield W. H., J. of Scotland Iron and Steel Inst., vol. 36, стр. 60 (1929).

ГЛАВА ПЯТАЯ.

ИСПЫТАНИЕ ТВЕРДОСТИ.

В отношении испытания твердости еще не установился единый метод. Разнообразие в определениях понятия твердости служит причиной того, что твердость испытывается целым рядом методов, часто не имеющих между собой ничего общего. Число этих методов испытания твердости растет, увеличивая разнообразие и без того уже 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 Бринелля. Наиболее распространен способ Бринелля, согласно которому в испытуемое тело (рис. 266) вдавливается грузом P шарик диаметра D . Такая операция оставит на поверхности испытуемого образца отпечаток — шаровую поверхность диаметром d . Если обозначить площадь шаровой поверхности (лунки) через f_k , число твердости H по Бринелю выразится:

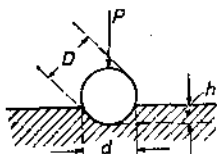


Рис. 266

$$H = \frac{P}{f_k} \text{ (кг на мм}^2\text{)}.$$

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

$$H = \frac{P}{\pi D \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right)}.$$

Метод Бринелля получил чрезвычайно большое распространение. Им широко пользуются при различных исследовательских и приемоч-

ных испытаниях. Германской промышленностью этот метод даже нормализован. Согласно этим нормам: ¹

- а) испытание должно производиться на гладкой плоской поверхности;
- б) расстояние центра отпечатка от края образца или от другого отпечатка надо выбирать так, чтобы не было никаких явлений, влияющих на результат (выпучивание края и т. п.);
- с) нагрузка должна постепенно и без толчков подниматься в течение 15 секунд и держаться на конечной величине 30 сек.; для стали с $H \geq 140 \text{ кг/мм}^2$ достаточно 10 сек.;
- д) диаметр отпечатка d должен измеряться до сотых долей мм;
- е) для некруглых отпечатков для каждого отпечатка берется средний диаметр;
- ф) для характеристики материала необходима средняя величина из двух по крайней мере отпечатков;
- г) в зависимости от толщины и породы испытываемого образца следует применять следующие диаметры шариков и величины нагрузки:

Толщина образца в мм	Диаметр шарика D мм	Нагрузка P кг		
		30 D^2 для чугуна и стали	10 D^2 для твердой меди, латуни, бронзы и т. п.	2,5 D^2 для более мягких материалов
Более 6	10	3000	1000	250
От 6 до 3	5	750	250	62,5
Меньше 3	2,5	187,5	62,5	15,6

Материалом шариков служит закаленная сталь твердости не менее 630 кг/мм^2 .

Шариковая проба теоретически была бы более правильна, если 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, Бринелль 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 вычисленную твердость.

В табл. XVI приведены числа твердости по Бринеллю при нагрузке в 3000 и 500 кг для шарика $d = 10 \text{ мм}$. Весьма большим достоинством метода Бринелля следует считать зависимость между числами твердости H и временным сопротивлением разрыву K_p . Это обстоятельство позволяет при приемочных испытаниях значительно сократить число дорого стоящих испытаний на разрыв, заменив их более простой, дешевой шариковой пробой. Для стали в среднем можно считать:

$$K_p \cong 0,343 H \text{ кг/мм}^2 \text{ при } H > 125$$

и

$$K_p \cong 0,362 H \text{ „ „ } > 175$$

¹ DIN, 1605; см. также DIN „Сталь и железо“, изд. Органеталл, 1926.

ТАБЛИЦА XIV

Числа твердости Бринелля

(Диаметр шарика $D = 10$ мм)

Диаметр пятна в мм	Поверх- ность пятна в мм	Число твердости в кг на 1 мм ² при нагрузке			Диаметр пятна в мм	Поверх- ность пятна в мм	Число твердости в кг на 1 мм при нагрузке		
		в 3000 кг	в 1000 кг	в 500 кг			в 3000 кг	в 1000 кг	в 500 кг
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
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	8,6478	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	12,7735	235	78	39
2,50	4,9889	600	200	100	4,00	13,1162	228	76	38
2,55	5,1931	578	193	96	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

Диаметр пятна в мм	Поверх- ность пятна в мм ²	Число твердости в кг на 1 мм ² при нагрузке			Диаметр пятна в мм	Поверх- ность пятна в мм ²	Число твердости в кг на 1 мм ² при нагрузке		
		в 3000 кг	в 1000 кг	в 500 кг			в 3000 кг	в 1000 кг	в 500 кг
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
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
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	39,3632	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	41,1832	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	48,8395	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	54,4279	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

Диаметр пятна в мм	Поверх- ность пятна в мм ²	Число твердости в кг на 1 мм ² при нагрузке			Диаметр пятна в мм	Поверх- ность пятна в мм ²	Число твердости в кг на 1 мм ² при нагрузке		
		в 3000 кг	в 1000 кг	в 500 кг			в 3000 кг	в 1000 кг	в 500 кг
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
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

В заключение следует указать, что испытание сплавов, твердость которых близка к твердости самого шарика, не дает точных результатов. Весьма обстоятельное исследование этого вопроса произведено R. Mailander¹ом, который параллельно испытывал твердость металлов помощью шариков различной твердости, начиная с мягких стальных шариков и кончая твердым алмазным шариком. В результате этих исследований R. Mailander пришел к заключению, что, пользуясь стальными закаленными шариками обычной твердости, можно вести испытания над материалами, твердость которых не превышает $H = 420 - 450$ кг на мм². Для особо твердых шариков предел измерения несколько повышается — до $460 - 500$ кг на мм².

Для испытания твердости методом вдавливания имеются специальные машины самых разнообразных конструкций. На рис. 267 изображен весьма распространенный гидравлический пресс шведской фирмы Альфа. Испытуемый образец 5 подводится винтом 3 к шарiku 7. Насосом В накачивают масло в специальный цилиндр, производя этим давление на шарик. Величина давления отсчитывается манометром 16, для проверки которого служат грузы 15.

