



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Материаловедение

Лекция 9: Контроль качества.

Разрушающие методы контроля

Семенова Елена
Инженер-проектировщик 1 категории

12.11.2024

Механические свойства металлов.

Основные понятия



Чтобы корректно выбрать материал для изготовления деталей, необходимо знать какими свойствами он обладает при воздействии на него внешних сил. Чтобы их узнать – нужно определить.

Важным является определение не только комплекса необходимых свойств материалов, обеспечивающих надежную и долговечную работу оборудования в заданных условиях эксплуатации, а также установить необходимый и достаточный уровень объема и методов контроля

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

Механические свойства металлов.

Основные понятия



Механическими свойствами стали называют совокупность характеристик свойств, определяющих ее способность сопротивляться воздействию на нее различных нагрузок, возникающих при воздействии рабочих условий (давление, температура, нагрузки, рабочая среда).

Определяются структурой материала, которая, в свою очередь, зависит от легирования и термической обработки.

К механическим свойствам относятся следующие характеристики:

- прочность
- пластичность
- вязкость
- твердость
- ударная вязкость

Оценивают механические свойства сталей на стандартных образцах по пределу прочности, пределу текучести, относительным удлинению и сужению. Механические свойства позволяют определить пределы нагрузки для каждого конкретного материала.

Для получения сопоставимых результатов образцы и методики проведения механических испытаний регламентированы ГОСТ.

Механические свойства металлов. Термины



Прочность – способность металла или сплава **противостоять деформации и разрушению** под действием приложенных нагрузок - растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих.

Нагрузки могут быть:

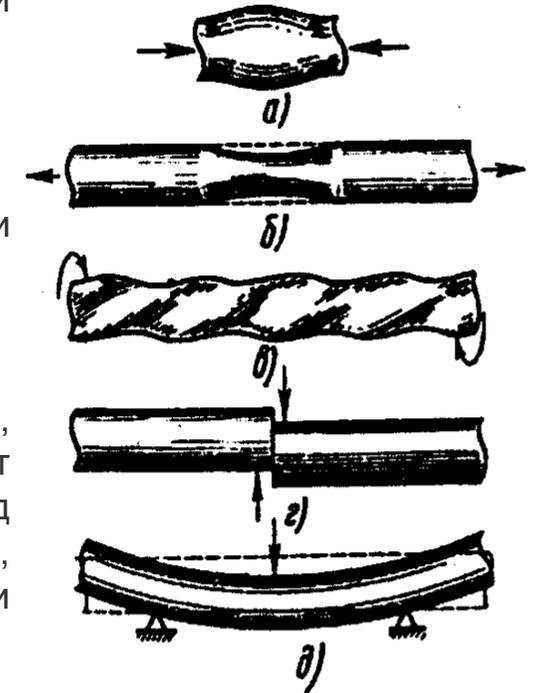
- внешними (вес, давление и др.)
- внутренними (изменение размеров тела от нагревания и охлаждения, изменение структуры металла и т.д.)
- статическими, т.е. постоянными по величине и направлению действия
- динамическими, т.е. переменными по величине, направлению и продолжительности действия

Интенсивность силы, действующей на образец, называется **напряжением** и измеряется как полная сила, отнесенная к площади, на которую она действует. Приложенные 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. В действительности материал может подвергаться одному или нескольким видам деформации одновременно.

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**. В кристаллической решетке металла происходит необратимое перемещение атомов, причем сплошность тела не нарушается. В результате развития пластической деформации может произойти пластическое (вязкое) разрушение путем сдвига



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

Механические свойства металлов. Термины



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.

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 оборудования под давлением работают под нагрузками 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.



К испытаниям механических свойств предъявляется ряд требований:

- температурно-силовые условия проведения испытаний должны быть по возможности приближены к условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях
- методы испытаний должны быть достаточно простыми и пригодными для массового контроля качества заготовок/полуфабрикатов
- методы проведения должны быть строго регламентированы

Наибольшее распространение имеют следующие **виды механических испытаний**:

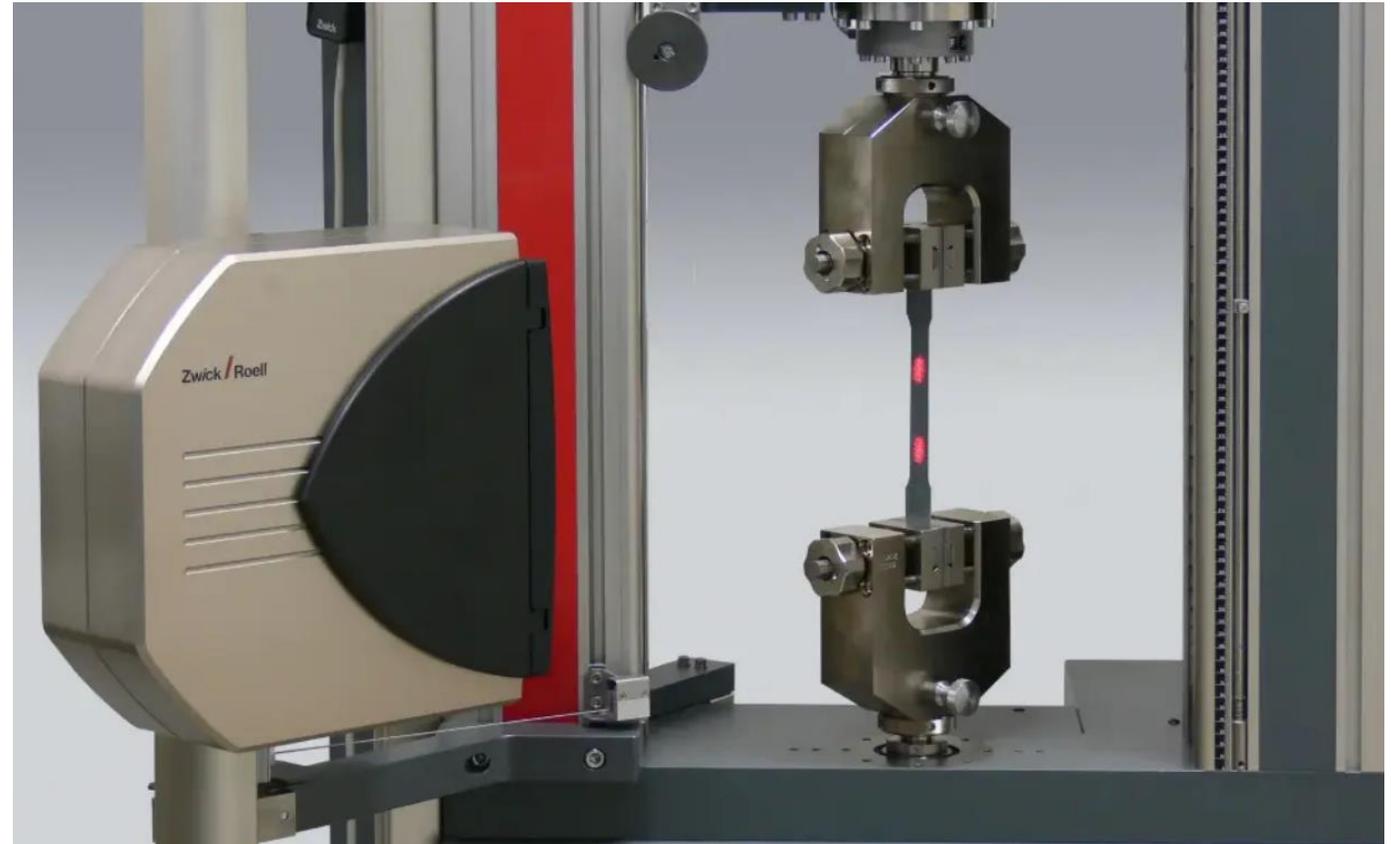
- **статические кратковременные испытания** однократным нагружением на одноосное растяжение – сжатие, твердость, изгиб и кручение
- **динамические испытания** с определением ударной вязкости и ее составляющих – удельной работы зарождения и развития трещины
- **испытания переменной нагрузкой** с определением 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

Статические испытания: испытание на растяжение



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Испытание на растяжение — лучший способ продемонстрировать упругое и пластическое поведение металлов. При растяжении образец подвергается воздействию непрерывно увеличивающейся одноосной растягивающей силы с одновременным наблюдением за удлинением образца. При испытании на растяжение образец на специальной разрывной машине растягивают под действием плавно возрастающей нагрузки и доводят до разрушения, самописец вычерчивает кривую деформации, называемую **диаграммой растяжения**.



Испытания на растяжение



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 0С – 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

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

- предел прочности, σ (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 %)

Испытание на растяжение. Образцы

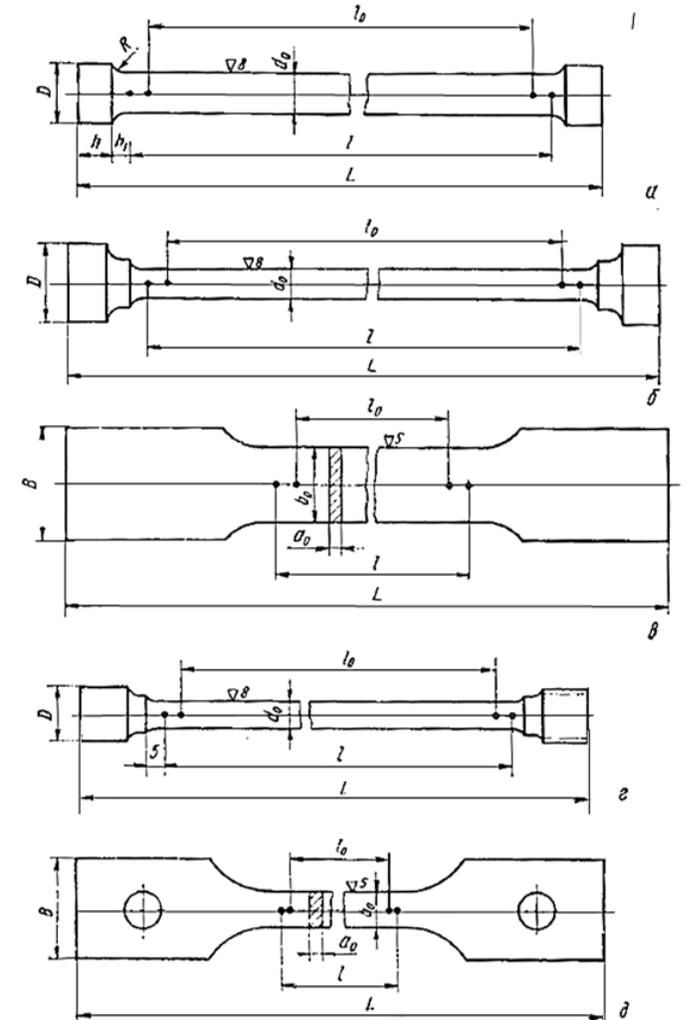
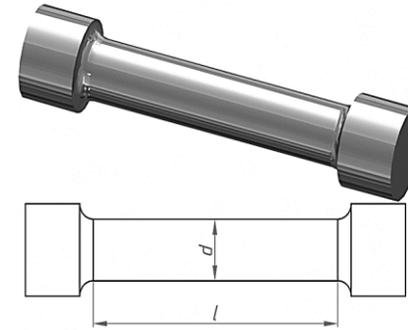


