

Содержание лекции:

- Механические свойства металлов. Основные понятия
- Разрушающие методы контроля свойств металлов:
 - испытания на растяжение;
 - контроль твердости;
 - динамические испытания (контроль ударной вязкости);
 - низкотемпературные испытания
 - усталость сталей
- Металлографические методы испытаний:
 - микроструктура;
 - макроструктура
- Методы определения химического состава

Как мы рассмотрели в лекции 1: чтобы правильно выбрать материал для изготовления различных деталей, необходимо знать какими свойствами он обладает. Теперь познакомимся как их определять.

Важным является определение не только комплекса необходимых свойств материалов, обеспечивающих надежную и долговечную работу арматуры в заданных условиях эксплуатации, а также установление необходимого и достаточного объема и методов контроля.

Физические, химические, технологические, механические и эксплуатационные свойства мы также рассмотрели в лекции 1. В рамках данной лекции приведем общую схему (см. Схема 1).



Схема 1. Свойства металлов

! При выборе материала для создания конструкции необходимо полностью учитывать механические, технологические и эксплуатационные свойства.

Механические свойства. Основные понятия

Механические свойства стали определяются ее структурой, которая, в свою очередь, зависит от легирования и термической обработки. Механические свойства определяют поведение материала при воздействии рабочих условий (давление, температура, нагрузки, рабочая среда).

Чаще всего механические свойства сталей в целом оценивают по трем показателям: **пределу прочности, пределу текучести и удлинению**. Пределы прочности и пластичности обычно выражают в МПа, удлинение – в процентах (%). Практически всегда с увеличением прочности металла или сплава его пластичность снижается. Числовые значения определяются при испытаниях образцов металла.

Механические свойства позволяют определить пределы нагрузки для каждого конкретного материала. Зная механические свойства, конструктор обоснованно выбирает соответствующий материал, обеспечивающий надежность и долговечность конструкций при их минимальной массе.

К механическим свойствам относятся следующие характеристики:

- прочность
- пластичность
- вязкость
- твердость
- ударная вязкость

Прочность – это способность металла или сплава противостоять деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок - растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих. Нагрузки бывают внешними (вес, давление и др.) и внутренними (изменение размеров тела от нагревания и охлаждения, изменение структуры металла и т.д.), а также статическими, т.е. постоянными по величине и направлению действия, или динамическими, т.е. переменными по величине, направлению и продолжительности действия.

Интенсивность силы, действующей на образец, называется *напряжением* и измеряется как полная сила, отнесенная к площади, на которую она действует. Приложение к материалу напряжения вызывает деформацию. Под деформацией понимается относительное изменение размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Различают деформации растяжения (сжатия), изгиба, кручения, среза (рисунок 1). В действительности материал может подвергаться одному или нескольким видам деформации одновременно.

Если напряжение, приложенное к металлическому образцу, не слишком велико, то его деформация оказывается *упругой* – стоит снять напряжение, как его форма восстанавливается. Некоторые металлические конструкции намеренно проектируют так, чтобы они упруго деформировались. Так, от пружин обычно требуется довольно большая упругая деформация. В других случаях упругую деформацию сводят к минимуму. Мосты, балки, механизмы, приборы делают по возможности более жесткими. Упругая деформация металлического образца пропорциональна силе или сумме сил, действующих на него.

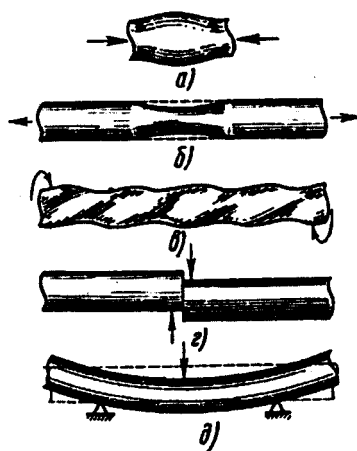


Рисунок 1. Виды деформаций: а – сжатие, б – растяжение, в – кручение, г – срез, д – изгиб

Упругостью называется способность металла или сплава восстанавливать первоначальную форму после прекращения действия внешней нагрузки.

При упругой деформации происходит незначительное изменение расстояний между атомами в кристаллической решетке. С увеличением межатомных расстояний существенно возрастают силы взаимного притяжения атомов. При снятии напряжения под действием этих сил атомы возвращаются в исходное положение.

Если деформация остается после снятия нагрузки, то это *пластическая деформация*. При пластической деформации в кристаллической решетке металла под действием касательных напряжений происходит необратимое перемещение атомов, причем сплошность тела не нарушается. В результате развития пластической деформации может произойти пластическое (вязкое) разрушение путем сдвига.

Пластичностью называется способность металла или сплава, не разрушаясь, изменять форму под действием нагрузки и сохранять эту форму после ее снятия. К показателям пластичности металла относятся относительное удлинение и сужение.

Твердостью называется способность металла или сплава оказывать сопротивление проникновению в него другого, более твердого тела.

Ударной вязкостью называется способность металла или сплава сопротивляться действию ударных нагрузок. Ударная вязкость измеряется в $\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$ ($\text{Дж}/\text{м}^2$).

Ползучестью называется свойство металла или сплава медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки (особенно при повышенных температурах).

Усталостью называется постепенное разрушение металла или сплава при большом числе повторно-переменных нагрузок; свойство выдерживать эти нагрузки называется выносливостью.

Детали ТПА работают под нагрузками. Нагрузки могут быть различных видов: одни детали нагружены постоянно действующей в одном направлении силой, другие подвержены ударам, у третьих силы изменяются по своей величине и направлению. На некоторые детали добавляется воздействие высоких температур, агрессивных коррозионно-активных сред и т.д.

Испытания свойств материалов проводятся на специально изготовленных образцах и дают возможность получить представление о качестве и свойствах материала.

Для получения сопоставимых результатов образцы и методика проведения механических испытаний регламентированы ГОСТами.

Методы испытания свойств металлов и сплавов

К испытаниям механических свойств предъявляется ряд требований. Температурно-силовые условия проведения испытаний должны быть по возможности приближены к служебным условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях. Вместе с тем методы испытаний должны быть достаточно простыми и пригодными для массового контроля качества заготовок/полуфабрикатов. Результаты определения механических свойств, как известно, используют в расчетной конструкторской практике при проектировании машин.

Наибольшее распространение имеют приведен следующие виды механических испытаний:

- статические кратковременные испытания однократным нагружением на одноосное растяжение – сжатие, твердость, изгиб и кручение;
- динамические испытания с определением ударной вязкости и ее составляющих – удельной работы зарождения и развития трещины;
- испытания переменной нагрузкой с определением предела выносливости материала;
- испытания на термическую усталость;
- испытания на ползучесть и длительную прочность;
- испытания на сопротивление развитию трещины с определением параметров вязкости разрушения;
- испытания материалов в условиях сложнапряженного состояния, а также натурные испытания деталей, узлов и готовых конструкций.

Механические свойства при растяжении, как и при других статистических испытаниях, разделяются на три основные группы: прочностные, пластические и характеристики вязкости.

Испытания на растяжение

Что такое «испытание металлов на растяжение». Пример, если взять пружинку и плавно растянуть ее и отпустить. Пружинка вернется к своей первоначальной длине. Если потянуть сильнее, то сначала пружинка будет равномерно удлиняться с увеличением усилия, а затем вдруг начнет удлиняться значительно быстрее. Отпускаем пружинку – она уже не возвращается к исходной длине. Пружинка получила необратимое увеличение своей длины и уже не годится для прежнего применения.

На этом основано испытание на растяжение для оценки механических свойств металлов.

При испытании на растяжение образец на специальной разрывной машине растягивают под действием плавно возрастающей нагрузки и доводят до разрушения.

Разрывные машины снабжены специальным самопишущим прибором, который автоматически вычерчивает кривую деформации, называемую диаграммой растяжения.