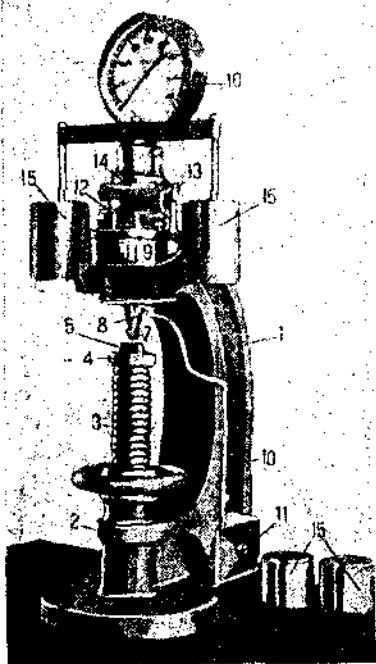


Рис. 267. Пресс фирмы Альфа.

Получается манометром 16, для проверки которого служат грузы 15. Прибор весьма компактен и очень удобен в работе.

¹ Stahl u. Eisen, № 43, 1769/75, 1925.

Ludwik¹ предложил вместо стального шарика вдавливать в испытуемый материал стальной закаленный конус с углом при вершине, равным 90° (рис. 268). Если обозначить через P нагрузку в кг, d — диаметр отпечатка в мм и t — глубину отпечатка в мм, то L — число твердости по Ludwik'у 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 сконструирован ряд небольших переносных приборов, позволяющих измерить твердость крупных отливок и поковок, которые неудобно подводить к прессу, и т. п.

Благодаря таким приборам измерение твердости методом вдавливания получило еще большее распространение, и из стен лаборатории перешло в производственную обстановку — к станкам. Из многочисленных приборов этой группы мы опишем один прибор фирмы Poldihütte.²

Прибор состоит из головки b (рис. 269), винчиваемой в оправку a . Концы c головки b пружинящие, они удерживают стальной шарик f . Внутри оправки вставлены боек g с заплечиком h и спиральная пружина i . В окно d головки b вставляется эталонный стержень e прямоугольного сечения. Твердость стержня известная и равномерная по всему стержню. Если теперь, держа весь прибор в одной руке, подвести шарик к поверхности испытуемого тела и другой рукой нанести удар по бойку g , то на испытуемой поверх-

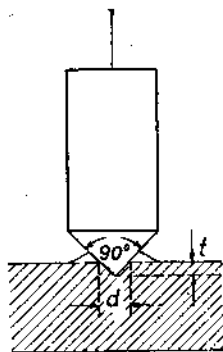


Рис. 268.

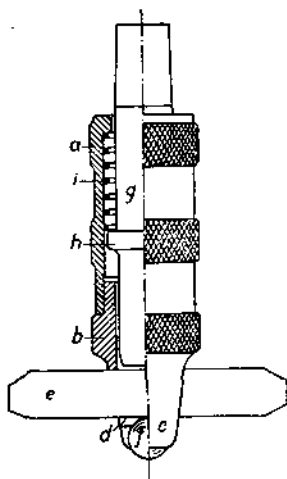


Рис. 269.

¹ Baumaterialienkunde, Н. 8, 9 10, 1907.

² Германский патент № 304732.

ности эталонного стержня e останется 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:

$$H_e f_i = H_i f_e \text{ или } H_i = H_e \frac{f_e}{f_i};$$

здесь: H_i — твердость испытуемого образца;

H_e — твердость эталона (известная);

f_i — площадь лунки на поверхности испытуемого образца;

f_e — площадь лунки на поверхности эталона.

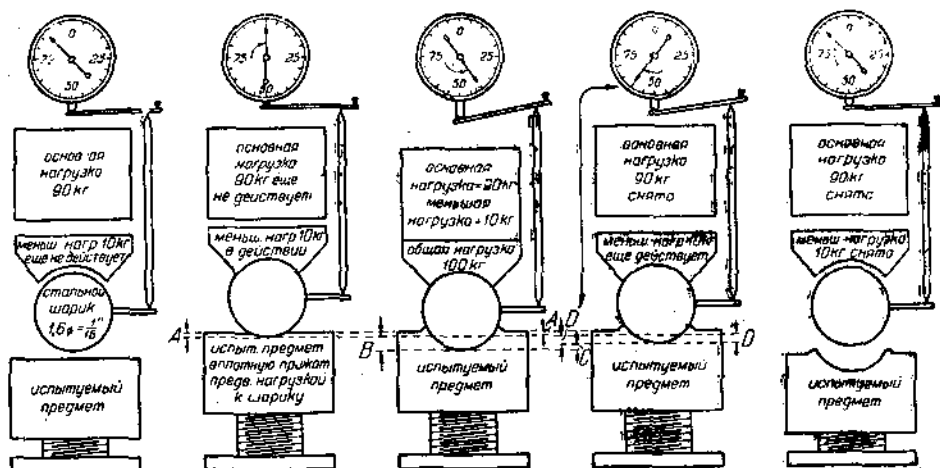


Рис. 270.

Прибор Rockwell'a. За последнее время широкое распространение получил прибор Роквелла, работающий по тому же принципу, как прибор Бринелля, т. е. по принципу проникновения одного тела в другое под действием статической нагрузки. Но в отличие от способа Бринелля здесь измеряется не диаметр и площадь отпечатка, а глубина отпечатка. Прибор Роквелла состоит из неподвижной станины (рис. 270), на которой укреплены индикатор, рычаг с переменным грузом и масляный регулятор, регулирующий плавность приложения силы давления, а также и скорость испытания, и подвижного столика, служащего подставкой для испытуемых образцов.