Для статических испытаний на разрыв используют круглые (цилиндрические) или плоские образцы (при испытаниях листовых материалов)

Образец состоит из рабочей части и головок, 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)



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

Испытание на растяжение. Образцы

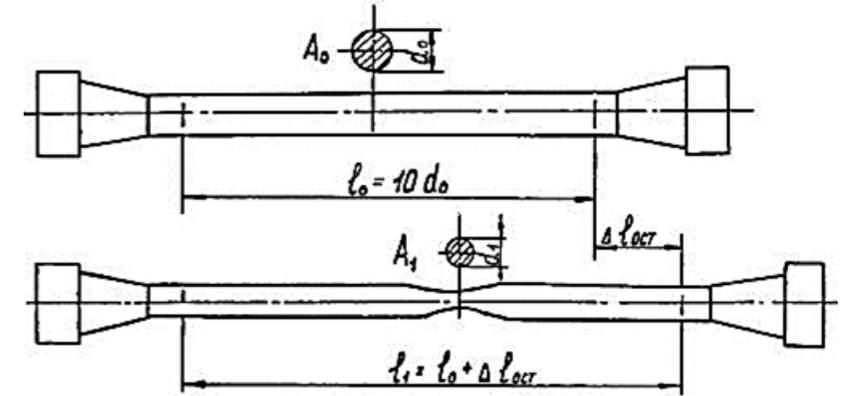
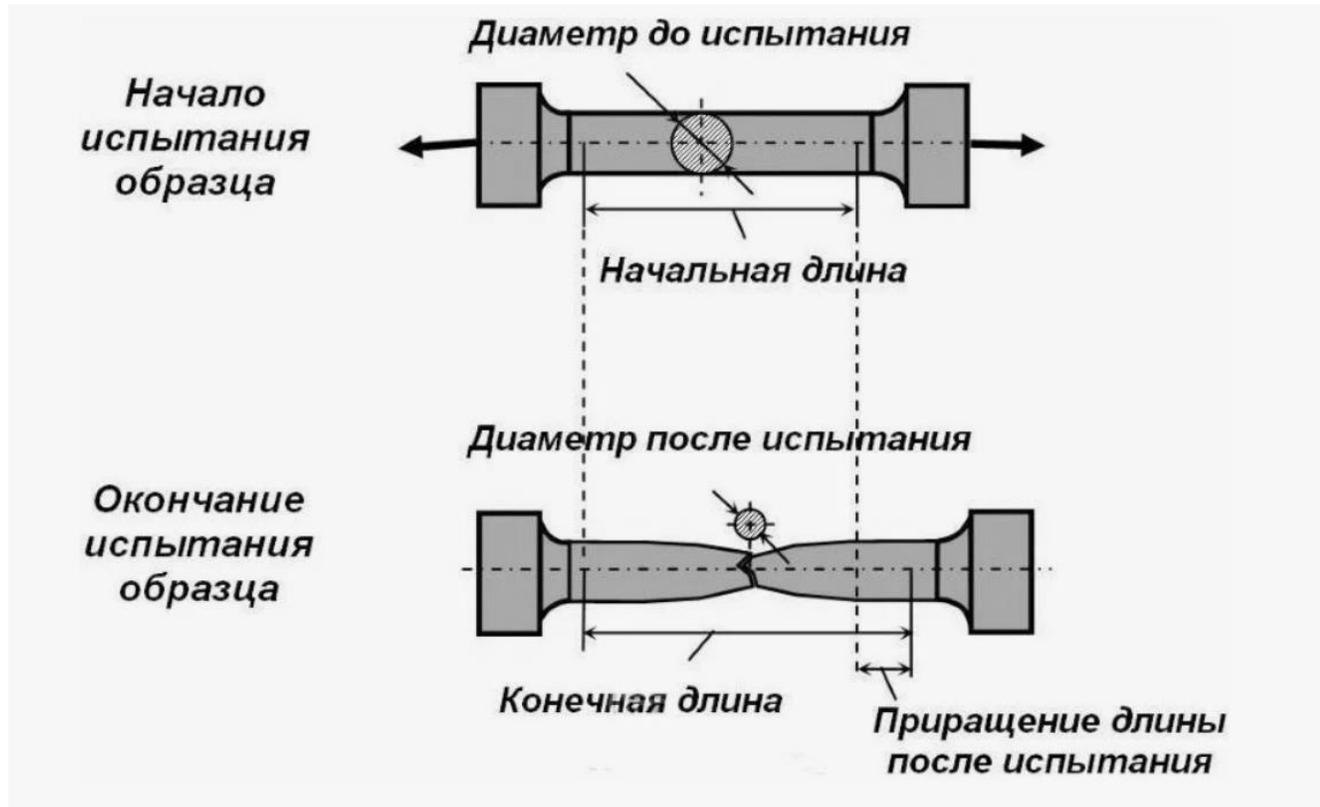
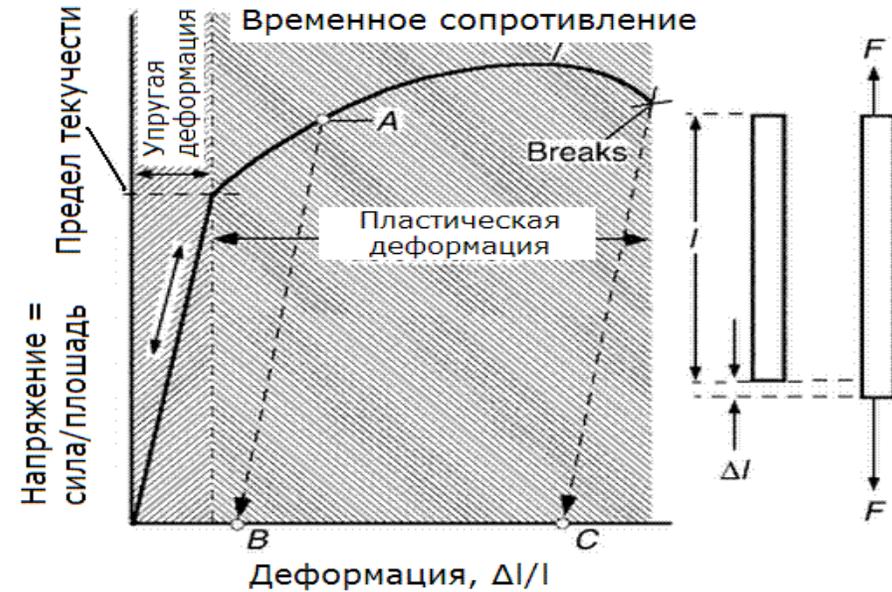
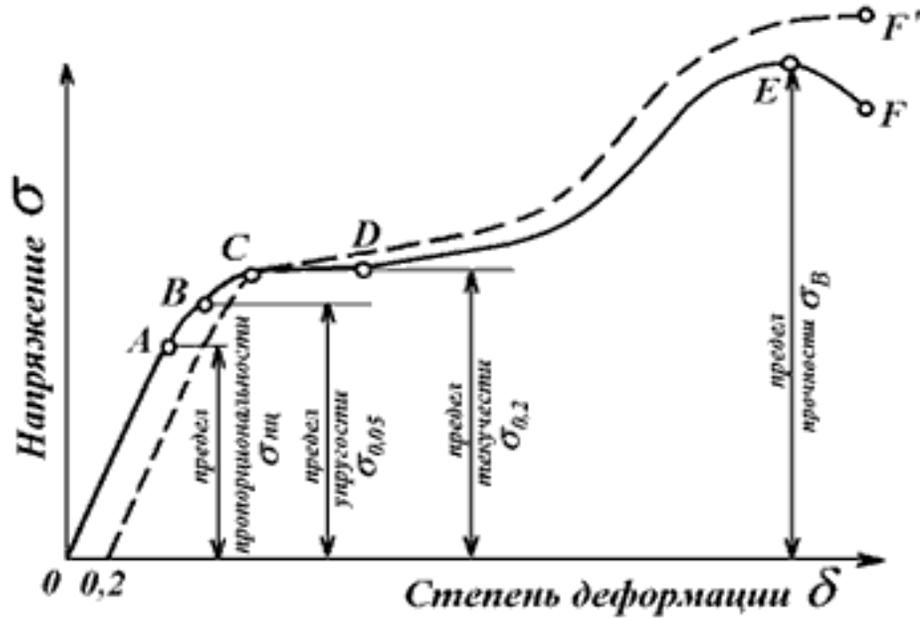


Диаграмма растяжения



Диаграмму растяжения можно разделить на две области: **упругую** и **пластическая область**. На участке 0-A удлинение образца увеличивается прямо пропорционально возрастанию нагрузки – участок упругой деформации, **характеризует жесткость** материала. При повышении нагрузки свыше A, на участке A-B прямая пропорциональность нарушается, но деформация остается упругой (обратимой).

В конце упругого участка диаграммы растяжения напряжения в образце достигают некоторого критического уровня, который называют **предел текучести**. **Наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки («течет») – физический предел текучести σ_T** . Деформирование образца переходит в пластическую область. Площадка текучести - это горизонтальный участок диаграммы, который соответствует напряжению в материале, при котором увеличение деформации происходит без увеличения напряжения. На этом участке происходит существенное изменение длины образца без заметного увеличения нагрузки. Выше площадки текучести нагрузка возрастает до точки E, после чего начинается падение нагрузки, связанное с образованием местного утонения образца (шейки на образце). Затем напряжения разрывают образец на две части. Максимальное напряжение – **временное сопротивление или предел прочности при растяжении**.