Испытания на растяжение проводят в соответствии с методиками, изложенными в следующих стандартах:

- испытания при комнатной температуре – ГОСТ 1497 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»;
- испытания при повышенных температурах до 1200 °С – ГОСТ 9651 «Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах»;
- испытания при пониженных температурах от минус 10 °С до 100 °С – ГОСТ 11150-75 «Металлы. Методы испытания на растяжение при пониженных температурах».
- правила вырезки образцов для испытаний на растяжение из готовой продукции или полуфабрикатов – ГОСТ 7564-97.

В ГОСТ сформулированы требования к образцам (вид, размеры), основные требования к испытательному оборудованию, методика проведения испытания и подсчета результатов.

При испытании образцов на растяжение (по результатам одного опыта) определяют следующие показатели, являющиеся критерием качества материалы и используются для проведения конструкторских расчетов:

- предел прочности, σ_b (временное сопротивление/tensile strength, R_m , МПа);
- предел текучести условный, $\sigma_{0,2}$ (технический/ yield strength, $R_p 0,2$, МПа);
- относительное удлинение, δ (specific elongation, A %);
- относительное сужение, ψ (reduction of area, Z %).

Образцы

Образец вырезают из контролируемого материала или изделия.

Для статических испытаний на разрыв изготавливают круглые или плоские образцы. В большинстве случаев используются круглые образцы, плоские применяются при испытаниях листовых материалов. Основные виды образцов на растяжение представлены на рисунке 2.

Образец состоит из рабочей части и головок (утолщения на концах образцов), для закрепления в захватах разрывной машины. Форма головки зависит от конструкции захватов испытательной машины, соответствующих виду нагрузок на образец.

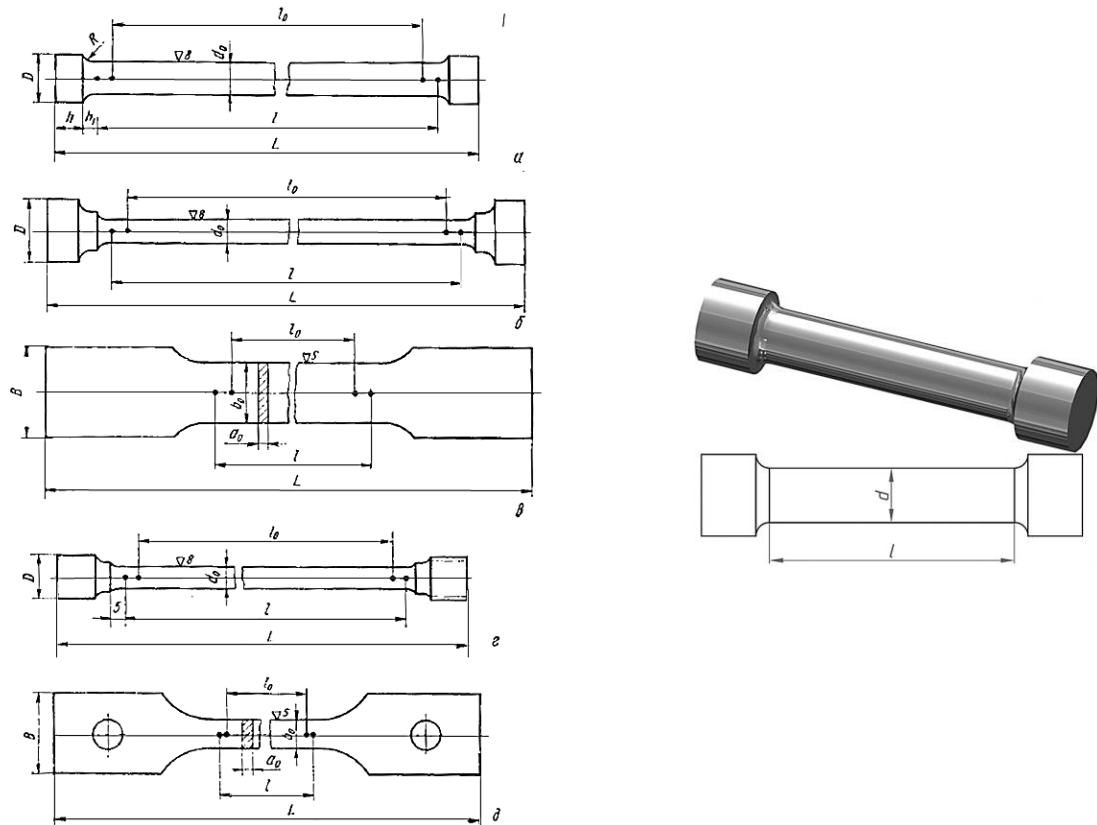
Для измерения величины деформаций на расчетной части образца отмечают отрезок, называемый расчетной длиной ($l_0 = 10d_0$). Чаще всего применяются цилиндрические образцы, у которых расчетная длина равна десяти диаметрам (длинные образцы) и образцы с расчетной длиной равной пяти диаметрам (короткие образцы).

На рисунке 3 показан эскиз пропорционального цилиндрического образца до нагружения и после его разрыва.

Растягивающее усилие создает напряжение в образце и вызывает его удлинение, а когда напряжение превзойдет прочность образца, он разрывается.

К методике проведения испытаний на растяжение при повышенных и отрицательных температурах предъявляют ряд специфических требований. При высокотемпературных испытаниях нагревательные устройства должны обеспечивать равномерный нагрев образца в пределах расчетной длины и поддержание заданной температуры в установленных пределах в течении всего времени испытания. Испытания при минусовых температурах производятся в специальных камерах.

Результат испытания представляет собой диаграмму растяжения (см. рисунок 4) – график, на котором по вертикали откладывается напряжение (усилие на единицу площади образца), а по горизонтали – деформация (относительное изменение длины образца).



Обозначения:

L – полная длина образца;

l – рабочая длина образца, с постоянной площадью поперечного сечения;

l_0 – начальная расчетная длина образца, на которой определяется удлинение;

D – диаметр головки образца

Рисунок 2. Цилиндрические и плоские образцы для испытаний на растяжение

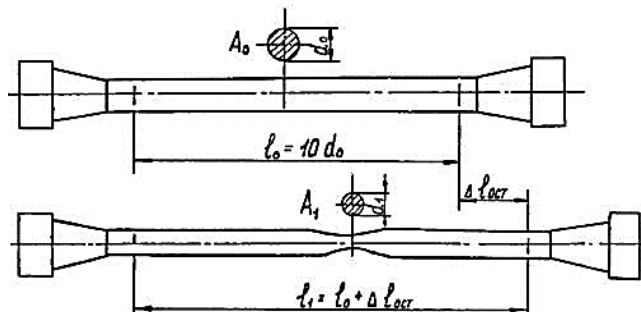


Рисунок 3. Образец для испытания на растяжение до нагружения и после

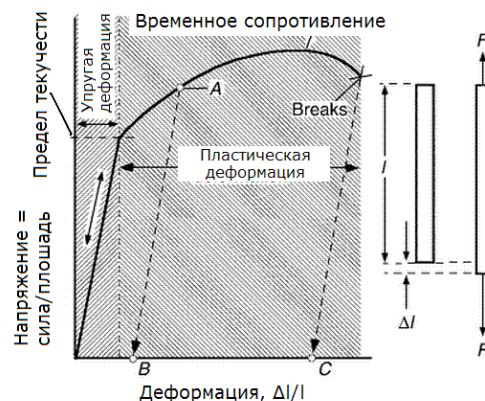
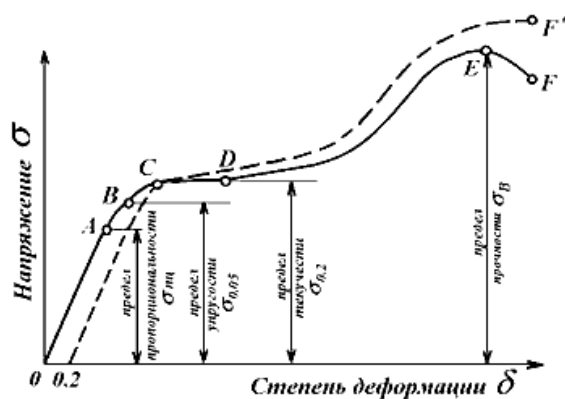


Рисунок 4. Типичная диаграмма растяжения с площадкой текучести для конструкционной стали. Сплошная линия – кривая условных напряжений; пунктирная – истинных.