Индикатор градуирован на две шкалы. Красная B служит для определения твердости мягких материалов с силой давления в 100 кг: посредством стального шарика диаметром в 1,6 мм. Черная C употребляется для более твердых материалов, и стальной шарик заменяется алмазным наконечником, а груз устанавливается в 150 кг.

При записи чисел твердости полагается указать шкалу, с помощью 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 (полож. I и II рис. 270). После этого прикладывают на некоторый промежуток времени нагрузку в 100 и 150 кг (полож. 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 (полож. IV). Затем опусканием столика освобождают тело от нагрузки, причем стрелка приходит в первоначальное положение (полож. V). Продолжительность испытания занимает всего лишь 5—6 секунд. 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.

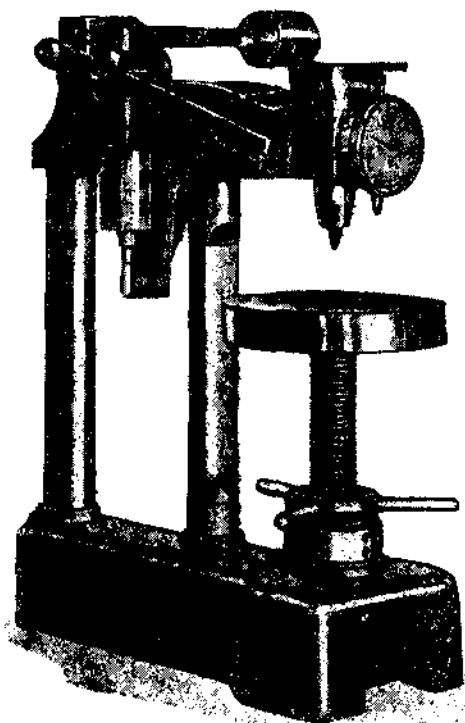


Рис. 271. Прибор Роквелла.

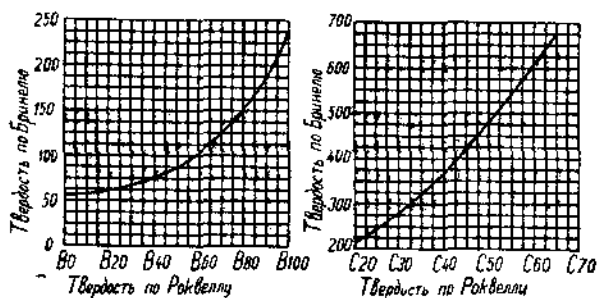


Рис. 272.

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 Бринелля.

Прибор Vickers'a. Прибор Виккерса, с одной стороны, имеет по сравнению с прибором Бринелля то же преимущество, что и прибор Роквелла — вдавливание производится алмазом, и поэтому можно измерять большие твердости. Но, с другой стороны, он лишен недостатка прибора Роквелла, который дает свою шкалу твердости, и последнюю приходится пересчитывать на широко распространенную шкалу Бринелля. Вдавливающий элемент прибора Виккерса представляет собой четырехгранную алмазную призму с углом при вершине в 136° и с немного затупленным концом (рис. 273). Такая призма вдавливается в испытуемый материал нагрузкой от 10 до 100 кг (обычно 50 кг), и величина отпечатка (рис. 274) очень быстро, точно и удобно измеряется при помощи микроскопа, прикрепленного на

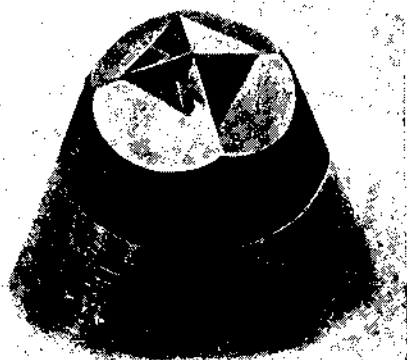


Рис. 273.

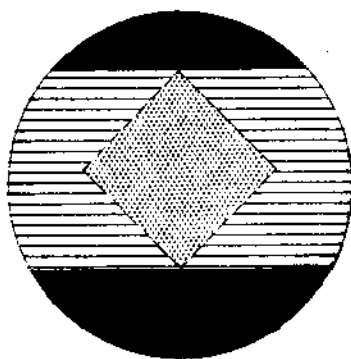


Рис. 274.

шарнире к станине прибора. Прилагаемая к прибору таблица позволяет по величине отпечатка определять число твердости, приведенное эмпирически к числу твердости Бринелля. Небольшая величина вдавливания алмазной пирамиды позволяет на этом приборе определять твердость очень тонких деталей.

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 Mohs'a:

- | | | |
|-----------------------------|---|---------------------------|
| 1. Тальк | } | можно нанести царапины |
| 2. Каменная соль (или гипс) | | ногтем |
| 3. Известковый шпат | } | твердость медной монеты |
| 4. Плавиковый шпат | | твердость железа |
| 5. Апатит | } | твердость оконного стекла |
| 6. Полевой шпат (ортоклаз) | | твердость напильника |
| 7. Кварц | } | царапает стекло |
| 8. Топаз | | } |
| 9. Корунд | | |
| 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 ступени по твердости.

Martens'ом сконструирован прибор, который позволяет производить более точное определение твердости по методу царапания. Прибор состоит (рис. 275) из коромысла 1 с подвешенным грузом 3 и передвижным грузом 6, который позволяет изменять силу давления алмазного острия 2 на поверхность испытуемого тела 5. 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

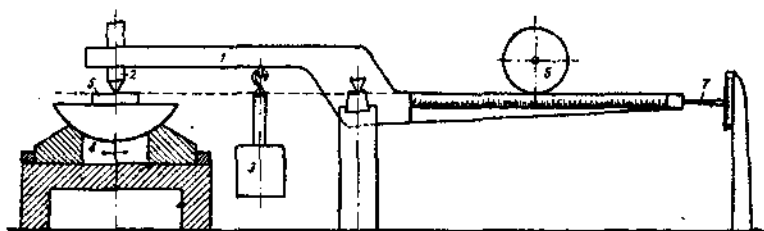


Рис. 275.