Диаграмма растяжения

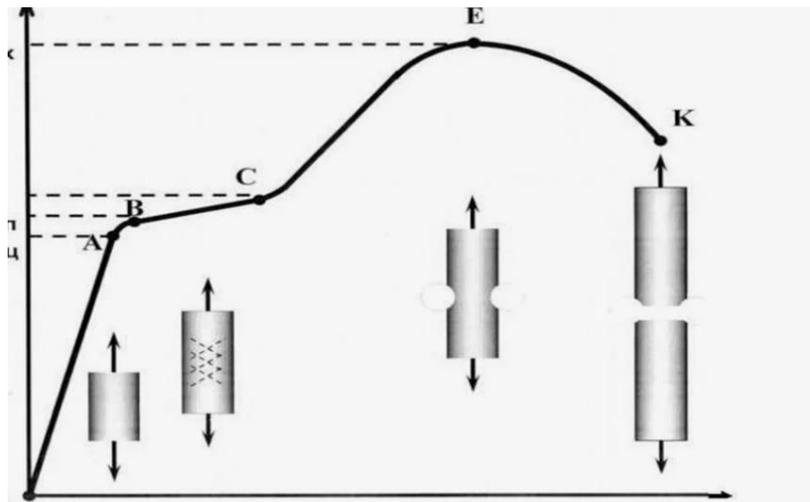


Диаграмма растяжения пластичного материала

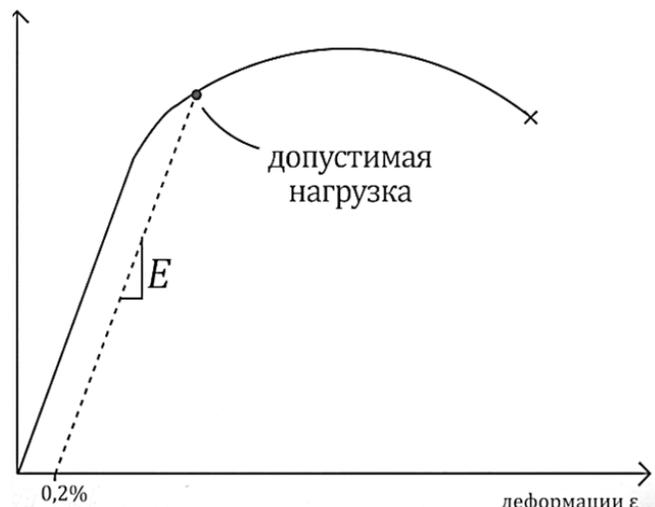


Диаграмма растяжения для хрупкого-пластичного материала: материал значительно деформируется



У хрупкого материала отсутствует или незначителен переход из упругого в пластическое состояние. Нет площадки текучести, почти не деформируются – разрушаются

Если нет площадки текучести, то определяют условный предел текучести, при котором образец получает остаточное удлинение, равное 0,2% первоначальной расчетной длины

Величина пластической деформации к моменту разрушения характеризует пластичность материала. Различают две характеристики пластичности материала: **относительное удлинение и сужение**.

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.

Относительное сужение – это характеристика, определяющая разницу между первоначальной площадью сечения образца и её размером в момент разрыва, отнесённую к первоначальной величине

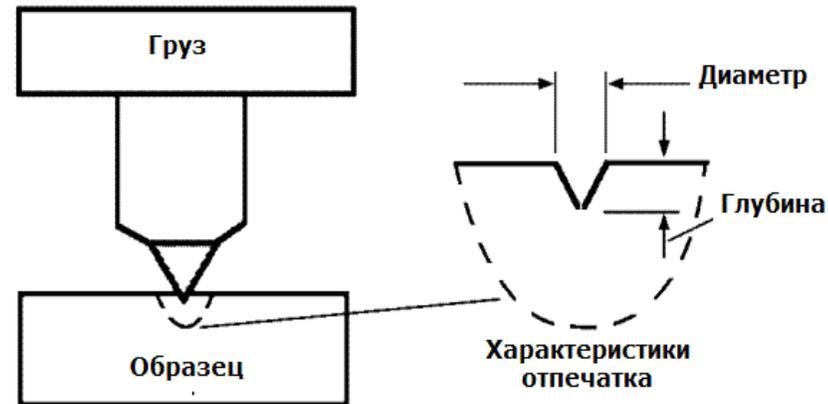
Чем выше значения относительного удлинения и сужения для материала, тем он более пластичен. Условно принято считать металл надежным при $\delta > 15\%$, $\psi > 45\%$. У хрупких металлов относительные удлинение и сужение стремятся к нулю.

Испытания на твердость



Твердость – свойство материала оказывать сопротивление деформации в поверхностном слое при местных контактных воздействиях.

При испытаниях на твердость механические свойства сталей оценивают путем внедрения в него при заданном усилии твердого материала – индентора. В результате испытания в материале образуется отпечаток – по его размерам судят от твердости стали



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: значение твердости определяют по диагонали отпечатка алмазной пирамиды, применяют для деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев

Испытания на твердость

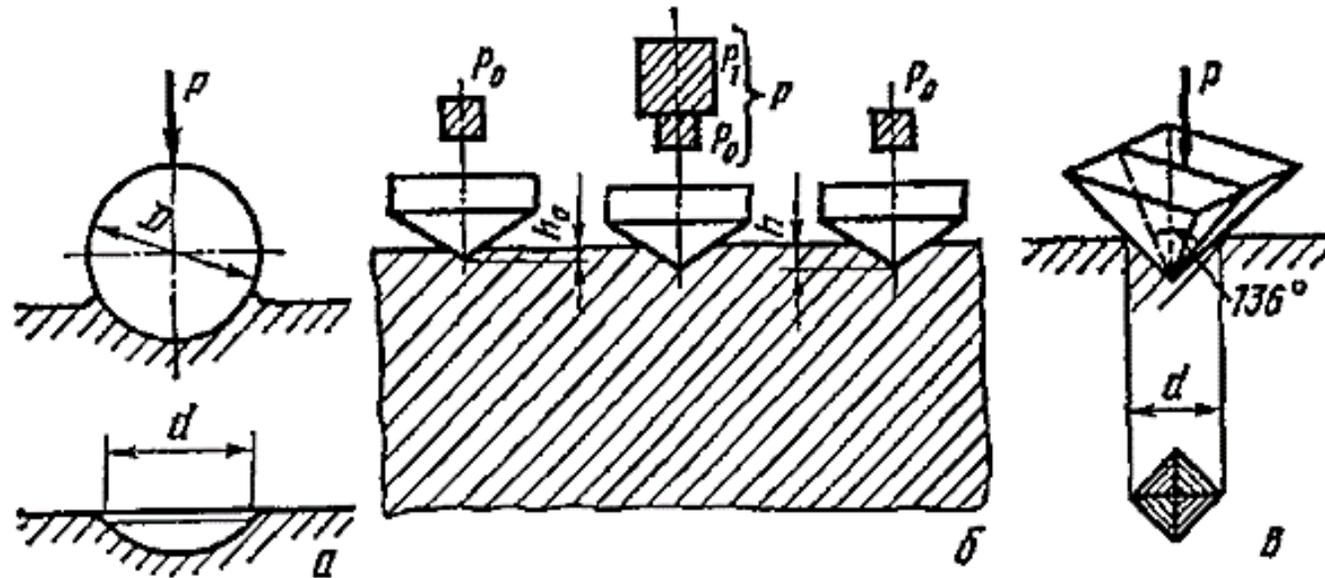


Схема определения твердости:
а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Испытания на твердость



Испытание по методу Бринелля [НВ], 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 . Твердость определяют по специальным таблицам, исходя из диаметра отпечатка d .

Метод Бринелля не рекомендуется применять для стали с твердостью более 450 НВ, а для цветных металлов – более 200 НВ. Минимально допустимая толщина образца для корректного измерения твердости НВ должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка h .

Испытание по методу Роквелла [HRC, HRB, HRA], 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 НВ). Применяют алмазный конус и общую нагрузку 1500 Н. Стальной шарик деформировался бы
- по шкале В определяют твердость сравнительно мягких материалов (< 400 НВ) 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 ($0,5 \div 1,0$ 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

Испытания на твердость



Метод измерения твердости по Виккерсу [HV], ГОСТ 2999

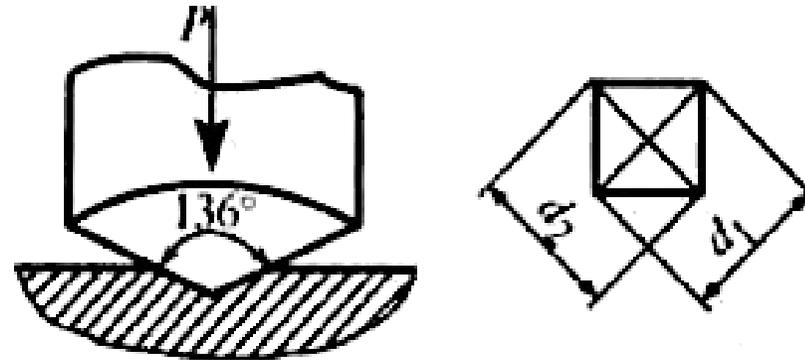
Метод используют для определения твердости деталей и металлопродукции малой толщины, а также тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость.

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

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.

