Государственное бюджетное профессиональное
образовательное учреждение Самарской области
«Чапаевский химико-технологический техникум»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению практических работ студентов

учебная дисциплина:
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

для студентов по специальности: 13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование

г.о. Чапаевск 2020

Одобрена

предметной (цикловой)
комиссией
механических и
автотранспортных дисциплин

Председатель ПЦК
Л.И. Карпова

Протокол № 10 от 18.05.2020 г.

Автор: Велигорская В.Л., *преподаватель* ГБПОУ «ЧХТТ»

Рецензент: Карпова Л.И., *преподаватель* ГБПОУ «ЧХТТ»

Аннотация: Методические указания по выполнению практических работ учебной дисциплины «Материаловедение» предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний студентов и оценки результатов освоения программы учебной дисциплины «Материаловедение» *по специальности* 13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование**.**

.

Пояснительная записка

Методические указания по выполнению практических работ учебной дисциплины «Материаловедение» разработана на основе федерального государственного образовательного стандарта по специальности среднего профессионального образования 13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование**.**

Программой дисциплины «Материаловедение» предусмотрено изучение конструкционных и сырьевых материалов для конструкций по их назначению и условиям эксплуатации; проводить исследования и испытания материалов; рассчитывать и назначать оптимальные режимы резания; закономерности процессов кристаллизации и структурообразования металлов и сплавов, основы их термообработки, способы защиты металлов от коррозии; классификацию и способы получения композиционных материалов; принципы выбора конструкционных материалов для применения в производстве; строение и свойства металлов, методы их исследования; классификацию материалов, металлов и сплавов, их области применения; методику расчета и назначения режимов резания для различных видов работ

Преподавание дисциплины направлено и проводится в тесной взаимосвязи с общепрофессиональными и специальными дисциплинами, такие как «Физика», «Математика», «Инженерная графика».

Принцип постоянной связи теории с практики получает непосредственное осуществление на практических занятиях. Они активизируют познавательную деятельность студентов, так как требуют личного участия в проведении различного рода исследований и анализов, студенты получают необходимые знания, умения и навыки по расчетам основных параметров гидро- и пневмоприводов.

Практические работы дисциплины «Материаловедение» проводятся параллельно с изучением теоретического материала. Рабочей программой предусмотрено 20 часов практических занятий.

Каждая работа содержит: номер и название работы, её цель, основные теоретические сведения, используемое оборудование, пояснения к работе, задания, оформление отчета.

Цели и задачи практических занятий

Основная задача практических занятий – закрепление и углубление теоретических знаний студентов.

Основная цель практических работ:

1. Проверить уровень понимания вопросов, пройденных на уроках теоретического обучения;
2. Проверить расчетные навыки, необходимые для работы на производстве.

В процессе выполнения работы студент должен:

а) Стремиться к самостоятельности в решении всех вопросов;

б).Показать способность правильного применения теоретических положений и практических методов расчета;

в) Организовать свою работу так, чтобы с наименьшей затратой времени и труда найти наилучшее техническое решение.

Критерии оценки выполнения практической работы

• Вы правильно выполнили все (100%) задания. Работа оформлена чисто, без исправлений - 5(отлично).

• Вы смогли выполнить (80 %) . Работа оформлена аккуратно - 4 (хорошо).

• Вы смогли выполнить (70 %) . Работа оформлена аккуратно - 3 (удовлетворительно).

• Половина заданий не выполнено (50%) или у Вас вызвала затруднения - 2 (неудовлетворительно).

Практическая работа № 1

Тема: «Составление характеристики механических свойств материалов (диаграмма растяжения)»

Цель работы: Изучить механические свойства материалов (диаграмму растяжения);

Порядок выполнения работы:

1. Записать номер, тему и цель работы.
2. Прочитать теоретический материал.
3. Дать описание всем механическим характеристикам
4. Зарисовать рис.1 и формулы
5. Зарисовать рис.2 и рис. 3 и дать им описание.
6. Дать определение диаграмме растяжения.
7. Описать устройство и механизмы гидравлической машины Р-10.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

При определении качества конструкционных материалов, выпускаемых промышленностью, одним из основных видов испытаний являются испытания на растяжение. Результаты испытаний позволяют судить о прочности материалов при статических нагрузках, выбирать материал для проектируемой конструкции. Они являются основными при расчетах на прочность деталей машин и элементов конструкций.

Механические характеристики материалов зависят от многих факторов: вида нагружения, времени воздействия нагрузки, скорости нагружения, температуры, радиации и др. Наиболее простыми являются испытания материалов при комнатной температуре t=20^{0}C и статическом нагружении, когда $d\varepsilon / dt \cong 0{,}01$ мин$^{-1}$.