навести ряд царапин при различных нагрузках, и затем, измерив их ширину и построив кривую зависимости ширины царапин от нагрузки, легко определить ту нагрузку, которая вызывает царапину требуемой ширины. Для измерения ширины царапины служат специальные микроскопы и приборы.

3. Склероскоп Shore.

Этот прибор был впервые описан в 1907 г.¹ Идея метода его работы заключается в том, что на поверхность испытуемого тела 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 Shore 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.

Проверка твердости закаленных изделий по методу Бринелля 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 твер-

¹ American Machinist, Nov. 1907.

дость, 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.

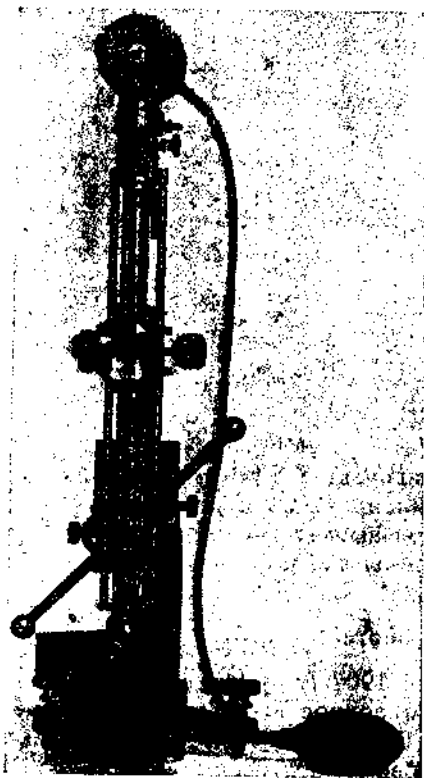


Рис. 276. Склероскоп Шора.

Склероскоп имеет вид, изображенный на рис. 276. Он состоит из градуированной трубки и устроенного 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 до 200 мм высоту.

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 учесть и при испытании после каждого удара передвигать изделие или прибор.

4. Маятниковый прибор Ed. Herbert'a.

За последние годы большое распространение начинает получать новый прибор для определения твердости, сконструированный Гербертом.¹ Прибор представляет собой дугобразный маятник, опорой

¹ Werkstattstechn., № 2, 1924.

которого служит рубиновый или стальной шарик диаметром в 1 мм (рис. 277). Вес всего прибора 2 или 3 кг. Испытуемый предмет закрепляется в специальных тисках, которые позволяют устанавливать испытуемую 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.

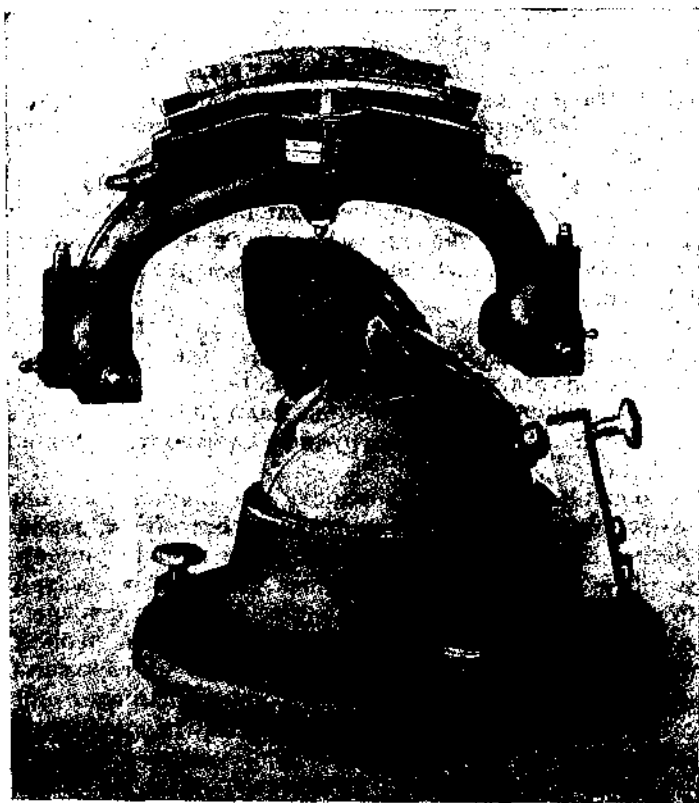


Рис. 277. Прибор Герберта.

Дуговой уровень, укрепленный в верхней части маятника и снабженный делениями, служит для получения отсчетов числа твердости. При помощи маятника Герберта можно определять твердость по пяти нижеизложенным методам:

- 1) метод отпечатка,
- 2) твердость, определенную по отсчетам шкалы,
- 3) способность принимать наклеп,
- 4) затухание колебаний,
- 5) твердость, определенную по времени одного качания.

1-й метод. Весом всего прибора шарик, в зависимости от твердости испытуемого тела, вдавливается в материал и оставляет на нем

отпечаток, по которому судят о твердости образца, как и в способе Бринелля. Таким образом этим прибором можно определять твердость образца по методу шариковой пробы.

2-й метод. За твердость, определенную по углу качания, принимается отсчет шкалы, до которого дойдет пузырек воздуха находящийся в дугообразной трубке, после отклонения маятника из горизонтального положения до 0 и предоставленного самому себе.

3-й метод. Испытание способности принимать наклеп состоит в том, что производят ряд определений твердости одной точки тела, причем после каждого определения наклепывают образец полным качанием маятника так, чтобы пузырек, вышедший из положения равновесия, достигнув начала и конца шкалы, возвратился в свое первоначальное положение. После этого производят вторичное определение и т. д.

По мере того как материал наклепывается, угол взлета увеличивается, приближаясь к определенной величине. Разность между максимальным и минимальным значением Герберт считает характеризующей способность тела принимать наклеп и подвергаться механической обработке (резанию).