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 на твердость

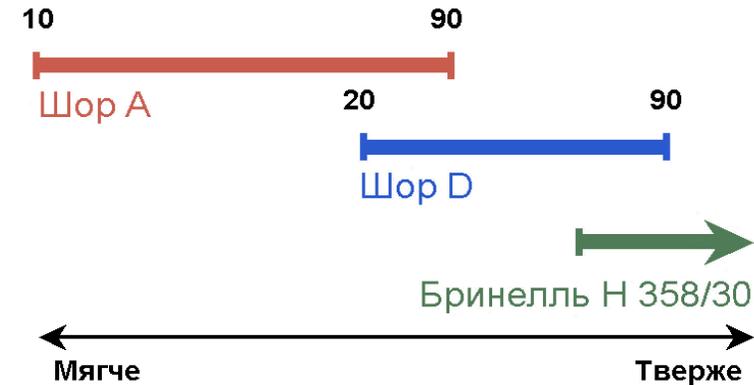
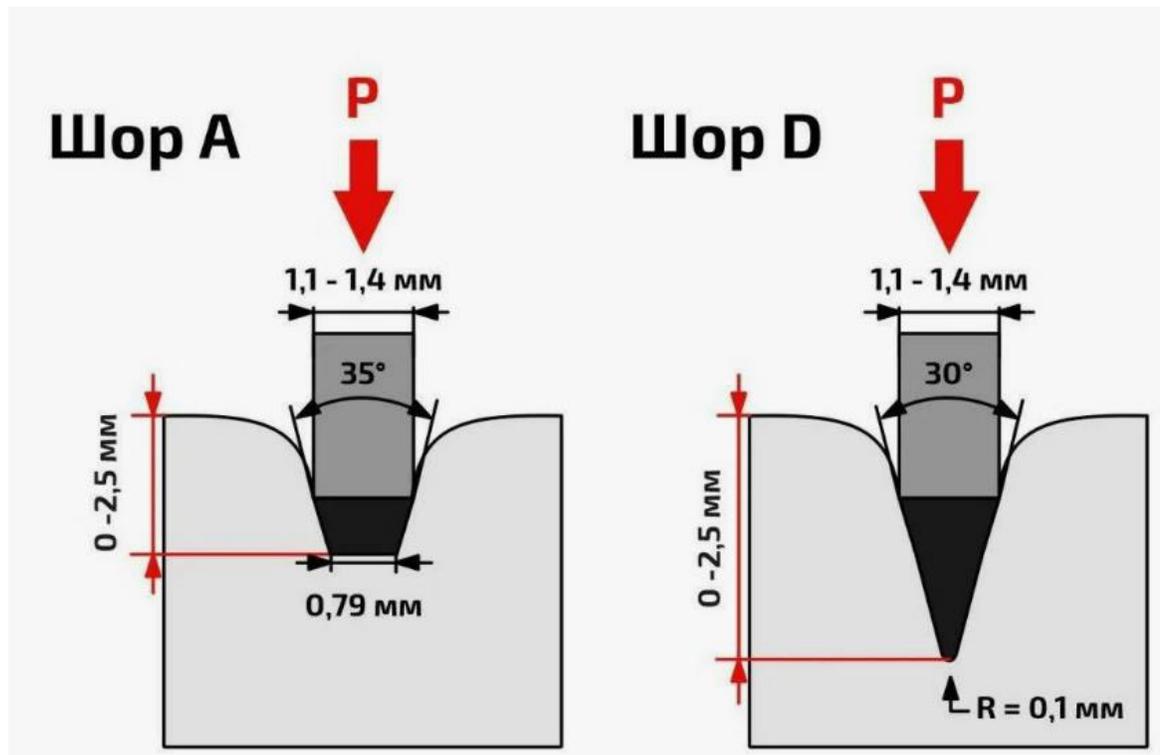


Метод измерения твердости материалов по Шору, ГОСТ 263

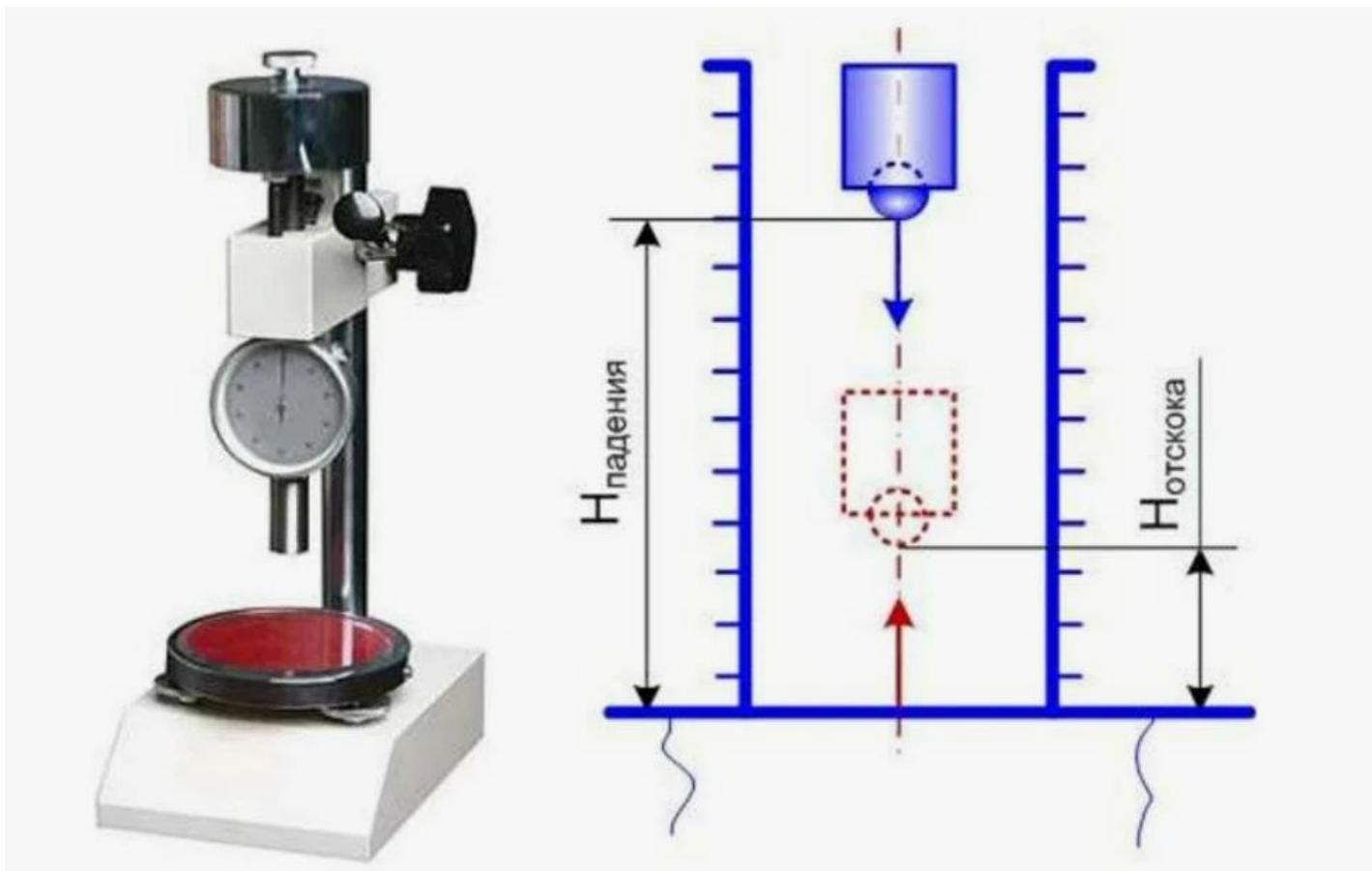
Используется для измерения твердости таких материалов как: пластмасса, эластомеры, каучуки и продуктов их вулканизации

В качестве индентора - стальной стержень. Приборы – склеростопы.

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



Испытания на твердость



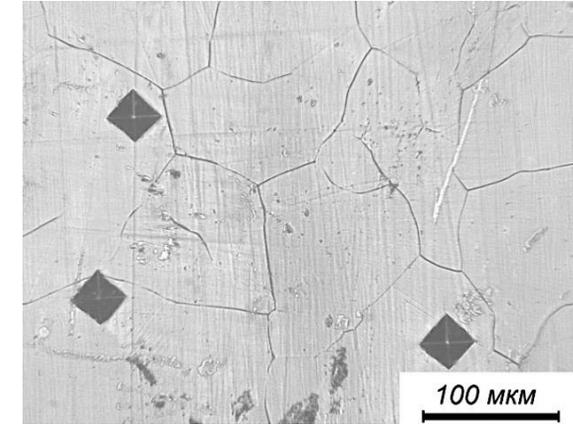
Микротвердость



Регламентируется ГОСТ 9450-75

Метод используют для измерения твердости изделий мелких размеров и отдельных зерен (структурных составляющих) или очень тонких слоев (покрытий). Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания под небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа.

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



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.

Но для приближенной оценки статической прочности допустимо использовать значения твердости. 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 обычно 45 HRC и выше. Твердость 45 HRC соответствует прочности при растяжении 1480 МПа. Для стали справедливо эмпирическое соотношение $\sigma_v = HB/3$.

Динамические испытания



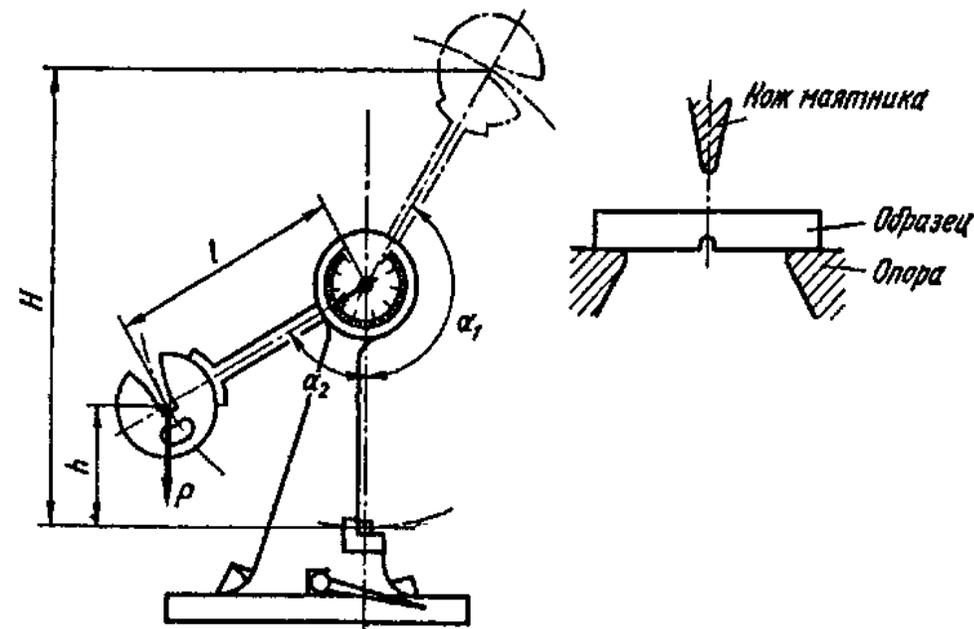
Важным механическим свойством стали является ее **вязкость**. Обычно термин вязкость применяют, как меру способности металла **разрушаться не хрупко**. Для оценки склонности материала к хрупкому разрушению проводят испытания ударной вязкости и определение температуры хрупко-вязкого перехода.