Коротко диаграмму можно пояснить следующим образом:

Диаграмму растяжения можно разделить на две области: упругая область и пластическая область. Когда напряжение в металлическом образце увеличивается – он удлиняется, также, как и пружинка. В образце возникают деформации. До тех пор, пока эти напряжения и деформации не слишком велики, снятие нагрузки возвращает образец к первоначальной длине. Эти деформации называют упругими.

В конце упругого участка диаграммы растяжения напряжения в образце достигают некоторого критического уровня, который называют «предел текучести», металл «сдается», точно также, как и пружинка, описанная выше. Деформирование образца переходит в пластическую область диаграммы деформирования.

При испытании металлов на растяжение на пластическом участке диаграммы растяжения – после прохождения предела текучести наблюдаются два важных явления:

- для продолжения деформации образца для заданного приращения деформации требуется меньшее увеличение напряжения, чем в упругой области;
- при разгрузке образца – снятии напряжений – в образце остается остаточное, необратимое удлинение образца как показано линией со стрелкой АВ. Образец нагружается до точки А, а затем нагрузка снимается: образец удлинился от своей первоначальной длины на некоторую величину. Как показано на рисунке увеличение напряжения, которое требуется для продолжения пластической деформации, достигает максимума в пластической области и затем немного падает перед тем, как напряжения разрывают образец на две части. Это максимальное напряжение обычно называют «временное сопротивление» или чаще – «прочность при растяжении».

Кроме предела текучести и временного сопротивления диаграмма деформирования дает еще одну меру механических свойств металла – «*относительное удлинение*». Относительное удлинение характеризует пластические свойства металла. Относительное удлинение – это увеличение длины образца, которое происходит после прохождения предела текучести и до самого разрушения стержня. Его иногда называют остаточным удлинением, так оно остается в образце после его разрушения и его можно легко измерить. Остаточное удлинение образца на рисунке после того, как упругие деформации релаксировали, обозначено точкой С.

Чем выше значения относительного удлинения и сужения для материала, тем он более пластичен. Условно принято считать металл надежным при $\delta > 15 \%$, $\psi > 45 \%$. У хрупких металлов относительные удлинение и сужение стремятся к нулю.

Диаграмма деформации, фиксирует зависимость между приложенным напряжением σ и деформацией образца δ вплоть до разрушения образца.

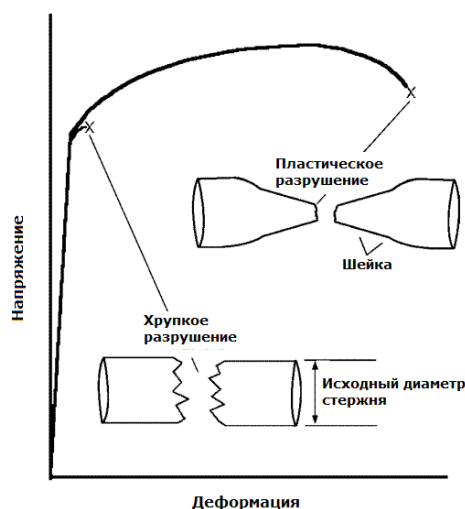


Рисунок 5. Диаграмма растяжения для хрупкого и пластичного металлов

Испытания на твердость

Наиболее простым методом испытания свойств является измерение твердости.

При испытаниях на твердость механические свойства сталей оценивают путем внедрения в него при заданном усилии твердого материала – индентора (рисунок 6). Часто такой индентор изготавливают из алмаза. В результате испытания в материале образует отпечаток – по его размерам судят о твердости стали.

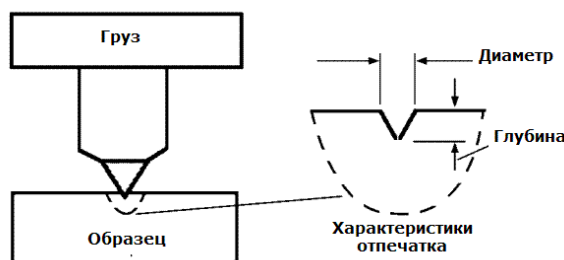


Рисунок 6. Схема испытания на твердость и его основные характеристики

Т.о., *твердость* – свойство материала оказывать сопротивление деформации в поверхностном слое при местных контактных воздействиях.

Существуют следующие методы:

- по Бринеллю. Значение твердости определяют по диаметру отпечатка стального шарика;
- по Роквеллу. Значение твердости определяют по глубине вдавливания алмазного конуса или закаленного шарика);
- по Виккерсу (для деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев твердость определяют по диагонали отпечатка алмазной пирамиды).

Схемы этих методов приведены на рисунке 7.

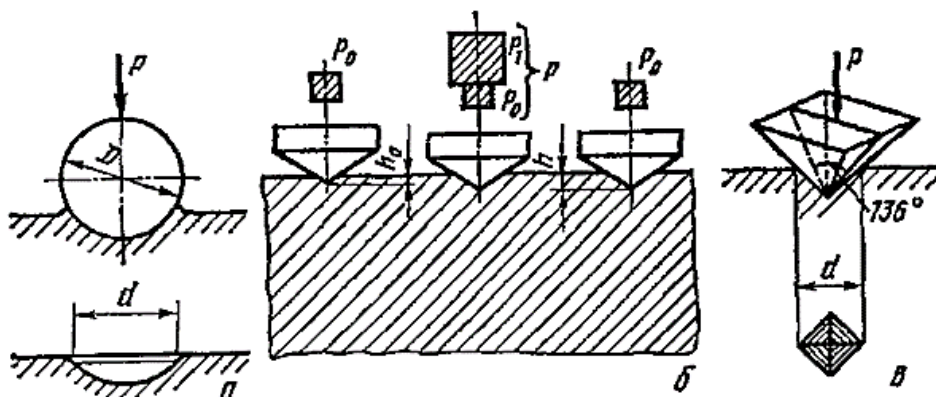


Рисунок 7. Схема определения твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Методики и особенности испытаний различным методом представлены в Приложении 1.

Соотношение прочности и твердости сталей

Значения твердости нельзя однозначно переводить в значения других механических свойств материала. Однако определение твердости является эффективным способом сравнения друг с другом однотипных материалов и контроля их качества.

В закаленных и отпущенных сталях наблюдается хорошая корреляция между пределом прочности и твердостью – по твердости можно приблизительно оценивать прочность и наоборот. Для термически упрочненных сталей твердость 45 HRC и выше является обычным делом. Твердость 45 HRC соответствует прочности при растяжении 1480 МПа. Для приближенной оценки статической прочности используют твердость HB. Для стали (углеродистые) $\sigma_b = 0,34 \text{ HB}$, для медных сплавов $\sigma_b = 0,45 \text{ HB}$, для алюминиевых сплавов $\sigma_b = 0,35 \text{ HB}$

Динамические испытания и вязкость стали

Важным механическим свойством стали является ее вязкость. Обычно термин вязкость применяют, как меру способности металла разрушаться нехрупко.

Характер разрушения – хрупкий или пластичный – хорошо рассматривать на примере ферритных сталей. Все металлы с объемноцентрированной кубической атомной решеткой – как и ферритные стали – имеют один общий недостаток. Они разрушаются хрупко при низких температурах, тогда как при достаточно высоких температурах разрушаются нормально – пластически. Температура перехода от пластического разрушения к хрупкому называется температурой вязко-хрупкого перехода.

Она определяется как температура, ниже которой происходит хрупкое разрушение. Температуру хрупкого перехода можно в принципе определять испытанием на растяжение, но при одноосном растяжении ее величина значительно ниже, чем та, которую наблюдают в сложных стальных деталях. Опыт показал, что испытания на ударную вязкость по методу Шарпи намного лучше согласуются с опытными данными по хрупкому разрушению сложных деталей.

Испытания производятся в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра (рисунок 7).