4-й метод. Испытание на затухание сводится к определению характера затуханий колебания маятника. Какие же механические свойства определяются этим испытанием, Герберт не указывает.

Все вышесказанные четыре метода мало употребимы на практике. Первый же способ испытания затруднен сложностью точного измерения отпечатка.

5-й метод. Определение твердости по времени качания заключается в следующем. Качание маятника состоит в перекачивании шарика в ямке, сечение которой в плоскости качания имеет больший радиус кривизны, чем радиус шарика. 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 мерилом 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 секундам для стального шарика и 8,8 секундам 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.

ТАБЛИЦА XV.

Сравнение твердости по Роквеллу, Шору и Бринеллю
для сталей по данным Р. Моого.

Роквелл	Шор	Бринелль	Роквелл	Шор	Бринелль
— 6	—	145	30	42	286
— 5	—	146	31	43	294
— 4	—	148	32	44	301
— 3	—	150	33	45	309
— 2	—	152	34	46	318
— 1	—	154	35	47	327
0	—	156	36	48	337
1	—	158	37	50	347
2	—	160	38	51	357
3	—	162	39	52	367
4	—	165	40	53	377
5	—	168	41	54	387
6	—	171	42	56	398
7	—	174	43	57	408
8	28	177	44	58	419
9	29	180	45	59	430
10	29	183	46	61	442
11	29	186	47	62	453
12	29	190	48	63	464
13	30	193	49	65	476
14	30	197	50	66	488
15	30	201	51	67	500
16	31	206	52	69	512
17	32	210	53	70	524
18	32	215	54	71	536
19	33	220	55	73	548
20	33	225	56	74	561
21	34	230	57	76	574
22	35	235	58	77	587
23	36	241	59	78	600
24	36	247	60	80	613
25	37	253	61	81	627
26	38	259	62	82	—
27	39	265	63	84	—
28	40	272	64	—	—
29	41	279	65	—	—

Определение твердости по времени имеет большую зависимость с определением твердости по методу Бринелля, а именно:

$$H = 10 T \quad \text{при } T > 3,33$$

$$H = 0,3 T^2 \quad \text{„ } T < 3,33$$

Роуэр и Schweinitz предложили следующие формулы:

$$H = 10T \quad \text{для } H > 450;$$

$$f = 0,081H + 7,6 \quad \text{для } H < 450.$$

Большим преимуществом маятника является то, что он не оставляет почти никаких следов после испытания и не требует большой площади для испытания, ограничиваясь площадкой в 1 мм.

5. Прибор Kessner'a.

Все вышеописанные методы испытания твердости не дают возможности судить о твердости материала в отношении обработки его резцами. Исключение составляет, может быть, метод определения твердости S по Herbert'y, но этот метод недавно предложен и требует еще проверки и разработки.

Что же касается наиболее распространенного определения твердости по способу Бринелля, то в отношении характеристики обрабатываемости материала резцами этот метод совершенно не согласовывается с числами твердости. Например, твердость по Бринеллю 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 способности того или иного применяемого материала обрабатываться резцами. Обычно с такими запросами обращаются в лабораторию которой часто бывает трудно дать вполне определенный ответ, ибо вопрос о „твердости обработки“ еще далеко не разрешен.

Большим вкладом в разрешение этого сложного вопроса следует считать работу Kessner'a,¹ предложившего характеризовать „твердость обработки“ как способность материала поддаваться сверлению. Для этого Kessner сверлом определенного диаметра, углами резания и т. п., при вполне определенном давлении и числе оборотов сверлит испытуемый материал и мерилom 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 оказывать большие затруднения при обработке его на токарном станке. Ведь

¹ Forschungsarbeiten, № 208, 1918.

свинец, который легко поддается резанию, почти совершенно не поддается обработке на шлифовочных камнях. Кроме того трудность обработки того или иного материала может быть изменена переменной скоростью резания, величины подачи, глубины резания и т. д. Вообще на результат обработки влияет так много факторов (по Тейлору девять факторов,¹ что учесть все их 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. 278). Сверло 25 прижимается к испытуемому образцу 22 помощью постоянного груза 18. Опускание сверла во время работы фиксируется поворотом барабана 10, связанного при помощи гибкой нити 21—19—20 с рычагом 13—14.

Число оборотов сверла регистрируется следующим образом: на шпинделе станка насажено зубчатое колесо 2, сцепленное с зубчаткой 3, которая вращает винт 4. Вращением винта 4 подымается или опускается держалка 5, несущая карандаш. Комбинациями движения в вертикальном направлении карандаша и вращением барабана 10, на который надевается бумага, зарисовываются кривые подобно тем, которые изображены на рис. 279. Нормальный вид

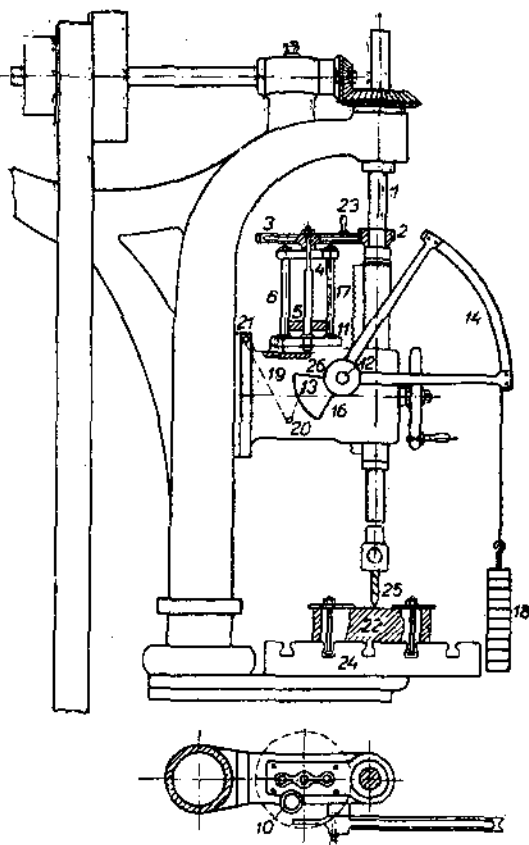


Рис. 278.