Испытания производятся в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 9454-78.

Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра при интересующей температуре либо с диапазоне температур для определения температуры перехода от пластического разрушения к хрупкому – **температуры вязко-хрупкого перехода**. Она определяется как температура, ниже которой происходит хрупкое разрушение.

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.

Испытания проводят стандартных образцах, имеющих форму квадратных брусочков с различным типом надреза. Испытывают образец на маятниковых копрах. Свободно падающий маятник копра ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу. При этом фиксируется работа, затраченная на излом

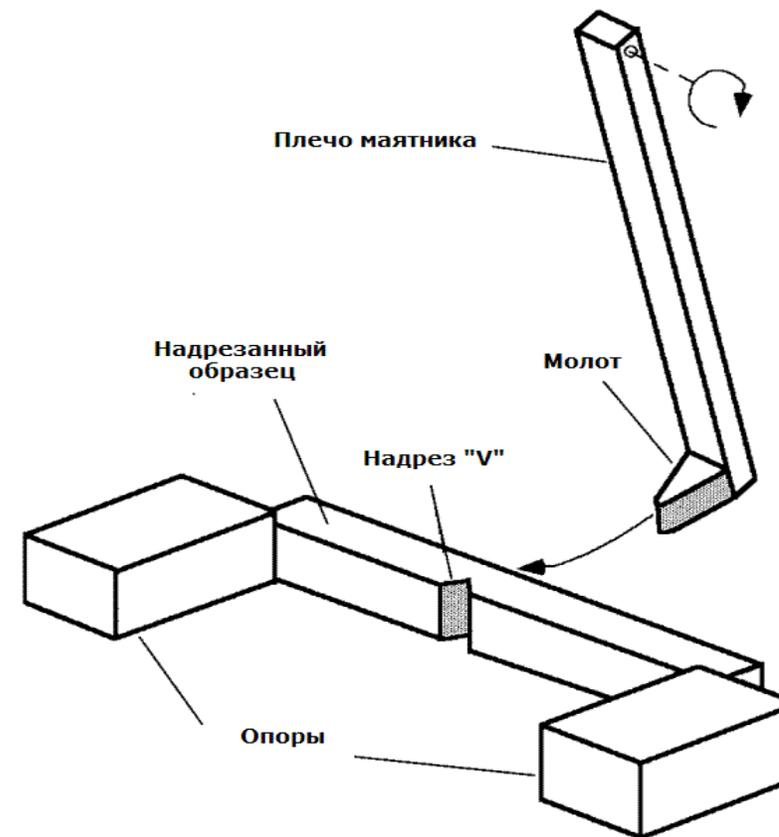
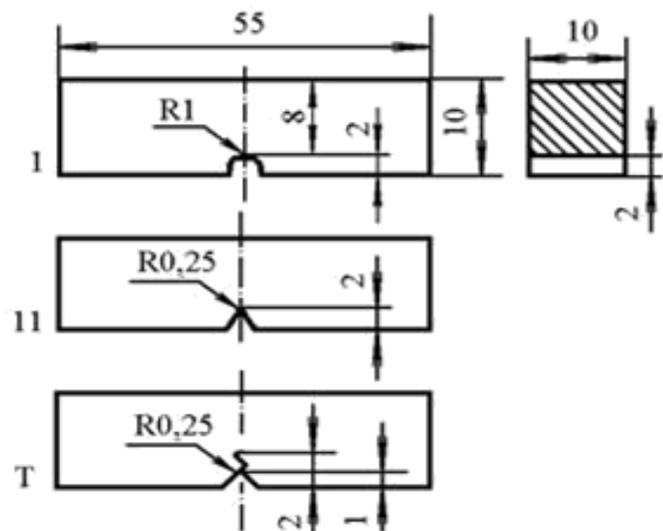


Динамические испытания



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 инициированной трещиной (тип T) (рисунок 8). Вид надреза входит в обозначение работы удара и ударной вязкости, соответственно, обозначают буквами: KCU, KCV, KCT.

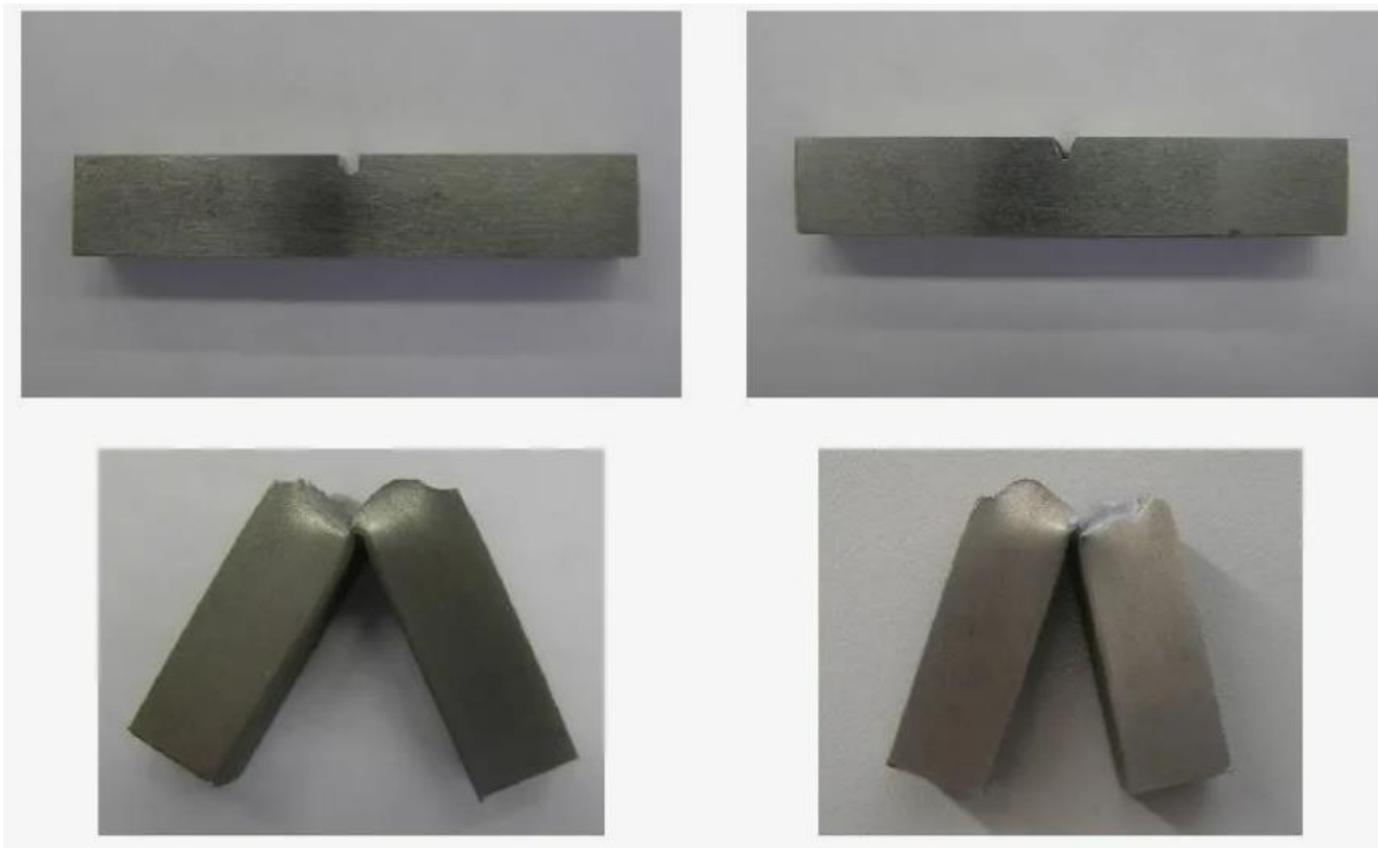
Обычные образцы имеют сечение 10×10 мм, но для особо ответственных случаев и для оценки работоспособности крупных деталей применяют образцы сечением 25×25 мм с инициированной трещиной. Чем острее надрез, тем более жестким испытаниям подвергается металл. Для испытаний ударной вязкости металла для деталей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



Динамические испытания. Образцы



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ



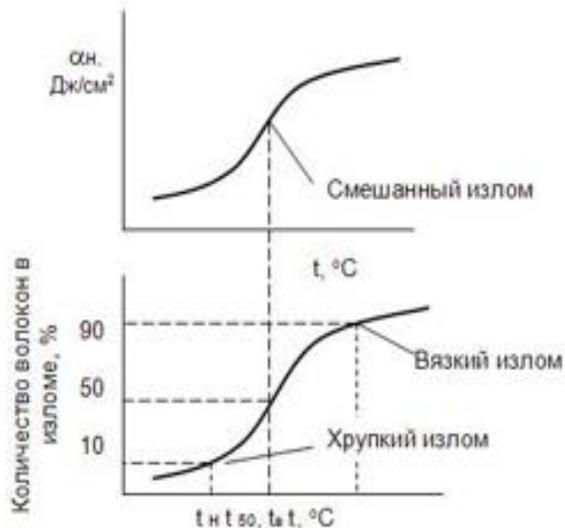
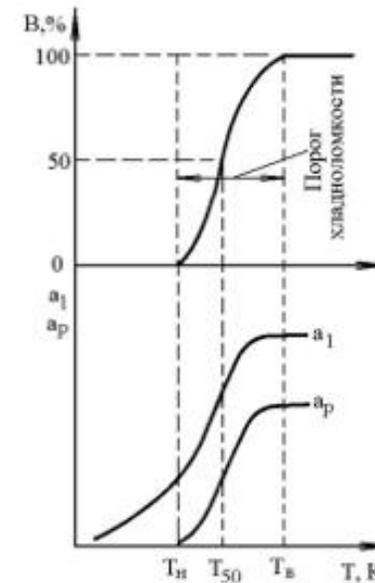
Динамические испытания



Испытания ударной вязкости широко применяют для оценки склонности металла к хрупкому разрушению при низких температурах.

Хладноломкость – переход от вязкого характера разрушения к хрупкому. Это явление называется хладноломкость. **Критическая температура хрупкости или порог хладноломкости** – температура перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому и наоборот. За критическую температуру принимают температуру, при которой доля волокнистой составляющей структуры равна 50 %.