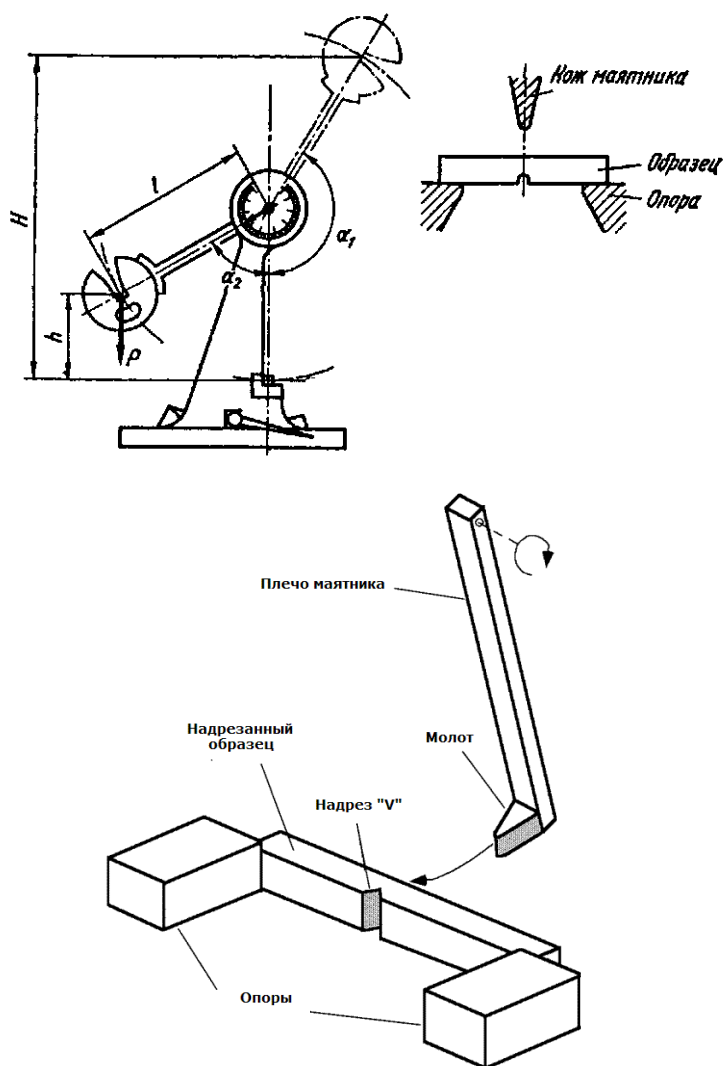


Рисунок 7. Схема испытаний на ударную вязкость

Под ударной вязкостью КС, понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора напряжения. Ударная вязкость — это способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам.

Для испытания изготавливают специальные стандартные образцы, имеющие форму квадратных брусочков с надрезом. Испытывают образец на маятниковых копрах. Свободно падающий маятник копра ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу. При этом фиксируется работа, затраченная на излом.

В зависимости от вида концентратора напряжений различают образцы трех типов: с радиусом дна надреза 1,0 мм (тип U); 0,25 мм (тип V) и иницированной трещиной (тип Т) (рисунок 8). Вид надреза входит в обозначение работы удара и ударной вязкости, соответственно, обозначают буквами: КСУ, КСV, КСТ.

Обычные образцы имеют сечение 10 × 10 мм, но для особо ответственных случаев и для оценки работоспособности крупных деталей применяют образцы сечением 25 × 25 мм с иницированной трещиной. Чем острее надрез, тем более жестким испытаниям подвергается металл. Для испытаний ударной вязкости металла для деталей ответственного назначения применяют образцы с концентраторами напряжения V и Т.

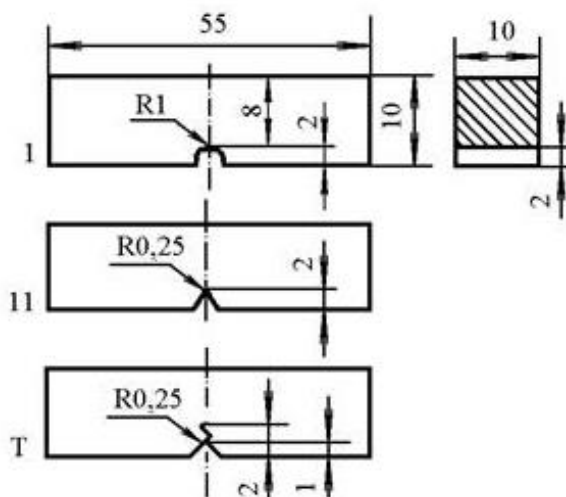


Рисунок 8. Образцы для определения ударной вязкости

Низкотемпературные испытания

Хладноломкость (относиться к эксплуатационным свойствам). Испытания ударной вязкости широко применяют для оценки склонности металла к хрупкому разрушению при низких температурах. Понижение температуры обуславливает переход от вязкого к хрупкому разрушению. Это явление называется хладноломкость. Температура перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому и наоборот получила название критической температуры хрупкости или порога хладноломкости. Для оценки хладноломкости обычно проводят испытания серии образцов при понижающихся температурах.

Кривые зависимости ударной вязкости от температуры называют сериальными кривыми хладноломкости (рисунок 9).

За критическую температуру принимают такую, при которой доля волокнистой составляющей структуры равна 50 %.

С помощью этих кривых определяют температурный порог хладноломкости. При температуре эксплуатации ниже порога хладноломкости металл применять не следует. Запас вязкости для ответственных деталей, испытывающих динамические нагрузки, принимается равным 60 °С, для неответственных деталей и промежуточного случая соответственно 20 °С и 40 °С.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что следует выбирать такой режим обработки, чтобы порог хладноломкости (t_{50}) детали, работающей при комнатной температуре, был бы не выше, чем $(20 \div 40) ^\circ\text{C}$.

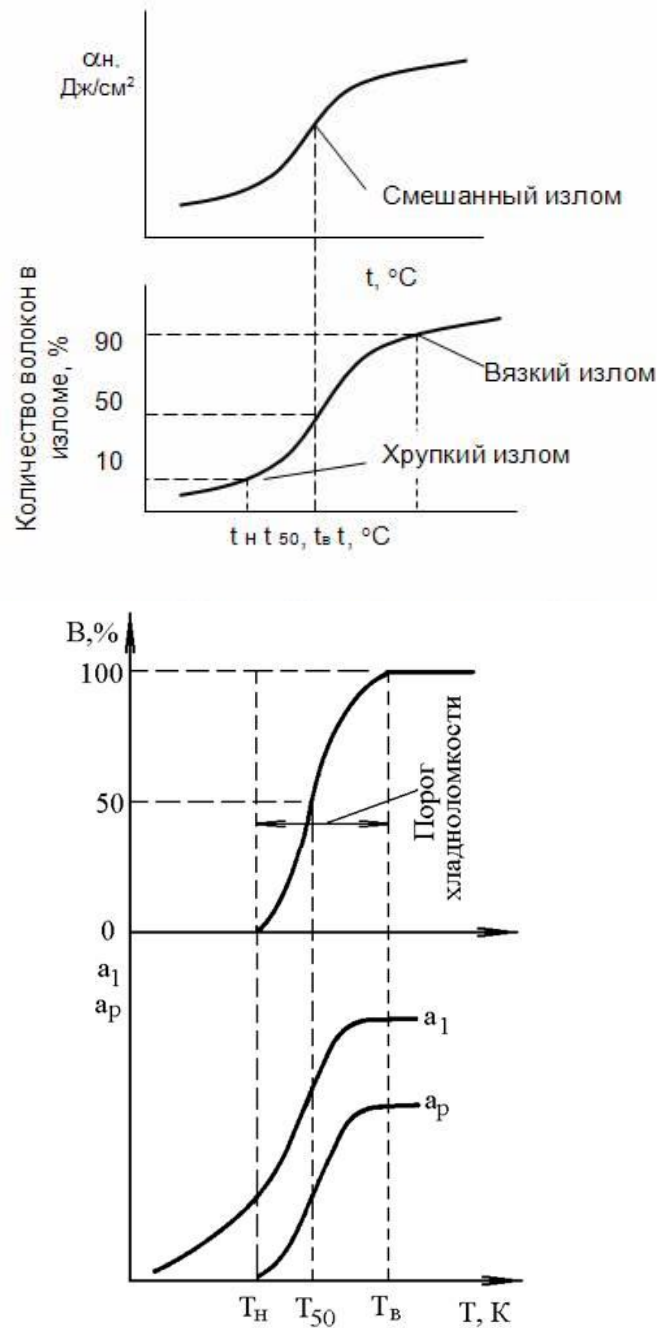


Рисунок 9. Серийные кривые хладноломкости

Оценку хладноломкости можно также проводить по виду излома разрушившегося образца. Метод основан на определении соотношения площадей вязких и хрупких участков излома ударных образцов. Вязкий излом имеет характерное волокнистое строение с пепельным оттенком. С понижением температуры количество волокнистой составляющей в изломе снижается, появляются кристаллические блестящие участки. На переход от вязкого разрушения к хрупкому указывают изменения строения излома и резкое снижение ударной вязкости. Строение излома изменяется от волокнистого матового при вязком разрушении до кристаллического блестящего при хрупком разрушении. При пороге хладноломкости в изломе образца сохраняется 50 % волокнистой составляющей, и величина ударной вязкости снижается на половину.