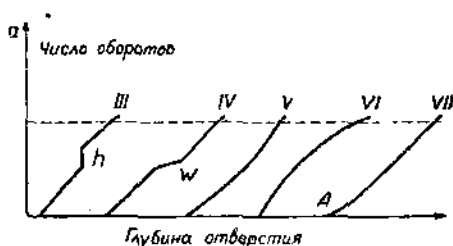


Рис. 279.

¹ Тейлор, Искусство резать металлы.

имеет кривая VII: некоторый перелом у A объясняется тем, что сверло не сразу работает по всей кромке, а требуется сперва пройти некоторую глубину. Кривая V показывает, что более глубокие слои обрабатываются (сверлятся) труднее наружных. Кривая VI относится к материалу с наружной твердой коркой. Переломы кривых III и IV указывают на неоднородность материала: в первом случае — твердая жила, во втором — мягкая.

Для оценки способности материала обрабатываться снятием стружки по таким кривым необходимо исправить их, отбросив влияние различных случайных факторов, как это указано пунктиром на рис. 279. Масштабом качества чаще всего принимают угол, образованный кривой и осью абсцисс.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЫ.

Технологические пробы заключают в себе такие механические испытания, которые выявляют вязкость, степень ломкости материала при различных температурах, а также характеризуют материал с точки зрения способности его коваться или вообще обрабатываться в горячем или холодном состояниях. Характерным отличием технологических проб от механических испытаний является то, что при них не определяется усилие, потребное для того, чтобы произвести ту или иную деформацию. Мерилом для этих проб является состояние материала и его поверхности после деформации. Кроме того к категории технологических проб относят также некоторые испытания и других свойств металлов, производимые в обстановке производства и не отличающиеся, конечно, большой точностью.

Технологические пробы можно подразделить на три группы: 1) испытание изгибом, 2) кузнечные пробы и 3) разные испытания.

Испытание изгибом

Испытанию изгибом металлы подвергаются как в холодном, так и в горячем состоянии. Изгибание производится или под молотом

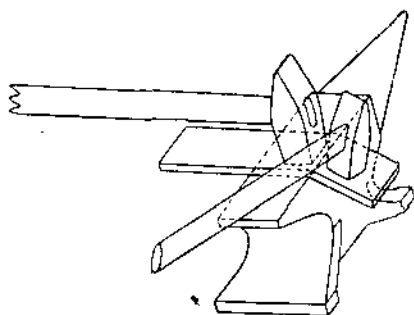


Рис. 280.

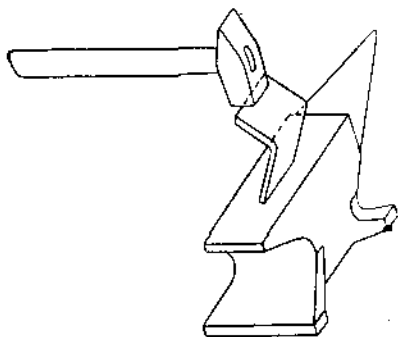


Рис. 281.

(рис. 280, 281) или же на специальных станках. Схема одного такого станка изображена на рис. 282. Более согласованные и сравнимые между собой результаты дают испытания на специальных станках, ибо результат изгиба под молотом в большой степени зависит от искусства кузнеца.

Способы [производства испытаний на изгиб кроме того подразделяются на такие, при которых изгиб производится около оправки и при которых изгиб происходит свободно. При этом определяют, переносит ли испытуемый материал известный изгиб без появления трещины или насколько материал способен сгибаться до появления трещины. В первом случае, который чаще всего представляется на практике, материал следует прямо согнуть до предписанного предела и затем определить, удовлетворяет ли проба условиям или нет. Во втором случае, который применяется всегда при научных исследованиях, следует определять угол загиба, при котором начинают появляться надрывы.

Однако угол загиба, который чаще всего и служит масштабом качества, не дает меры напряжения материала. Напряжение материала определяется лишь отношением между тол-

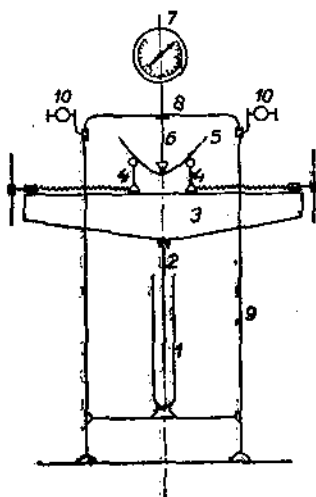


Рис. 282.

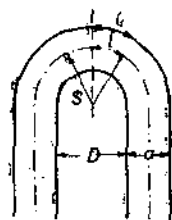


Рис. 283.

щиной планки и радиусом кривизны. Действительно, пусть l будет длина нейтрального слоя, a — толщина планки и r — радиус кривизны (расстояние от центра круглой оправки до нейтрального волокна); тогда, если l_1 — длине вытянутого волокна, можно написать (рис. 283):

$$\frac{l_1}{l} = \frac{r + \frac{a}{2}}{r} \text{ или } l_1 = l \frac{r + \frac{a}{2}}{r}$$

и далее относительное удлинение:

$$\epsilon = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{r + \frac{a}{2}}{r} - 1 = \frac{a^2}{2r^2},$$

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 А. Martens¹ дает следующую таблицу:

$D: a = 0,$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$r: a = 0,5$	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
$\epsilon = 1,00$	0,67	0,5	0,40	0,33	0,28	0,25

¹ А. Martens, Испытание строительных материалов, перев. Шадринко, т. II, 1910.