Для оценки хладноломкости обычно проводят испытания серии образцов при понижающихся температурах с шагом $30 \div 50$ °С. По результатам испытаний строят кривые зависимости ударной вязкости от температуры – сериальные кривые хладноломкости



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.

Чем ниже порог хладноломкости, тем больше запас вязкости материала, тем выше ударная вязкость материала.

Низкотемпературные испытания. Хладноломкость

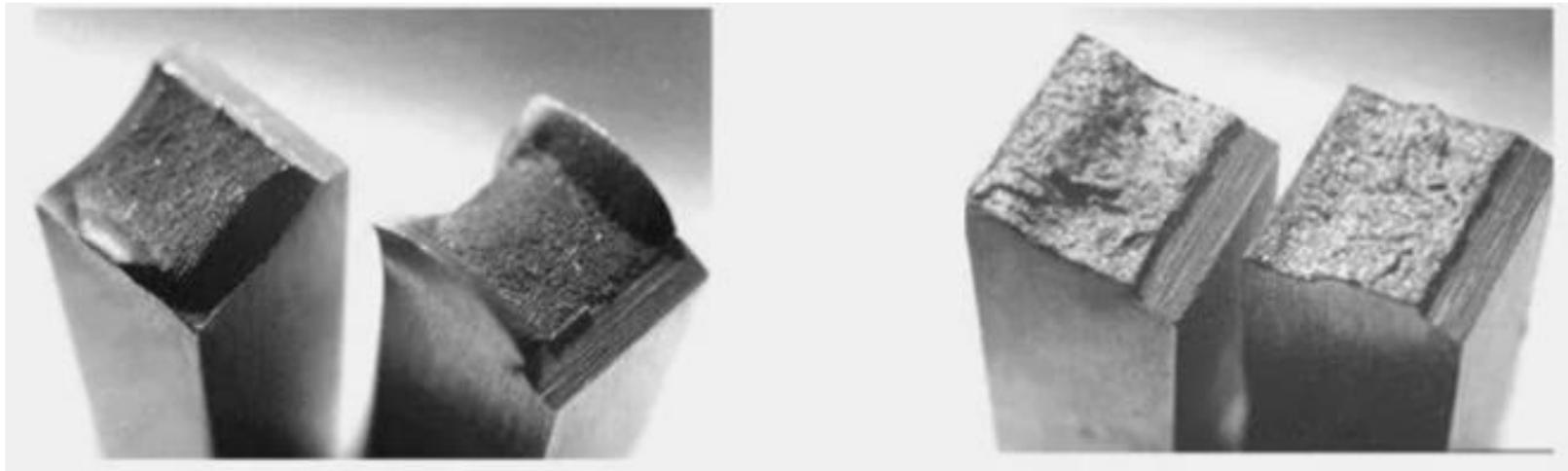


АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Оценку хладноломкости иногда 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.



Вязкий излом – темный

*Хрупкий излом – светлый,
блестящий, металлический*

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.

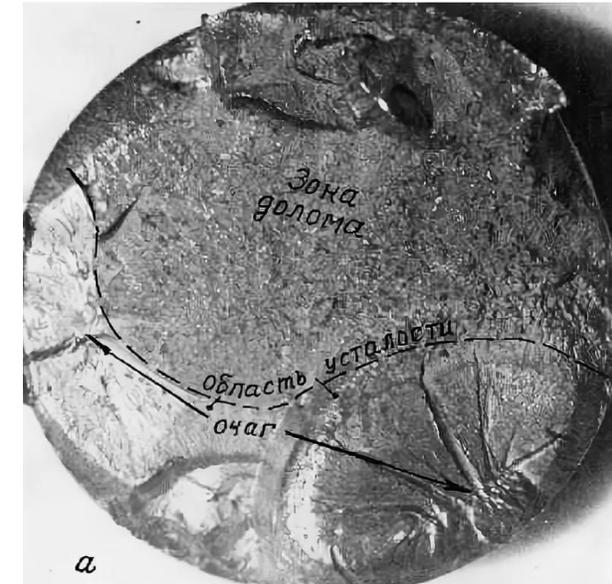
Усталость – процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к образованию трещин и разрушению. Усталость металла обусловлена концентрацией напряжений в отдельных его объемах, в которых имеются неметаллические включения, газовые пузыри, различные местные дефекты и т. д.

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.

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.

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.

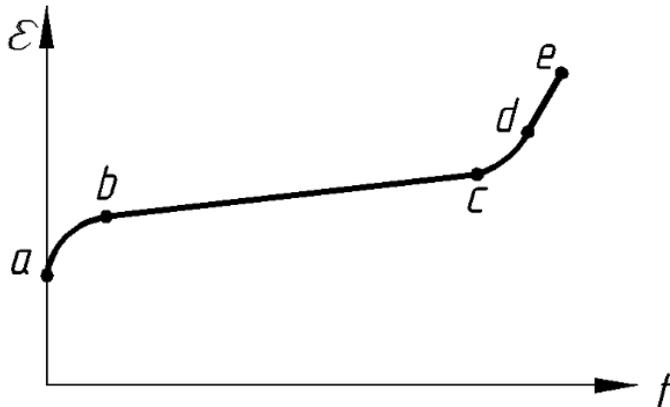


Испытания на ползучесть



Руководящим документом на проведение испытаний является ГОСТ 3248-81.

Непрерывную пластическую деформацию твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки называют **ползучестью**. Ползучести в той или иной мере подвержены все твёрдые тела при температурах от криогенных до близких к температуре плавления. Деформация и скорость ползучести увеличиваются с возрастанием температуры, поэтому действие ползучести особенно появляется при повышенных температурах. Ползучесть материалов описывают кривой ползучести, которая представляет собой зависимость деформации от времени при постоянной температуре и приложенной нагрузке.



Участок **ab** кривой возникает при приложении нагрузки почти мгновенно (1 стадия) – это участок неустановившейся ползучести, который характеризуют постепенным уменьшением скорости возрастания деформации. На втором участке **bc** имеем установившуюся ползучесть с постоянной скоростью роста деформации (2 стадия). Третий участок **cd** отражает постепенное нарастание скорости деформации, которое объясняется накоплением микроскопических трещин, усиливающих процесс накопления остаточных деформаций металла. На четвертом участке **de** происходит быстрое слияние микротрещин и прогрессирующее разрушение образца.

Стандартные испытания на ползучесть при растяжении проводят с целью определения **предела ползучести материала**.

Предел ползучести – это наибольшее условное растягивающее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенное время достигает заданной величины. В случае высокотемпературной ползучести имеется в виду скорость на установившейся стадии

Сущность метода состоит в том, что образец подвергается воздействию постоянной растягивающей нагрузки и постоянной температуры при фиксировании деформации образца во времени

Испытания проводят на образцах, рабочая часть которых имеет круглое или прямоугольное сечение

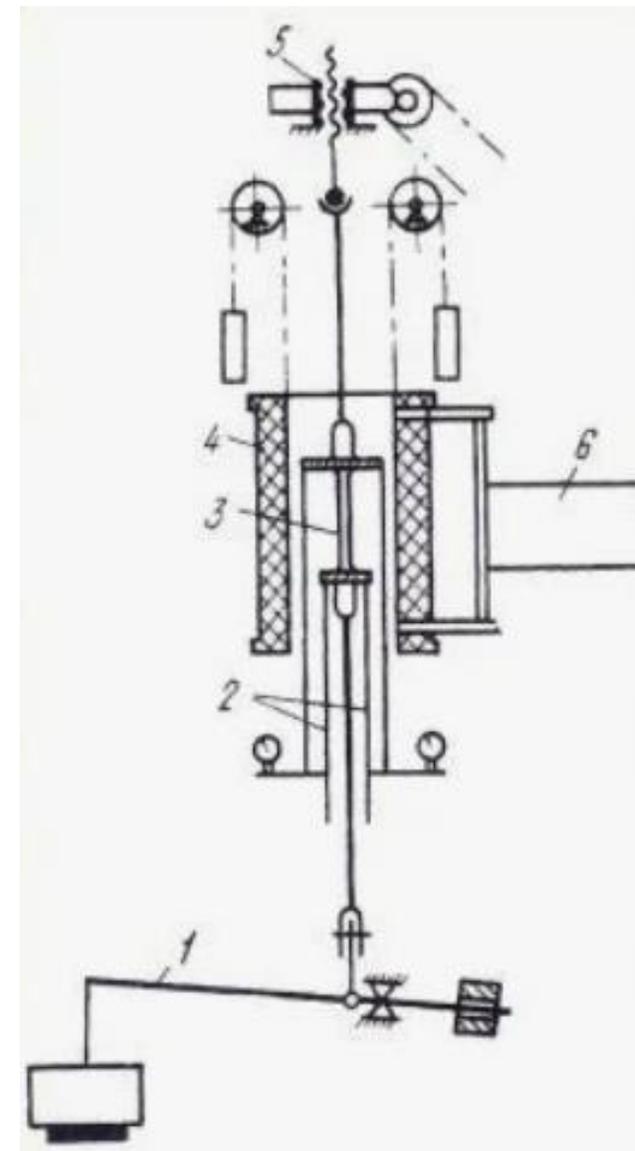
Испытания на ползучесть



Испытательная машина состоит из следующих основных блоков: нагружающего устройства, нагревательной печи с терморегулятором, приборов для измерения температуры, и деформации.

Нагрузка на образец обычно подается через рычажную систему.

Нагружение образца 3 производится рычажной системой 1, соединенной с нижним захватом. Верхний захват связан с механизмом 5, обеспечивающим перемещение образца вдоль вертикальной оси печи. В этой и многих других машинах во время испытания постоянной поддерживается нагрузка, а не напряжение, которое со временем может несколько повышаться из-за сужения образца. Для обеспечения постоянства напряжения необходимо использовать специальные устройства, автоматически уменьшающие нагрузку по мере удлинения образца.



Испытания на длительную прочность



Испытания регламентированы ГОСТ 10145 - 81

Длительной прочностью – называется сопротивление материала механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки при высокой температуре.

Различают длительную прочность при растяжении, кручении и изгибе, а также в сложнапряженном состоянии, например, растяжение и изгиб, растяжение и кручение.

Длительная прочность характеризуется пределом длительной прочности, который чаще всего определяют при растяжении.