Механические характеристики делятся на три группы:

- характеристики прочности;
- характеристики пластичности;
- характеристики вязкости.

Характеристиками прочности измеряют силовую реакцию твёрдых тел на воздействие внешних нагрузок. Эта реакция непостоянна в процессе нагружения и в ней явно прослеживаются несколько характерных зон (см. диаграмму нагружения). К характеристикам прочности относятся: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности, разрушающее напряжение. Дадим определение этих понятий в порядке возрастания значений их величин.

Предел пропорциональности – это наибольший уровень условного напряжения, при котором не наблюдается существенного нарушения закона Гука (каково удлинение, такова сила). Это напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{пр} = \frac{F_{пр}}{A_0},$$

где $F_{пр}$ – нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности; A_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца.

Предел упругости – это наибольший уровень условного напряжения, при котором материал проявляет упругие свойства, заключающиеся в том, что образец практически полностью восстанавливает свои первоначальные размеры после снятия внешней нагрузки. Его определяют по формуле

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0},$$

где F_e – нагрузка, соответствующая пределу упругости.

Предел текучести – это наименьший уровень условного напряжения, при котором наблюдается значительный рост деформаций образца при постоянной (или слегка уменьшающейся) нагрузке. Этот предел определяют по формуле

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0},$$

где F_y – нагрузка, соответствующая пределу текучести.

Если в поведении материала не прослеживается площадка текучести (см. диаграмму нагружения) и стрелка силоизмерителя не останавливается на некоторый промежуток времени, то определяют условный предел текучести, соответствующий относительной деформации образца $\varepsilon = 0{,}002$ или 0,2 %:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}.$$

Предел прочности, чаще называемый *временным сопротивлением*, – это условное напряжение, соответствующее наибольшему уровню нагрузки, воспринимаемому образцом. Находят эту величину по формуле

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0},$$

где F_u – наибольшая нагрузка на образец.

Разрушающее напряжение – это напряжение, при котором происходит разрыв образца. Этот предел не имеет особого практического значения и используется только при изучении процесса образования трещин. Разрушающие напряжения делятся на условные и истинные:

$\sigma_{fr}^{c} = \frac{F_{fr}}{A_0}$ – условное; $\sigma_{fr}^{tr} = \frac{F_{fr}}{A_1}$ – истинное,

где F_{fr} – разрушающая нагрузка; A_1 – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Так как первоначальная площадь A_0 приблизительно в два раза превышает площадь разрыва A_1, а разрушающая нагрузка F_{fr} составляет приблизительно 80 % от наибольшей нагрузки F_u, то

$\sigma_{fr}^{c} < \sigma_u$; $\sigma_{fr}^{tr} > \sigma_u$.

Характеристиками пластичности измеряют деформативную реакцию твёрдых тел, т.е. их способность изменять свои размеры под воздействием нагрузок. Пластичность материала характеризуют две величины:

- относительное остаточное удлинение образца (в процентах)

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100;$$

- относительное остаточное сужение поперечного сечения (в процентах)

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} 100$$.

В этих формулах l_0, A_0 – длина расчётной части и площадь сечения до нагружения; l_1, A_1 – то же после разрыва образца.

Характеристикой вязкости измеряют способность твёрдых тел сопротивляться импульсному и ударному воздействию нагрузок. Количественным показателем этой характеристики является удельная работа внешних сил, затрачиваемая на деформирование и разрушение единицы объёма материала:

$$w = \frac{W}{V_0}$$,

где W – работа, совершаемая машиной на растяжение образца вплоть до его разрыва; $V_0 = A_0 l_0$ – объём расчётной части образца.

Для испытания на растяжение используются специально изготовленные образцы, которые вытачиваются из прутка или вырезаются из листа. Основной особенностью этих образцов является наличие длинной, сравнительно тонкой рабочей части и усиленных мест (головок) по концам для захвата.

Проводятся испытания цилиндрического образца, форма и размеры которого приведены на рис. 1.