Тетмайер предложил считать масштабом качества величину 100 α . Если представить себе, что закругление дошло до полукруга и внутренние стороны пробного бруска сошлись вплотную, так что $\rho = 0,5\alpha$, то:

$$\varepsilon_{\max} = 100 \frac{\alpha}{2 \cdot 0,5\alpha} = 100,$$

и если брусок вообще не переносит никакого изгиба, т. е. $\rho = \infty$,

$$\varepsilon_{\min} = 100 \frac{\alpha}{l\infty} = 0.$$

Таким образом предложенный Тетмайером масштаб качества может быть обозначен как величина изгиба:

$$Q = 50 \frac{\alpha}{\rho}$$

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 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 $\frac{1}{4} \alpha$; иначе на острых гранях легко появляются трещины, которые характеризуют не плохое качество материала, а неправильно приготовленный образец.

2. Кузнечные пробы.

Кузнечные пробы производятся и в горячем и в холодном виде. Наиболее распространенной является проба на раздачу.

Она 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_1 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

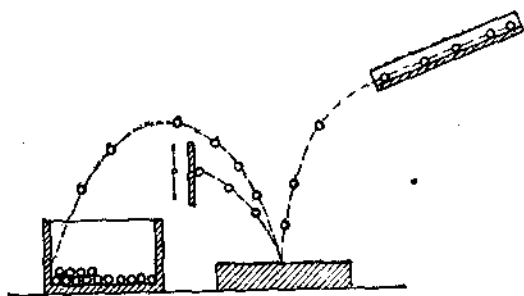


Рис. 284.

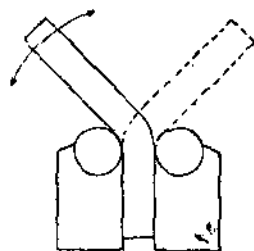


Рис. 285.

в производстве. В качестве примеров, характеризующих разнообразие этих проб, ниже приводится описание некоторых из них.

а) **Испытание стальных шариков.** Е. Peitz'ем построен прибор для сравнительных исследований упругости и твердости стальных шариков для шариковых подшипников. Испытуемые шарики (рис. 284), следуя друг за другом по желобку, падают на ровную твердую плиту под известным углом. От этой плиты, соответственной по своей 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 Shore, отсортировываются непригодные и не отвечающие своему назначению шарики.

б) **Испытание проволок.** Испытание проволок обычно не ограничивается одним испытанием на растяжение: проволоки кроме того подвергаются пробе на гиб и на закручивание. При пробе на гиб проволока зажимается в губки тисок, имеющие определенные закругления, и перегибается поочередно в одну и в другую сторону, как это указано стрелкой на рис. 285. За единицу считают гиб на 180° . Для железных и стальных проволок в зависимости от диа-

метра предписывается в среднем следующее число перегибов, которое должна выдержать проволока:

диаметр проволоки мм	6	5	4	3	2,5	2	1,7
число перегибов	6	7	8	8	10	14	16
радиус закругления губок (мм)	10	10	10	5	5	5	5

При испытании проволоки на закручивание пользуются станком такого же устройства, как и при испытании на кручение. Для железных и стальных проволок требуют в среднем следующее число закручивания:

диаметр проволоки (мм)	6	5	4	3	2,5	2	1,5
число закручиваний	16	19	23	28	30	32	38

причем длина расстояния между зажимами испытываемой проволоки берется равной 75 диаметрам проволоки и не менее 15 см (для тонких сортов).

в) Определение температуры закали по изломам. Для грубого определения температуры закали стали пользуются способом, предложенным Metcalf'ом, заключающимся в том, что берут брусок испытываемой 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.

г) Определение температуры закали при помощи компаса. Для получения полной закали стали, как известно, необходимо нагреть ее до области твердости растворов. При этом магнитное железо α переходит в немагнитное γ . Этим обстоятельством пользуются для определения надежающей температуры закали. 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, в которых железо α переходит сначала в модификацию β , а не γ . Кроме того закалочные клещи должны быть изготовлены из немагнитного материала, дабы они не оказывали влияния на стрелку компаса.

д) 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% вольфрама 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:

$$g_x = \frac{g_m}{g_m - g_n},$$

где g_x — искомый удельный вес испытуемого тела,

g_m — вес испытуемого тела на воздухе,

g_w — вес испытуемого тела в воде.

Процентное содержание вольфрама определится из выражения:

$$w^{0/0} = \frac{g_x}{i}.$$

е) **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.

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-

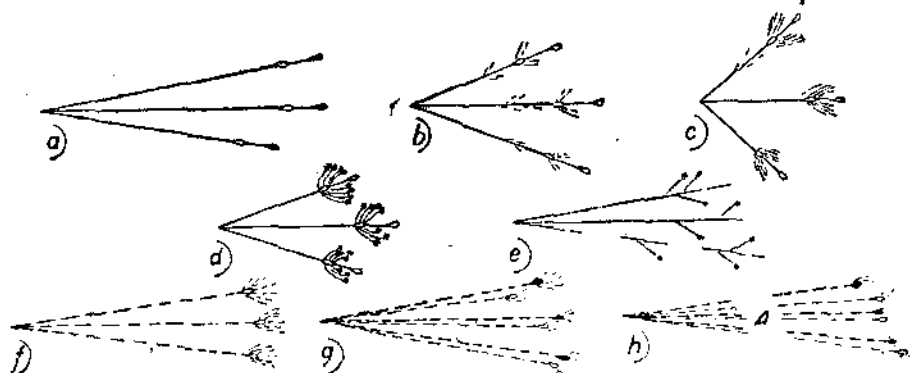


Рис. 286.

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. 286 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. 286 б), светлые. Пучок короче и шире.