Определение ударной вязкости особенно важно для некоторых металлов, работающих при минусовых температурах и проявляющих склонность к хладноломкости (например, для углеродистых и

низколегированных сталей). Чем ниже порог хладноломкости, т.е. температура, при которой вязкое разрушение материала переходит в хрупкое, и чем больше запас вязкости материала, тем больше ударная вязкость материала. Хладноломкость – снижение ударной вязкости материалов при низких температурах.

Таким

образом, для сталей, разрушающихся вязко, выбор материала или отказ от него основан на соответствии рассчитанных напряжений и условного предела текучести при условии обеспечения удовлетворительного запаса вязкости, гарантирующего малую вероятность хрупкого разрушения. Для сталей же со смешанным или хрупким разрушением выбор напряжений определяется значениями K_{1C} и предельным размером дефекта. К сожалению, не накоплены ещё данные по K_{1C} , а методы обнаружения (измерения) дефектов, особенно внутренних, недостаточно отработаны.

Ударная вязкость КСУ оценивает работоспособность материала в условиях ударного нагружения при комнатной температуре при наличии в металле U – образного концентратора напряжения.

О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и t_{50} . При этом, чем ниже температура перехода материала в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения

Порог хладноломкости характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. Его определяют по результатам испытаний образцов с надрезом при понижающейся температуре. Сочетание при таких испытаниях ударного нагружения, надреза и низких температур – основных факторов, способствующих охрупчиванию, важно для оценки поведения материала при экстремальных условиях эксплуатации.

Механические свойства при переменных (циклических) нагрузках

Металл, длительно испытывающий в работе многократные переменные и особенно знакопеременные нагрузки постепенно из вязкого состояния переходит в хрупкое (устает) и разрушается при нагружении не только ниже σ_B , но и ниже $\sigma_{0,2}$ в результате явления усталости металла.

Усталостью называют процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к образованию трещин и разрушению. Усталость металла обусловлена концентрацией напряжений в отдельных его объемах, в которых имеются неметаллические включения, газовые пузыри, различные местные дефекты и т. д. В деталях обычно микротрещины возникают и развиваются с поверхности, преимущественно в сечениях с резкими изломами.

Характерным является усталостный излом, образующийся после разрушения образца в результате многократного нагружения и состоящий из двух разных по внешнему виду частей. Одна часть излома с ровной (затертой) поверхностью образуется вследствие трения поверхностей в области трещин, возникших от действия повторно-переменных нагрузок, другая часть с зернистым изломом возникает в момент разрушения образца.

Рассмотрим ось на колесах, на которую «давит» довольно тяжелый груз. Это груз вызывает изгиб в центре в точке посередине между колесами, как показано схематически на рисунке 10. Этот изгиб заставляет металл растягиваться в точке Т и сжиматься в точке С (в точке Т металл подвергается растягивающим напряжениям, а в точке С – сжимающим). Поэтому, поскольку ось вращается каждая точка посередине оси подвергается циклическим напряжениям – растягивающим, когда она находится внизу и сжимающим, когда вверх.

В хорошо спроектированной оси максимальные растягивающие напряжения будут далеко ниже предела текучести и все деформации, которые происходят на поверхности металла во время вращения, будут в упругой области, как это показано в нижней части рисунка 10.

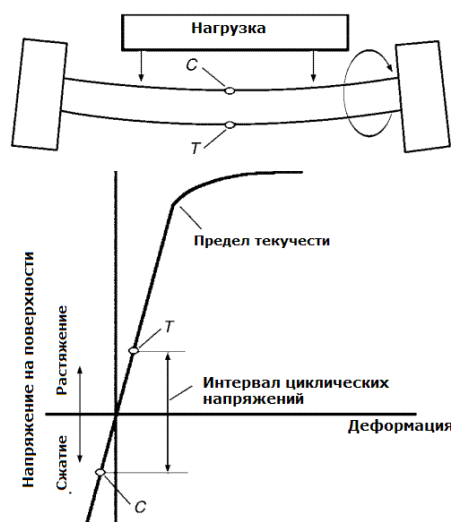


Рисунок 10. Смена сжимающих и растягивающих напряжения на поверхности вращающейся оси

Однако, если на поверхности металла есть маленькая царапина, то в этом месте поверхности возникает так называемая концентрация напряжений. Если величина напряжений в этой точке будет превышать предел текучести, то здесь может зародиться трещина. Каждый раз, когда ось делает оборот, эта трещина будет расти, пока не станет достаточно большой, чтобы привести к разрушению оси. Этот процесс называют усталостным разрушением или усталостью сталей. Способность стали сопротивляться циклическим напряжениям называют усталостной прочностью или циклической прочностью. Усталостные разрушения происходят в металлических деталях, которые подвергаются циклическим напряжениям, таких как вращающиеся детали, клапаны, пружины, а также вибрирующие детали, такие как самолетные крылья.

Статическая прочность не может характеризовать выносливость металла при переменных нагрузках. Испытания на усталость проводят на специальных машинах. Наиболее распространены машины для повторно-переменного изгиба вращающегося образца, закрепленного одним или обоими концами, а также машины для испытаний на растяжение-сжатие и на повторно-переменное кручение. В результате испытаний определяют предел выносливости, характеризующий сопротивление усталости.

Выносливость – свойство материала противостоять усталости.

Предел выносливости — это максимальное напряжение, которое может выдержать металл без разрушения заданное число циклов нагружения.

Металлографические методы испытаний

Свойства металла зависят не только от химического состава, но также в значительной степени от их строения. Например, ТО не меняет химического состава, но изменяет структуру и свойства.

При изучении строения металла различают:

- *макроструктуру* – строение металла, видимое невооруженным глазом;
- *микроструктуру* – строение металла, определяемое металлографическими методами, т. е. с использованием различных типов микроскопов (оптических, электронных и ионных).

Изучение макроструктуры металла

Макроструктуру металла изучают путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов - продольных или поперечных макрошлифов (темплетов) или изломов - невооруженным глазом, а также с помощью лупы при увеличении до 30 раз. Это позволяет контролировать большую поверхность и получать общее представление о качестве металла и о наличии в нем определенных пороков после различных видов технологического процесса изготовления деталей: литья, обработки давлением, сварки, термической и химико-термической обработки.

Макроанализ, как правило, является не окончательным, а предварительным этапом исследования структуры металла. Он позволяет выбрать те участки, которые затем тщательно изучаются с помощью металлографических методов.

Путем исследования макроструктуры металла можно определить:

- нарушение сплошности металла: усадочную рыхлость, пористость, газовые пузыри и раковины, подкорковые пузыри, межкристаллитные трещины;
- трещины и пустоты в литом металле; трещины, возникшие при обработке давлением и термической обработке, флокены;
- пороки сварки (в виде непровара, газовых пузырей, пустот);
- дендритное строение и зону транскристаллизации в литом металле, размер зерна;
- химическую неоднородность литого металла (ликвацию);
- волокнистую структуру деформированного металла;
- структурную или химическую неоднородность металла после обработки давлением, термической, термомеханической или химико-термической обработки;
- вид излома: вязкий, хрупкий, нафалинистый и т.д

Большое значение для успешного проведения макроанализа имеет правильный выбор наиболее характерного для исследуемой детали сечения или места излома. Как правило, для контроля качества металла число образцов, их размеры, место вырезки и другие условия отбора проб указывают в стандартах и технических условиях на конкретную металлопродукцию.