Предел длительной прочности характеризует способность материала противостоять разрушению при длительном воздействии температуры и напряжения. Длительная прочность большинства материалов с повышением температуры снижается и зависит от химического состава, микроструктуры (размера зерна, формы, размера и характера распределения упрочняющих частиц), состояния поверхности образцов (снижение при увеличении шероховатости), окружающей среды. Испытание на длительную прочность при температурах до 1200°C заключается в том, что образец доводится до разрушения под действием постоянной растягивающей нагрузки при постоянной температуре. Результатом испытания каждого из серии образцов являются три характеристики: время до разрушения (долговечность), относительное удлинение, относительное сужение. В результате испытаний определяют предел длительной прочности на базе испытаний 50..10.000 ч.

Пределом длительной прочности – называется наибольшее напряжение, не вызывающее разрушение металла при определенной температуре за установленное время испытания (срок службы).

Металлографические методы испытаний.

Макроструктура



Свойства металла в значительной степени зависят от их строения

При изучении строения металла различают:

макроструктуру – строение металла, видимое невооруженным глазом;

микроструктуру – строение металла, определяемое металлографическими методами с использованием различных типов микроскопов

Макроструктуру металла изучают путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов - продольных или поперечных макрошлифов (темплетов) или изломов - невооруженным глазом и 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, нафталинистый и т.д.

Металлографические методы испытаний.

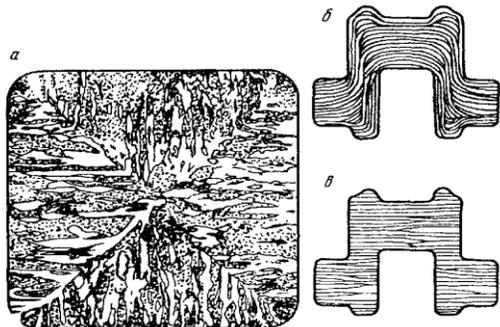
Макроструктура



Макроструктуру исследуют:

по излому (определяют размер зерна, наличие металлургических дефектов, характер разрушения)

по макрошлифу (выявляют форму, размер и расположение зёрен, направление волокон в поковках и штамповках, наличие металлургических дефектов)



*а – литая сталь (поперечное сечение слитка;
б – ковкая деталь;
в – прокат*



Излом



Шлиф

Большое значение для успешного проведения макроанализа имеет правильный выбор наиболее характерного для исследуемой детали сечения или места излома. 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 ($60 \div 80$) °С 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.

Металлографические методы испытаний.

Микроструктура



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).

Методика проведения регламентирована ГОСТ 1778

Микроструктурный анализ позволяет:

- изучить форму, величину и взаимное расположение зёрен, из которых состоит металл
- определить структурно-фазовый состав сплавов
- определить неметаллические включения и внутренние дефекты кристаллического строения сплавов
- установить, какие изменения внутреннего строения происходят в исследуемом материале под влиянием различных воздействий (термической и химико-термической обработки, обработки давлением, сварки и пр.)

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 чугуна).

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.

Методы определения химического состава



Химическим анализом называют получение информации о составе и структуре вещества.

Одни методы 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.

По способу выполнения разделяют на:

- химические (посредством химических реакций) – мокрая химия
- физические и физико-химические (инструментальные) – 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



Стилоскопирование – метод оптического контроля металла на содержание легирующих элементов. Основан на анализе спектра оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля.

Стилоскопирование позволяет определить содержание примесей и соответствие материала требованиям нормативно-технической документации.

Метод используется для проверки марок сталей и сплавов, в том числе титановых, никелевых и чёрных сталей, отличающихся только по углероду.

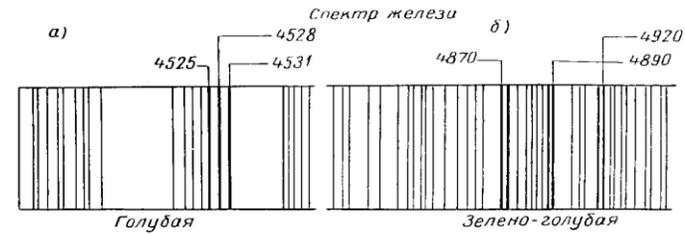
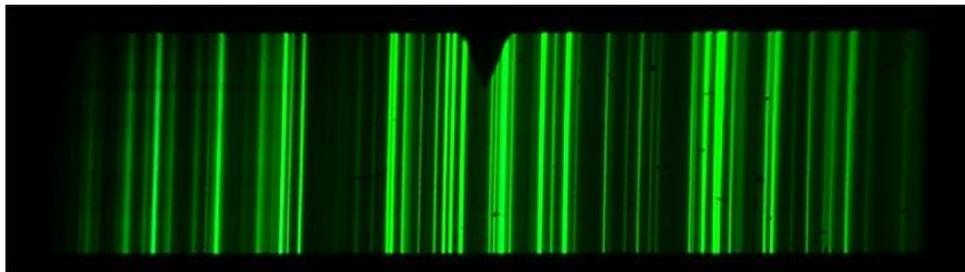
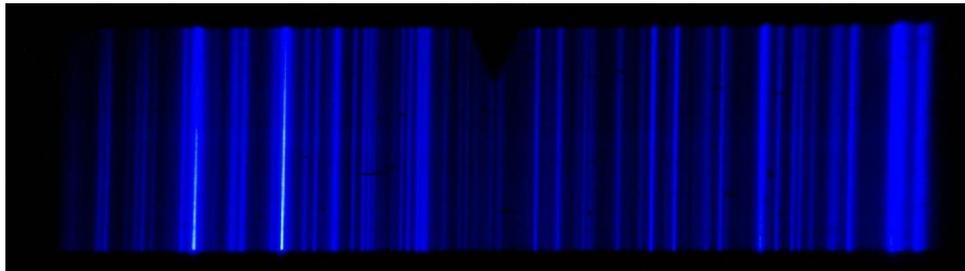
Стилоскопирование проводят при производстве деталей оборудования, а также при проверке поступающих на предприятие сборочных узлов или изделий, при монтаже и ремонте оборудования, при осуществлении сборочно-сварочных работ.

Определение химического состава выполняется 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.

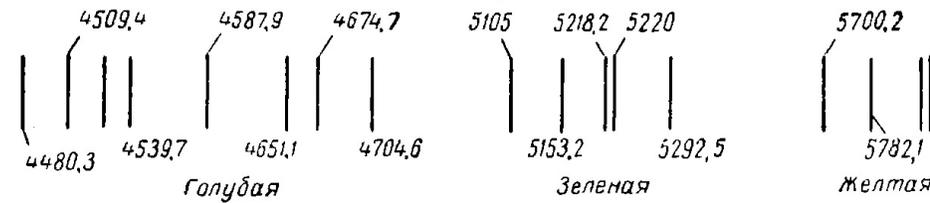
Принцип работы этого прибора, следующий: между исследуемым образцом и электродом (как правило, медным) зажигается разряд (искровой, дуговой или комбинированный). Оператор с помощью спектроскопа визуально наблюдает спектр этого разряда. Вращая ручку прибора, оператор просматривает весь спектр от фиолетовой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



Стилоскопирование



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



Вид спектра меди

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. На рисунке приведены примеры спектра в таблице и участка спектра, служащего для определения концентрации, взятые из атласа спектральных линий для стилоскопа

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.

Рентгенофлуоресцентный



Реализован в **портативных переносных анализаторах**. 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, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Zn, Se, Zr, Ag, Sn, Ta, W, Au, Pb, Bi, Hf, может быть эффективно проанализирована.

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.



Контроль содержания ферритной фазы



Структура хромоникелевых сталей может быть как полностью аустенитной, так и содержать некоторое количество ферритной фазы, даже при условии, что содержание отдельных элементов находится в пределах марочного состава.

Контроль СФФ важно осуществлять при выполнении различных технологических операций, **но более всего он актуален при сварке**, в связи с чем вопросы методического и метрологического характера, а также проблемы его стандартизации в нашей стране и за рубежом в наибольшей степени проработаны именно применительно к сварке.

Присутствие ферритной фазы **изменяет технологические и эксплуатационные свойства стали и изделий из нее**. Например, в отсутствие ферритной фазы **или при малых ее содержаниях** обнаружена склонность металла сварного шва к **образованию горячих трещин**, а **при более высоких СФФ наблюдается тенденция к снижению пластичности и ударной вязкости** после выдержки при повышенных температурах ($600 \div 800$) °С и к **снижению коррозионной стойкости**. Присутствие ферритной фазы может ухудшать служебные свойства сталей в области криогенных температур, но благотворно влиять на них в условиях коррозии под напряжением. При СФФ более $4 \div 5\%$ в процессе длительной выдержки даже при сравнительно низких температурах ($300 \div 350$) °С из-за возникновения в ферритной фазе чрезвычайно мелкой охрупчивающей σ -фазы.

Особенность влияния ферритной фазы состоит в том, что сравнительно малые изменения ее содержания (в некоторых случаях в пределах нескольких процентов и даже долей процента) могут вызвать существенное изменение свойств стали.

Рабочими средствами измерения СФФ – ферритометры, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 26364.

Допускается определение СФФ в основном металле проводить на участке, подвергнутом местному расплавлению сварочной аргонодуговой горелкой с неплавящимся электродом.