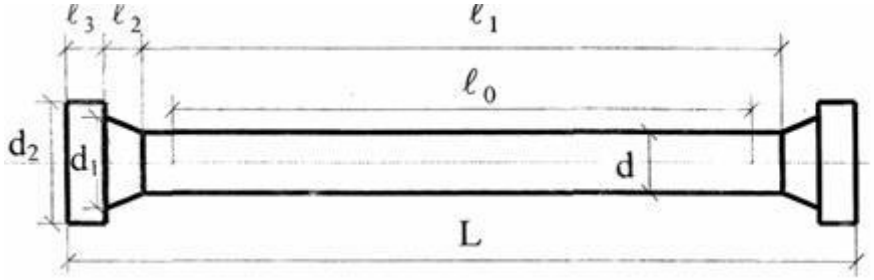


Рис.1. Цилиндрический образец:

$l_0 = 10d$ - расчетная длина образца, $l_1 = 12{,}5\sqrt{F}$ - рабочая длина образца, $l_2 = 10\sqrt{F} - l_0/2$ - длина конусообразной части образца, $l_3 = d$ - длина головки образца, L - полная длина образца , $d = 1{,}13\sqrt{F}$ - диаметр сечения расчетной и рабочей длины, $d_1 = 1{,}5\sqrt{F}$ - диаметр основания конуса (у головки), $d_2 = 2\sqrt{F}$ - диаметр головки образца.

Для замера деформаций на расчетной части образца отмечают отрезок, называемый расчетной длиной. Чаще всего применяются цилиндрические образцы, у которых расчетная длина равна десяти диаметрам (длинные образцы) и образцы с расчетной длиной равной пяти диаметрам (короткие образцы). Чтобы результаты испытаний образцов прямоугольного и круглого сечений были сопоставимы, в случае прямоугольного сечения в качестве характеристики, определяющей расчетную длину, принимается диаметр равновеликого круга.

На рис. 2 показан эскиз пропорционального цилиндрического образца до нагружения и после его разрыва.

Для получения сравнимых результатов испытаний образцы с цилиндрической или прямоугольной формой поперечного сечения рабочей части изготавливаются по ГОСТ 1497-84.

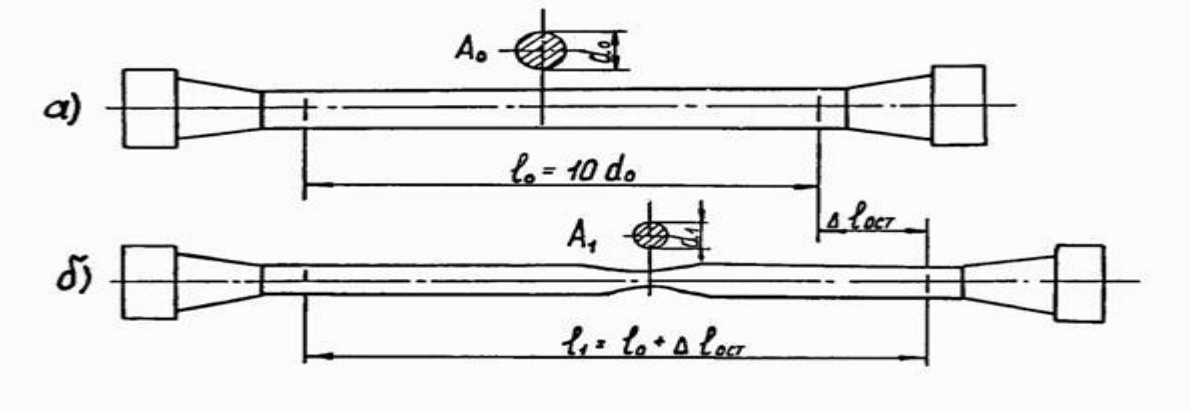


Рис. 2. Образец для испытания на растяжение: *а* – до нагружения; *б* – после разрыва

ДИАГРАММОЙ РАСТЯЖЕНИЯ называется график, показывающий функциональную зависимость между нагрузкой и деформацией при статическом растяжении образца до его разрыва. Эта диаграмма вычерчивается автоматически на разрывной машине специальным приспособлением. В нашей лаборатории для этой цели используется разрывная машина Р-10.

На рис. 3 показан примерный вид параметрической диаграммы растяжения малоуглеродистой стали в координатах: абсолютное удлинение $\Delta l(t)$ – нагрузка $F(t)$. В качестве параметра здесь выступает время нагружения, которое для простоты обычно не показывают.