Контролируемую поверхность макрошлифов (темплетов) перед травлением торцуют, строгают и шлифуют. Готовая поверхность должна быть ровной, без наклепа и прижога. Темплеты травят специальными реактивами до выявления строения и дефектов макроструктуры. Для выявления макроструктуры многих марок стали применяют горячий ($60 \div 80^\circ\text{C}$) 50 % -й раствор соляной кислоты. Темплеты травят в течение $5 \div 45$ мин до четкого выявления макроструктуры.

Для изучения изломов образцы, вырезанные в поперечном или в продольном направлении, надрезают, а затем разрушают по месту надреза на прессе или копре.

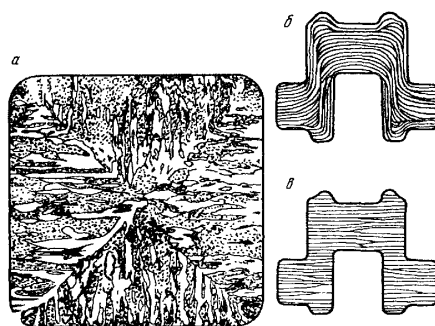


Рисунок 1. Макроструктура:
а – литая сталь (поперечное сечение слитка; б – ковкая деталь; в – прокат

Изучение микроструктуры

Изучение микроструктуры проводят с использованием микроскопов. Микроскопы делятся на переносные и стационарные. Переносные микроскопы используются для исследования поверхности металла непосредственно на изделии (без вырезки образца).

Изучение структуры обычно начинают с рассмотрения специально подготовленного образца (шлифа) в нетравленном виде, т. е. после его полирования и промывки. В этом случае можно изучать

неметаллические включения, мелкие поры, некоторые структурные составляющие, характерные для ряда сплавов (например, графит в сером чугуне).

Количество и характер распределения неметаллических включений определяют сравнением наблюдаемых изображений на шлифе при увеличении в 100 раз со стандартными шкалами. После этого проводится травление шлифа. Реактивы для травления выбирают в зависимости от состава изучаемого сплава и от задачи исследования. Микроскопическое исследование специально подготовленного образца позволяет изучать такие структурные особенности, как форма, размер, распределение фаз и неметаллических включений, размер зерна, ликвационные области, дислокации с использованием ямок травления и др.

Ознакомиться с методиками определения загрязненности сталей неметаллическими включениями можно изучив ГОСТ 1778 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений». Обычно для ковального металла используют метод Ш4.

Методы определения химического состава

Химическим анализом называют получение информации о составе и структуре вещества.

Некоторые способы (методы) анализа основаны на проведении химических реакций со специально добавляемыми реагентами, в других – химические реакции играют вспомогательную роль, третьи – вовсе не связаны с протеканием реакций. Но результатом анализа в любом случае является информация о химическом составе вещества, т. е. о природе и о количественном содержании входящих в него атомов и молекул. Это обстоятельство подчеркивают, используя прилагательное «химический» в словосочетании «химический анализ».

По способу выполнения: химические (посредством химических реакций), физические и физико-химические (инструментальные).

К химическим относится пробирный метода («мокрая химия»). К физическим – спектральные методы.

Химические методы основаны на использовании химических реакций (нейтрализации, окисления-восстановления, комплексообразования и осаждения), в которые вступает анализируемое вещество. Качественным аналитическим сигналом при этом является наглядный внешний эффект реакции - изменение окраски раствора, образование или растворение осадка, выделение газообразного продукта. При количественных определениях в качестве аналитического сигнала используют объем выделившегося газообразного продукта, массу образовавшегося осадка и объем раствора реагента с точно известной концентрацией, затраченный на взаимодействие с определяемым веществом.

Физические методы не используют химические реакции, а измеряют какие-либо физические свойства (оптические, электрические, магнитные, тепловые и др.) анализируемого вещества, которые являются функцией его состава.

Физико-химические методы используют изменение физических свойств анализируемой системы в результате протекания химических реакций. К физико-химическим относят также хроматографические методы анализа, основанные на процессах сорбции-десорбции вещества на твердом или жидком сорбенте в динамических условиях, и электрохимические методы (потенциометрия, вольтамперометрия, кондуктометрия).

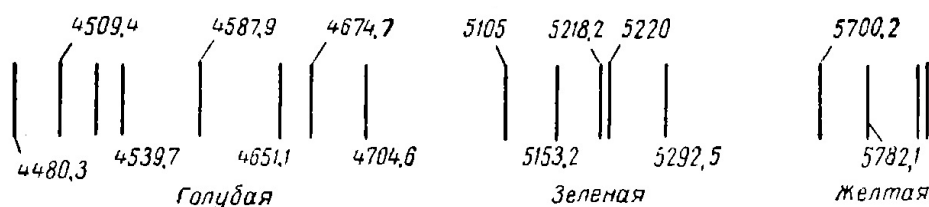
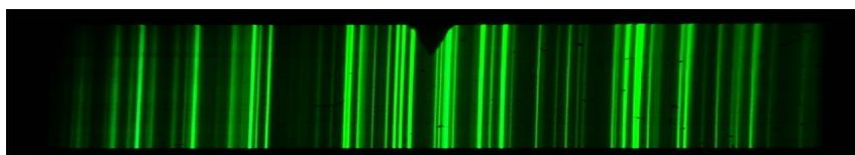
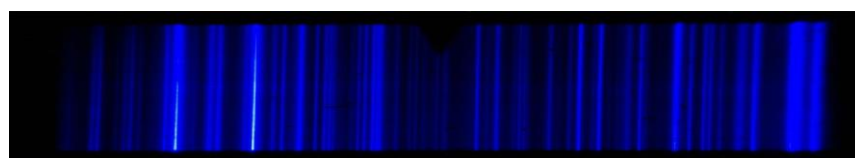
Также существуют переносные приборы для определения химического состава.

Стилоскопирование

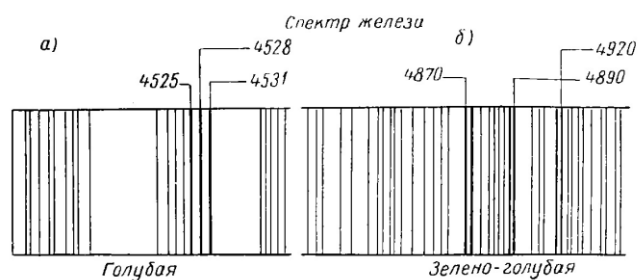
Определение химического состава определяется непосредственно на заготовке, полуфабрикате посредством стилоскопа. Назначение этого прибора — визуальный качественный и, в лучшем случае, полуколичественный спектральный анализ металлов и сплавов в видимой области спектра, к точности которого не предъявляется строгих требований.

Принцип работы этого прибора, следующий: между исследуемым образцом и электродом (как правило, медным) зажигается разряд (искровой, дуговой или комбинированный). Оператор с помощью спектрографа визуально наблюдает спектр этого разряда. Вращая ручку прибора, оператор просматривает весь спектр от фиолетовой до красной области, уделяя особое внимание тем участкам, где должны находиться спектральные линии примесей. Рисунок 12 – пример спектра, наблюдаемого оператором в окуляре стилоскопа (в цвете).

Найдя такую область по атласу для стилоскопа, оператор идентифицирует спектральную линию какой-либо примеси и далее, визуально сравнивая её по яркости свечения с соседними линиями основы, делает выводы относительно концентрации той или иной примеси, сверяясь с таблицей. (рисунок 12— примеры спектра в таблице и участка спектра, служащего для определения концентрации, взятые из атласа спектральных линий для стилоскопа).