Основные методики контроля содержания ферритной фазы:

- металлографический метод (недостатки: невозможность неразрушающего контроля, необходимость наличия атласа микроструктур контролируемых металлов с различным количеством феррита, субъективность оценки оператора, зависимость от технологии травления шлифа и диаметра поля зрения микроскопа)
- объёмный магнитный метод с помощью ферритометра (недостатки: необходимость вырезки образцов из контролируемого металла и невозможность проведения неразрушающего контроля ферритной фазы в основном металле, сварных швах и наплавках непосредственно в оборудовании)
- локальный магнитный метод определения содержания ферритной фазы (предварительно на эталонном образце определяют зависимость между изменением содержания ферритной фазы и механическим напряжением, прикладываемым к образцу, после чего измеряют содержание ферритной фазы в изделии)
- рентгеноструктурный метод (основан на сравнении интенсивности дифракционных линий определяемых фаз)
- расчётный метод (для оценки структуры основного металла хромоникелевых сталей по их химическому составу используется структурная диаграмма Шеффлера)

Контроль содержания ферритной фазы. Методики



Российские стандарты

ГОСТ 11878-66 ГОСТ 26364-90;ГОСТ 8.518-2010; РМД 2730.300.08-2003; РД ЭО 1.1.2.19.0199-2010

ГОСТ Р 53686-2009 (ИСО 8249:2009) «Сварка. Определение содержания ферритной фазы в металле сварного шва аустенитных и двухфазных феррито-аустенитных хромоникелевых коррозионностойких сталей» (Стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту ISO 8249:2000 «Сварка. Определение ферритного числа в металле сварного шва аустенитных и двухфазных феррито-аустенитных хромоникелевых коррозионностойких сталей» (ISO 8249:2000 "Welding - Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel weld metal"))

Зарубежные стандарты

ISO 8249:2000 «Welding - Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel weld metals / Сварка. Определение ферритного числа в металле шва, наплавленном из аустенитной и дуплексной ферритно-аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали)

ASTM E562-08 «Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point» / Стандартный метод испытаний для определения объемной доли посредством систематического ручного подсчета точек)

AWS A4.2M:2006 «Standard Procedures for Calibrating Magnetic Instruments to Measure the Delta Ferrite Content of Austenitic and Duplex Ferritic-Austenitic Stainless Steel Weld Metal»/Стандартные методики калибровки магнитометрических приборов для измерения содержания дельта-феррита в металле сварного шва аустенитной и дуплексной аустенитно-ферритной нержавеющей стали)

ASME Code Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components - Division 1 – Appendices / Правила строительства компонентов ядерного оборудования – Раздел 1 – Приложения

ASME Code Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1 / Правила строительства сосудов давления. Раздел 1



ГОСТ Р 53686-2009 (ИСО 8249:2009)

Стандарт ИСО 8249-1985 — результат многолетнего (с 1978 г.) поиска решения проблемы обеспечения достоверности и единства измерений СФФ, выполняемых в различных странах, разработан в обеспечение технического компромисса между двумя основными независимыми направлениями магнитной ферритометрии, представленными комплексом российской нормативной документации и, с другой стороны, стандартами США и других западных стран

Коренные отличия:

- российскими стандартами предусмотрена возможность использования практически не известных за рубежом **ферритометров объемного типа**, отличающихся исключительной достоверностью и простотой в эксплуатации. Для этого типа ферритометров в ЦНИИМАШ разработаны не имеющие аналогов за рубежом стандартные образцы (СО СФФ), аттестуемые прецизионным методом магнитного насыщения
- различны физические принципы и образцовые средства измерений, используемые для калибровки рабочих средств измерений
- различны единицы измерений СФФ: в российских документах это **«процент»** (общепринятая в магнитном фазовом анализе величина); в стандарте ИСО 8249 это **«ферритное число»** (условная величина, определяемая по специальной методике средствами магнитной толщинометрии)
- различен выбор материала для изготовления СО СФФ: естественные однородные образцы сталей с надежно установленным СФФ (по российским стандартам) и искусственные эталоны толщины немагнитного покрытия (по ИСО 8249).

Контроль содержания ферритной фазы. Методики



Концепция «процента СФФ». В российских стандартах для количественного выражения СФФ (объемной доли) в качестве единицы измерения СФФ, называемой «процент СФФ» или «1 % СФФ», принимается значение 1/100 доли величины удельной намагниченности насыщения ферритной фазы. Величина удельной намагниченности насыщения ферритной фазы может быть установлена экспериментально для каждой стали. В российских стандартах эта величина принимается в качестве единой характеристики для группы марок сталей аустенитного и феррито-аустенитного классов, близких по химическому составу. Диапазон возможных значений СФФ в «процентах» составляет от 0 до 100 %.

Концепция «ферритного числа». В международном стандарте ISO 8249-2000, в американском национальном стандарте AWS A4.2M:2006 и в ряде национальных стандартов других стран для количественного выражения СФФ в качестве единицы измерения СФФ принимается условная единица «ферритное число», определяемая по специальной методике путем измерения силы отрыва специального постоянного магнита от поверхности исследуемого образца стали через показания специального прибора. Диапазон возможных значений ферритного числа составляет: от 0 до 120 и более.

Контроль стойкости против МКК



Методика проведения испытаний регламентирована **ГОСТ 6032**

В зависимости от химического состава стали и сплава и их назначения выбирают один из следующих методов испытаний на стойкость металла против МКК: АМУ, АМУФ, АМ, ВУ, ДУ, В, Б.

- **АМУ:** образцы металла выдерживают в растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии металлической меди
- **АМУФ:** ускоренный вариант предыдущего метода, в растворе нём обязательно присутствие меди и иона фтора
- **ВУ:** анализ проводят в серной кислоте в присутствии окисного сернокислого железа
- **ДУ:** образцы испытывают в 65-ном растворе азотной кислоты. После определённого времени выдержки в растворе образец вынимают, загибают и рассматривают при помощи лупы или микроскопа. Если будут обнаружены трещины на заготовках, то металл признаётся неустойчивым к межкристаллитной коррозии

Выбор метода испытания определяется химическим составом металла и указаниями в нормативном документе на оборудование.

В условных обозначениях методов буквы обозначают:

- **А, Б, В, Д** – буквенное наименование методов
- **М** – присутствие в растворе для испытаний металлической меди
- **Ф** – присутствие в растворе для испытаний иона фтора
- **У** – ускоренные испытания.

Сущность метода

! Стабилизированные стали и сплавы (содержащие титан и/или ниобий) и нестабилизированные стали и сплавы с содержанием углерода не более 0,03% перед испытанием подвергают провоцирующему нагреву (режимы в соответствии с ГОСТ 6032)

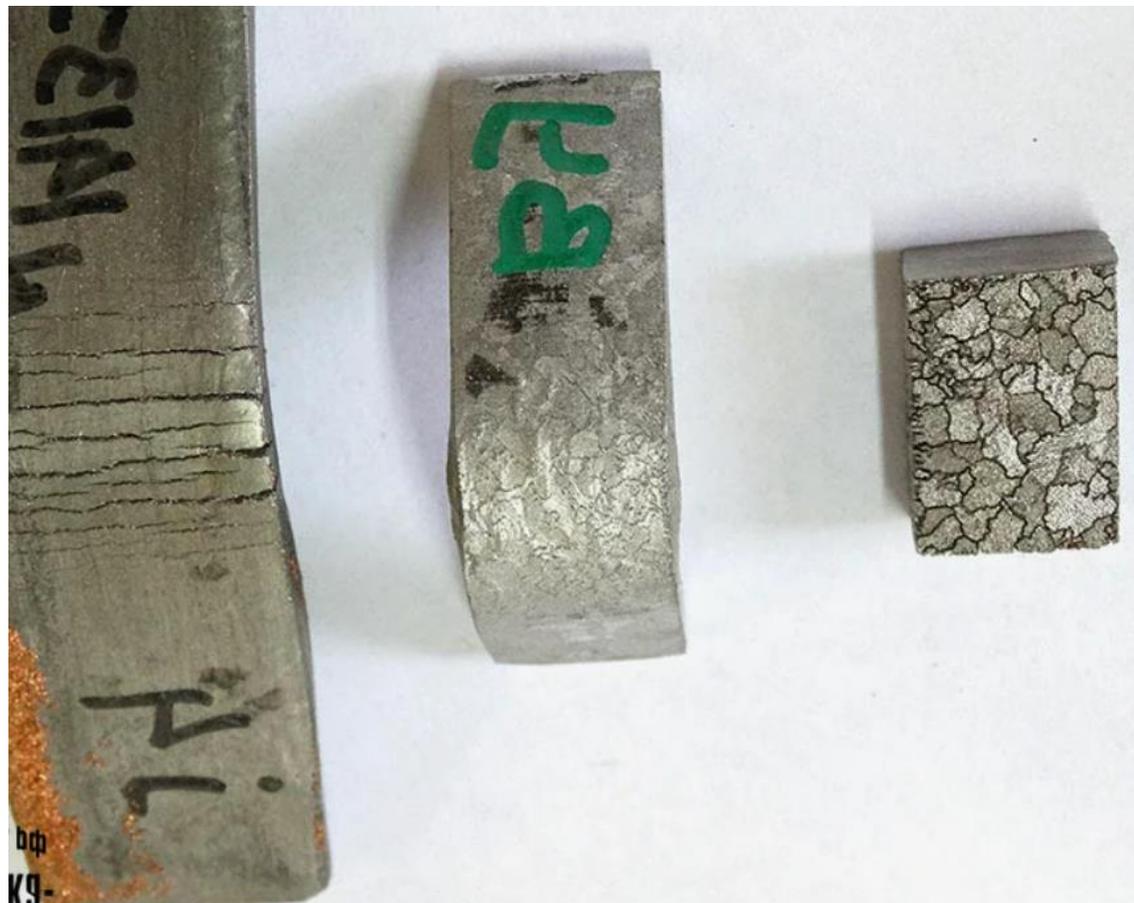
Образцы выдерживают в растворе, по окончании испытаний для обнаружения МКК образцы изгибают на угол $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ по ГОСТ 14019

Также существует **металлографический метод**. Из неизогнутого участка образца, прошедшего испытания, вырезают шлиф. Наличие и глубину МКК устанавливают на протравленных шлифах при увеличении не менее 200 крат. Признаком стойкости против МКК при металлографическом контроле считают разрушение границ зёрен на максимальную глубину не более 30 мкм.

Контроль стойкости против МКК



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ



Проблема достоверность свойств металла, определяемых на стандартных образцах



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

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**. Это подтверждается результатами исследований в области выявления причин разрушения литых деталей оборудования и изучения свойств литого металла. Полученные на образцах значения механических свойств, удовлетворяющие требованиям нормативной документации, не являются залогом безотказной работы оборудования. Испытания на образцах-свидетелях – это компромисс для получения характеристик металла.

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.

В настоящее время стойкость при низких температурах **оценивается по ударной вязкости**, данного испытания, как показывает практический опыт, **недостаточно**. При обосновании прочности оборудования должен быть также выполнен расчет на трещиностойкость (сопротивление хрупкому разрушению). Расчет на трещиностойкость позволяет определить расчетные значения коэффициентов интенсивности напряжений на опасных участках детали.

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.

Проблема достоверность свойств металла, определяемых на стандартных образцах



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

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. **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.**

Спасибо за внимание

Семенова Елена

Semanova_es@aer.ru

12.11.2024