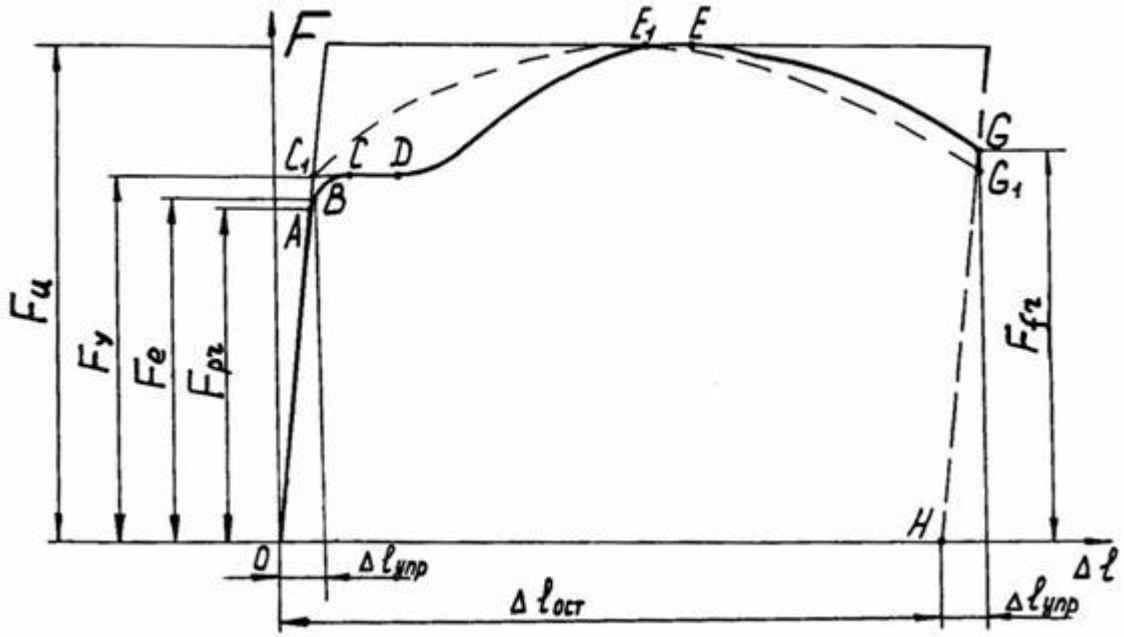


Рис. 3. Диаграмма растяжения образца

Так как испытание проводят на гидравлической машине, в которой деформация является первичной ($\frac{d\Delta l}{dt} = \text{const}$), а нагрузка вторичной ($\frac{dF}{dt} = \text{var}$), то осью абсцисс (аргументом) является абсолютное удлинение Δl, а осью ординат (функцией) – нагрузка *F*, т.е. фактически мы имеем зависимость $F = f(\Delta l)$, интерпретированную Гуком, проводившим опыты в упруго-пропорциональной зоне нагружения: «каково удлинение, такова сила». Однако в современной трактовке, с учётом того что в реальных условиях эксплуатации машин и сооружений

первичной является нагрузка, функциональную зависимость обращают, полагая, что $\Delta l = f(F)$, и обсуждают, как изменяется деформация образца в зависимости от нагрузки (какова сила, таково удлинение).

На диаграмме растяжения *OABCDEG* показаны 7 характерных точек, соответствующих определённому уровню нагрузки и ограничивающих 6 различных зон деформирования:

OA – зона пропорциональности (линейной упругости);

AB – зона нелинейной упругости;

BC – зона упругопластических деформаций;

CD – зона текучести (пластических деформаций);

DE – зона упрочнения;

EG – зона закритических деформаций.

На участке *OA* смещение атомов монокристаллов пропорционально приложенной нагрузке. Дефекты кристаллической решётки практически не проявляются.

На участке *OB* материал ведёт себя упруго. Поведение кристаллической решётки на участке *AB* характеризуется небольшой нелинейностью. Нужно заметить, что на участке пропорциональности *OA* материал ведёт себя одновременно и как абсолютно упругий (т. *B* всегда выше т. *A*).

На участке *BC* наблюдается нарастающая нелинейность в деформировании кристаллической решётки. Для выхода новых дислокаций (нарушений строения кристаллов) на поверхность монокристаллов требуется всё меньшее приращение внешней нагрузки ΔF.

На участке *CD*, называемом площадкой текучести, происходит лавинообразный выход дислокаций на поверхность, что приводит к значительному удлинению образца при почти постоянном уровне нагрузки, когда $\Delta F \cong 0$.

На участке *DE* после выхода на поверхность большей части дефектов кристаллической решётки материал самоупрочняется, и образец всё ещё способен воспринимать некоторое приращение нагрузки. Однако расстояние между атомами постепенно достигает критического значения (приблизительно в два раза больше первоначального), за которым происходит «разрыв» внутренних связей. При подходе к т. *E* деформации начинают локализоваться в области наиболее слабого сечения, где зарождается шейка образца.