Вид спектра меди



Вид спектра железа: а — в области 4500 Å; б — в области 4900 Å

Рисунок 12. Примеры спектральных линий в окуляре стилоскопа и из атласа для стилоскопа

Естественно, оператор может видеть спектр лишь в тот момент, когда горит разряд. Найти требуемый участок спектра, идентифицировать линию и оценить её яркость занимает значительное время. И эту процедуру надо повторить для каждой примеси, иногда по много раз. Прибор перегревается через

несколько минут и его надо выключить, чтоб он остыл, после включить и продолжить оценку. Естественно, чем опытнее стилоскопист, тем точнее и быстрее он может оценить количество примесей в исследуемом образце.

Рентгенофлуоресцентный

Реализован в **портативных переносных анализаторах** (рисунок 13). Прохождение рентгеновского излучения через вещество сопровождается поглощением излучения, что приводит атомы вещества в возбужденное состояние. Возврат к исходному состоянию сопровождается излучением спектра характеристического рентгеновского излучения.

Анализируемый материал в течение нескольких секунд подвергается рентгенофлуоресцентному воздействию. Атомы элементов в материале возбуждаются и испускают фотоны с энергией, специфичной для каждого элемента. Датчик отделяет и накапливает фотоэлектроны, получаемые от образца в энергетические области и, по мере общей интенсивности в каждой области, определяет концентрации элемента. Энергетическая область, соответствующая элементам Ti, V, Cr, MC, Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Zn, Se, Zr, Ag, Sn, Ta, W, Au, Pb, Bi, Hf, может быть эффективно проанализирована.

РФ анализатор состоит из центрального процессора, рентгеновской трубки, детектора, электронной памяти, хранящей градуировочные данные. Кроме того, память также используется для хранения и обработки данных марок сплавов и других коэффициентов, имеющих отношение к различным специальным режимам работы.

Контроль за исследованием осуществляется посредством компьютерной программы, базирующейся на наладонном портативном компьютере (КПК), которая выдает пользователю изображение спектра и полученные значения содержаний элементов.

После проведения анализа значения сравниваются с базой данных по маркам сталей и производится поиск наиболее близкой марки.



Рисунок 13. Портативный рентгенофлуоресцентный спектрометр.

Определение по искре

Существует довольно любопытный способ определения сплава по искрам от шлифовального круга. Только этот способ может не подойти при использовании круга с органической связкой.

Искры, возникающие при шлифовании достаточно прочных металлов, представляют собой мельчайшие расплавленные частицы металла, летящие по касательной к окружности вращающегося круга в месте его контакта с деталью. Стружка или расплавленные частицы металла, отброшенные центробежной силой круга, пролетая с большой скоростью в воздухе, раскаляются еще больше.

При наличии в металле углерода, соприкосновение раскаленных частиц с воздухом сопровождается окислением, причем углерод превращается в углекислоту ($C + O_2 = CO_2$), создавая искры. Если на пути искр поставить стеклянную пластинку, то она покроется мельчайшими металлическими частичками, часть которых прочно приварится к пластинке.

Исследование мельчайших частиц под микроскопом показывает, что часть их достигает пластинки в расплавленном состоянии и застывает на ней в виде причудливых фигур. Сравнительно крупные стружки, не достигшие температуры плавления, сохраняют форму, полученную ими при отделении от детали, или оплавляются частично. Длина лучей в пучке искр неодинакова и зависит от массы горячей стружки, причем большие стружки отлетают дальше, а меньшие - ближе.

Цвет и форма искр (строение луча) определяются главным образом химическим составом шлифуемого сплава, что применяется для распознавания сорта стали по искре.

Углеродистая сталь пускает пучок искр желтого цвета с отдельными звездочками, причем, чем больше в стали углерода, тем многочисленнее и короче лучи, больше звездочек и ярче их свечение.

Марганцовистая твердая сталь с $(10 \div 14) \%$ Mn дает лучи темно-красного цвета со звездочками в виде листочков, форма и цвет которых зависят от содержания углерода.

Быстрорежущая сталь с высоким содержанием вольфрама P18 имеет небольшой пучок искр темно-красного цвета (штрихи) почти без звездочек. Быстрорежущие стали с малым содержанием вольфрама образуют искры красновато-оранжевого цвета.

Хромистая сталь образует длинный пучок красноватых искр с характерно, утолщающимися звездочками.

Кремнистая сталь имеет особо яркое (белое) утолщение луча, объясняющееся выделением большого количества теплоты в результате горения кремния при высокой температуре, развиваемой окислением углерода.

Чугун в зависимости от химического состава (содержания углерода, марганца и др.) пускает различные искры, вид, форма и цвет которых определяются основными примесями.

Размер и начальная температура стружек-искр зависят главным образом от материала шлифуемой детали и от нагрузки на абразивное зерно.

Относительно большие по размерам стружки не плавятся потому, что теплота оказывается недостаточной для плавления значительной массы металла. При большем содержании углерода плавятся также и большие стружки, которые образуют яркие искры с большим количеством лучей.

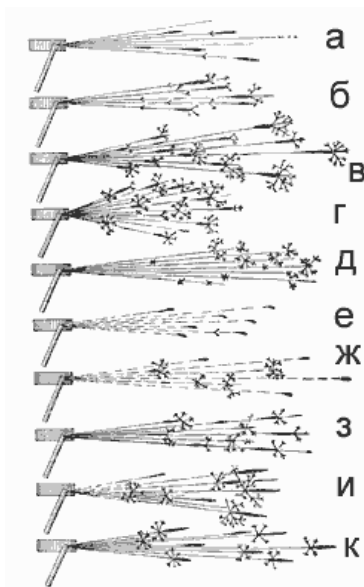


Рисунок 14. Вид искр при обработке различных сортов стали:

а - углеродистая мягкая, 0,12% С, цвет соломенно-желтый; б - углеродистая средней твердости, 0,5% С, цвет светло-желтый; в - углеродистая твердая 0,9% С, цвет ярко-желтый; г - углеродистая твердая, 1,2-1,4% С, цвет белый; д - марганцовистая твердая, 13% Mn, цвет темно-желтый блестящий; е - быстрорежущая, цвет темно-красный; ж - вольфрамовая, цвет темно-красный; з - кремнистая, цвет светло-желтый; и - хромистая, цвет в зависимости от содержания углерода; к - хромо-никелевая, 3-4% Ni и 1% Cr, цвет желтый

В заключение хотелось бы поговорить о проблеме сопоставимости реальных свойств материала заготовки и свойств, определяемых на образцах.

Достоверность свойств металла основных деталей, определяемых на стандартных образцах

В настоящее время для оценки свойств металлов используются стандартные образцы по ГОСТ 1497, ГОСТ 9651, ГОСТ 9454.

Применяемые в технике методы испытания механических свойств, развивавшиеся главным образом эмпирически, часто не дают возможности однозначно установить характер напряженного состояния, возникающего в образце под действием данных напряжений. Отчасти и само напряженное состояние изменяется по мере прохождения в материале процессов деформации и изменения внешней формы образца, причем эти изменения не поддаются детальному рассмотрению. Поэтому почти все получаемые характеристики механических свойств не представляют собой физически определенные величины; иногда они определяются лишь самими методами испытания. Применяя эти методы, необходимо всегда помнить, что они позволяют определить по существу лишь экспериментальные величины, при оценке которых обязательно следует учитывать условия их получения. Во многих случаях получаемые данные можно рассматривать лишь как вспомогательные.

При контроле свойств металла отливок образцы вырезаются из отдельно залитых пробных брусков, либо из предусмотренных литниковых «прибылей». Однако, свойства металла литой заготовки, зависящие от конфигурации и ее технологичности, химического состава и качества выплавляемой стали, условий кристаллизации, литейной технологии, полноты термической обработки, толщины стенок и других факторов могут значительно отличаться от механических свойств образцов, вырезанных из пробных брусков. Этот факт подтверждается результатами исследований в области выявления причин разрушения литых деталей арматуры и изучения свойств литого металла. Полученные на образцах значения механических свойств, удовлетворяющие требованиям нормативной документации, не являются залогом безотказной работы арматуры. Испытания на образцах-свидетелях – это компромисс для получения характеристик металла. Но если имеются значительные расхождения в свойствах, полученных на образцах-свидетелях, и образцах, вырезанных из детали, необходимо совершенствование системы отбора образцов, учитывающих размеры и конфигурацию детали.