В твердых сортах углеродистой стали от первой капли отделяется целый сноп светлых искр (рис. 286 в). Пучок еще короче и шире.

В марганцовистых сортах стали на концах искр, отделяющихся от первой капли, наблюдаются звездочки (рис. 286 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. 286 е).

Вольфрамовая сталь имеет искру темнокрасную и не сплошную, а пунктирную (черточки) со светлой каплей на конце (рис. 286 ф). При испытании необходим сильный нажим.

Хромовольфрамовая быстрорежущая сталь средней твердости имеет двойную искру: тонкую — темнокрасную и толстую — кирпично-красную (рис. 286 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. 286 h).

ж) 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 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 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 (ось), а по абсциссе — классы или свойства образцов (рис. 287).

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 *cfy* указывают, например, на количество неудовлетворительных (не принятых) образцов, если например технические условия заданы с допусками.

¹ K. Daaves, St. u. Eisen, № 3 u. 4, 1925. Internat. Kongress Materialprüf., S. 551—57, Amsterdam 1927.

Если на кривой наблюдаются два максимума (рис. 288), то это обстоятельство указывает, что, исследуя один фактор, мы еще не 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 удается 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.

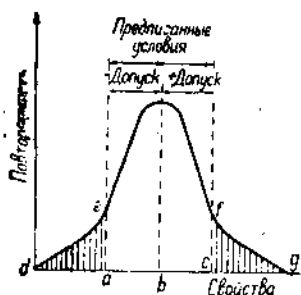


Рис. 287.

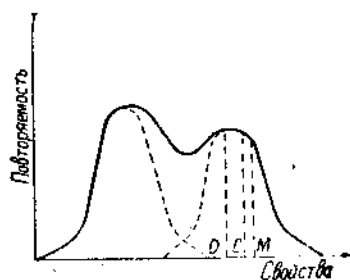


Рис. 288.

Из кривых повторяемости можно определить несколько важных величин. Например, среднее арифметическое значение M (рис. 288) 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.

Глава I. Термический анализ	5
1. Электрические лабораторные печи	—
а) Материал печей	—
б) Печи сопротивления с металлической обмоткой	6
в) Угольные печи сопротивления	8
г) Печи с вольтовой дугой	11
д) Вакуум-печи	—
е) Печи высокого внутреннего давления	—
ж) Высокочастотные печи	12
2. Приборы для измерения температур	13
а) Оптические пирометры	—
б) Электрические пирометры сопротивления	23
в) Термоэлектрические пирометры	25
3. Методы определения критических температур	38
а) Кривая: температура — время	—
б) Кривая: температура — скорость охлаждения	41
в) Кривая: температура — обратное значение скорости охлаждения	42
г) Кривая: температура — разность температур образца и эталона	43
д) Кривая: температура — производная разности температур образца и эталона по температуре	44
е) Определение критических температур	45
ж) Регистрирующий пирометр акад. Н. С. Курнакова	50
з) Регистрирующий пирометр Le Chatelier — E. Saladin	54
и) Прибор Dejean'a	56
4. Диаграммы состояния	57
а) Типы диаграмм состояния	—
б) Диаграммы состояния некоторых бинарных сплавов	60
Глава II. Макро- и микроанализ	69
1. Микроскоп	—
а) Оптика микроскопов	—
б) Осветительные аппараты; стative	73
2. Микроанализ	82
а) Приготовление шлифов	—
б) Травление шлифов	85
3. Макроанализ	105
4. Проявление линий и сдвигов в наклепанном железе	111
5. Определение внутренних пороков	115
а) Определение внутренних трещин и раковин	—
б) Определение внутренних напряжений	118
Глава III. Другие физические методы исследования металлов	126
1. Электропроводность	—
2. Испытание магнитных свойств	131
а) Общие сведения	—
б) Некоторые методы магнитных измерений	136
в) Определение изменения магнитных свойств при нагревании и охлаждении	147

3. Дилатометрия	148
а) Первый тип дилатометра Chévenard'a	149
б) Второй тип дилатометра Chévenard'a	150
в) Универсальный прибор H. Esser'a — P. Oberhoffer'a	152
4. Рентгенографический анализ	155
а) Изучение структуры	—
б) Изучение остаточных деформаций и определение предела упругости	159
в) Химический анализ	160
г) Определение пороков	161
5. Термоэлектрический метод	162
6. Метод электродвижущих сил растворения	163
7. Изучение плотности сплавов	164
Глава IV. Механические испытания	168
1. Испытание статической нагрузкой	—
а) Растяжение	—
б) Сжатие	180
в) Изгиб, кручение и срез	188
2. Испытание динамической нагрузкой	193
а) Растяжение и сжатие	—
б) Изгиб	195
3. Испытание на усталость	200
4. Машины для испытания усталости металлов	204
а) Машина, работающая на изгиб	—
б) Машина, работающая на растяжение — сжатие	208
в) Машина для испытания ударной усталости	210
5. Испытание механических свойств при высоких температурах	211
а) Температура	216
б) Деформация	217
в) Нагрузка	—
г) Время	218
6. Быстрые методы изучения ползучести металлов	—
а) Общее	—
б) Метод Бейли и Робертса	219
в) Метод Помпа и Дамена	220
г) Метод Гатфильда	221
Глава V. Испытание твердости	222
1. Метод вдавливания	—
2. Метод царапания	230
3. Склероскоп Shore	231
4. Маятниковый прибор Ed. Herbert'a	232
5. Прибор Kessler'a	236
Глава VI. Технологические пробы	239
1. Испытание изгибом	—
2. Кузнечные пробы	241
3. Разные испытания	242
а) Испытание стальных шариков	—
б) Испытание проволок	—
в) Определение температуры закали по изломам	243
г) Определение температуры закали при помощи компаса	—
д) Определение по удельному весу количества вольфрама, содержащегося в стали	—
е) Определение сорта стали по искре	244
ж) Метод больших чисел	245