Для образцов, вырезаемых из проката (поковок, штамповок), необходимо учитывать ориентацию относительно направления прокатки, в связи с анизотропией свойств (различные свойства вдоль и поперек деформированного металла). Результаты испытаний ударной вязкости образцов, вырезанный из одного и того же темплета стали могут значительно отличаться в зависимости от ориентации образца относительно направления волокон. Так, образцы, ось которых перпендикулярна направлению прокатки, будут иметь более низкие значения ударной вязкости.

При эксплуатации арматуры при низких температурах возрастает опасность хрупкого разрушения деталей - наиболее опасного вида разрушения, который протекает катастрофически быстро и может произойти даже при сравнительно невысоком уровне средних напряжений.

К факторам, способствующим хрупкому разрушению, кроме минусовых температур следует отнести:

- низкую пластичность, характерную для высокопрочных материалов;
- геометрические особенности конструкции детали;
- наличие дефектов металла детали, сварных швов и др. концентраторов напряжений;
- динамические и циклические нагрузки.

Трещиностойкость металла снижается по мере деградации свойств, вызываемой тепловым и радиационным воздействием, а также коррозией и усталостными повреждениями при циклическом нагружении детали. Последний фактор может иметь существенное значение для арматуры магистральных нефте- и газопроводов. В настоящее время стойкость при низких температурах оценивается по ударной вязкости, данного испытания, как показывает практический опыт, недостаточно. При обосновании прочности данной арматуры должен быть также выполнен расчет на трещиностойкость (сопротивление хрупкому разрушению). Расчет на трещиностойкость позволяет определить расчетные значения коэффициентов интенсивности напряжений на опасных.

Приложение 1: Методы испытания твердости

Испытание по методу Бринелля

Метод измерения твердости по Бринеллю регламентирован ГОСТ 9012.

Для проведения испытания на поверхности образца зачищают площадку размером $(3 \div 5) \text{ см}^2$

При определении твердости этим методом стальной шарик определенного диаметра D вдавливают в тестируемый образец под действием нагрузки P , приложенной перпендикулярно к поверхности образца, в течение определенного времени. После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка d . Число твердости по Бринеллю обозначается буквами HB, и его определяют путем деления нагрузки P на площадь поверхности сферического отпечатка F . На практике твердость определяют не по формулам, а по специальным таблицам, исходя из диаметра отпечатка d .

Из опасения возможной деформации шарика метод Бринелля не рекомендуется применять для стали с твердостью более 450 HB, а для цветных металлов – более 200 HB. Минимально допустимая толщина образца для корректного измерения твердости HB должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка h .

Временное сопротивление и число твердости по Бринеллю связаны между собой: для стали (углеродистые) $\sigma_b = 0,34 \text{ HB}$, для медных сплавов $\sigma_b = 0,45 \text{ HB}$, для алюминиевых сплавов $\sigma_b = 0,35 \text{ HB}$.

Для испытания более твердых металлов применяют метод Роквелла.

Испытание по методу Роквелла

Метод измерения твердости по Роквеллу регламентирован ГОСТ 9013.

При испытании по методу Роквелла индентором служит алмазный конус или (для более мягких материалов) маленький стальной шарик. Испытание производится путем последовательного вдавливания в испытуемый образец индентора сначала с предварительной нагрузкой P_0 , затем основной P_1 . При этом общая нагрузка равна сумме предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок.

Имеется три шкалы

- по шкале С определяют значения твердости более твердых материалов, чем методом Бринелля (твердость более 450 HB). Применяют алмазный конус и общую нагрузку 1500 Н. Стальной шарик деформировался бы.
- по шкале В определяют твердость сравнительно мягких материалов ($< 400 \text{ HB}$) если при испытании берется стальной шарик и общая нагрузка 1000 Н, то твердость отсчитывается по шкале "В" и обозначается HRB;
- шкала А используется для определения твердости тонких ($0,5 \div 1,0 \text{ мм}$) поверхностных слоев или очень твердых материалов. Для испытания используют алмазный конус и общую нагрузку 600 Н. Твердость отсчитывается по шкале "А" и обозначается HRA.

Единица твердости по Роквеллу - безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002 мм.

Испытание по методу Виккерса

Метод измерения твердости по Виккерсу регламентируется ГОСТ 2999.

Метод используют для определения твердости деталей и металлопродукции малой толщины, а также тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость.

Значение твердости определяют путем вдавливания правильной четырехгранной пирамиды под действием нагрузки P в течение времени выдержки. Измерения проводят путем измерения диагоналей отпечатка, оставшегося на поверхности материала – d_1 , d_2 и вычисляют их среднее арифметическое значение – d , мм (рисунок 1).

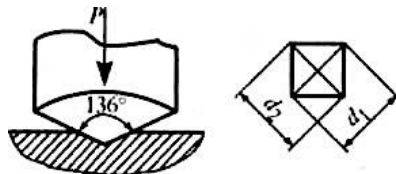


Рисунок 1. Схема измерения твердости по Виккерсу

Нагрузка меняется от 10 до 1000 Н. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть прилагаемая нагрузка. Значения твердости по Виккерсу при стандартных нагрузках и зависимости от длины диагонали d (мм) даны в соответствующих таблицах.

Число твердости по Виккерсу обозначают цифрами, характеризующими величину твердости со стоящим после них символом HV (например, 200 HV). Иногда после символа HV указывают нагрузку и время выдержки, например: 200 HV 10/40 - твердость по Виккерсу, полученная при нагрузке $P = 10$ кгс и времени выдержки под нагрузкой 40 с.

Точного перевода чисел твердости по Виккерсу на числа твердости, полученные другими методами, или на механические свойства при растяжении не существует и таких переводов (за исключением частных случаев) следует избегать.

Испытания по Шору

Метод измерения твердости материалов по Шору используется для измерения твердости таких материалов как: пластмасса, эластомеры, каучуки и продуктов их вулканизации.

В качестве индентора - стальной стержень. Приборы – склеростопы.

Существует несколько шкал: А для мягких материалов, D – более твердых. Сопоставление шкал приведено на схеме 1.

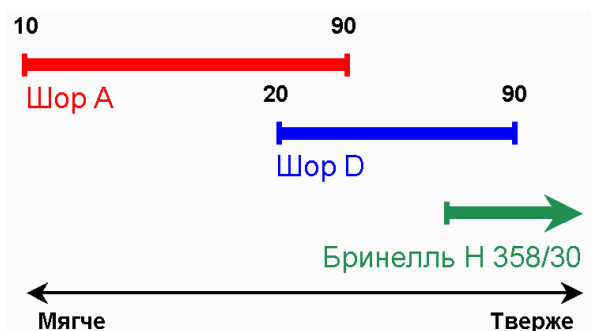


Схема 1. Сопоставление шкал

Измерение микротвердости

В некоторых случаях определяют микротвердость (ГОСТ 9450-75) отдельных участков металла. Этот метод используют для измерения твердости изделий мелких размеров и отдельных зерен (структурных

составляющих) или очень тонких слоев. Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания под небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа.

Очень примечательный метод, потому как в силу очень малого размера индентора этот метод позволяет измерять твердость очень малых объектов, таких как, например, зерна, структурные составляющие, неметаллические включения и др.

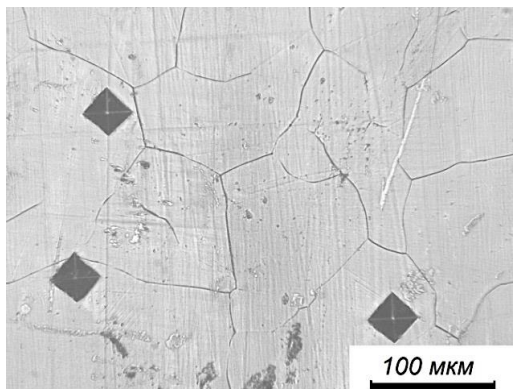


Рисунок 2. Пример измерения микротвердости