На участке *EG* заканчивается формирование шейки. Происходит лавинообразное разрушение связей, когда процесс деформирования уже необратим и временное равновесие между внутренними силами и внешней нагрузкой возможно только при уменьшении последней. В т. *G* происходит разрыв образца. Его размеры восстанавливаются на величину упругой деформации, которая на 2 – 3 порядка меньше остаточных пластических деформаций. У многих материалов разрушение происходит без заметного образования шейки.

На рис. 4 показана принципиальная схема универсальной гидравлической машины Р-10. На ней можно проводить испытания образцов при растяжении, сжатии и изгибе. Максимальное усилие, развиваемое машиной, составляет 10 тс или 100 кН.

Испытательная разрывная машина Р-10 состоит из нескольких механизмов: двигательного, передаточного, исполнительного, регистрирующего, управляющего. Каждый из механизмов скомпонован из нескольких узлов, в которые входят подвижные и неподвижные детали, называемые звеньями. Рассмотрим кратко состав механизмов и их функциональное предназначение.

I. Двигательный механизм. Он состоит из основного электродвигателя 1, предназначенного для работы масляного насоса 2, и вспомогательного электродвигателя, приводящего в движение червячно-винтовой механизм 7.

II. Передаточный механизм. Сюда входит система трубопроводов 3, соединяющих масляный насос 2 с цилиндром 10, в котором перемещается плунжер 12, передающий давление на поперечину 13, связанную с верхним захватом 8*а*.

III. Исполнительный механизм. Он состоит из верхнего 8*а* и нижнего 8*б* захватов, позволяющих приложить к образцу 9 растягивающее усилие. Для замыкания силовой цепи нижний захват 8*б* соединён червячно-винтовым механизмом 7 со станиной 6, связанной колоннами 5 с верхней траверсой 11, в которую жёстко вмонтирован рабочий цилиндр 10.

IV. Регистрирующий механизм. Он предназначен для визуального снятия приложенного в данный момент времени усилия на образец и фиксирования всего процесса нагружения. Силоизмерительное устройство состоит из трёх цилиндров с плунжерами 24, передающих давление на рычаги 18, 14, жёстко соединённые с торсионом 25. Рычаг 14 двигает зубчатую рейку 15, которая вращает стрелку 17 по шкале 16. Процесс нагружения образца непрерывно фиксируется с помощью диаграммного аппарата, состоящего из барабана 22 с закреплённой бумагой и пера 21. Угловая скорость вращения барабана и, следовательно, перемещение пера по окружности пропорциональны удлинению образца. Перемещение пера вдоль образующей барабана пропорционально развиваемому усилию.

V. Управляющий механизм. Сюда входит электрическая схема (на рис. 1 не показана) с кнопками включения основного и вспомогательного двигателей, штурвал управления регулятором давления масла 4 в гидравлической системе и переключатель шкалы 16 силоизмерительного устройства.

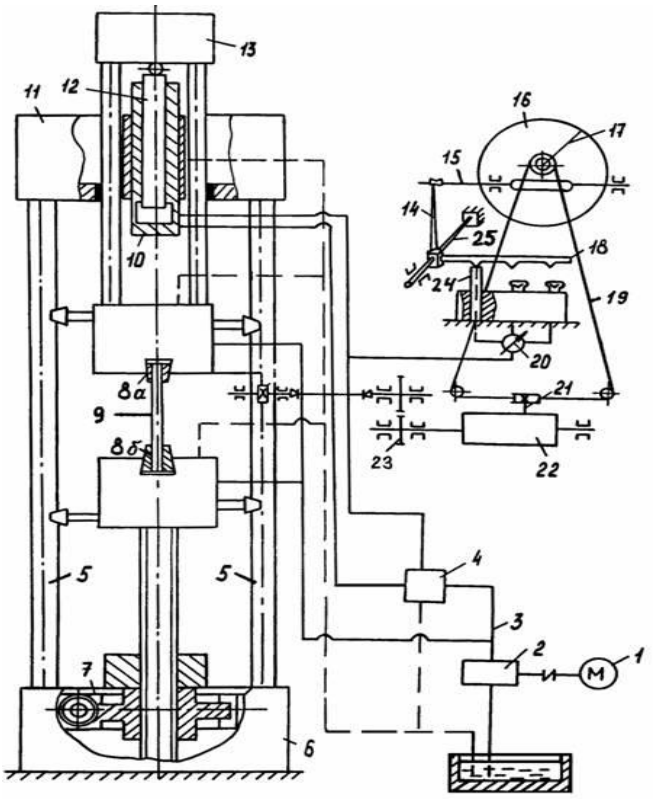


Рис. 4. Принципиальная схема разрывной машины Р-10:
1 – электродвигатель; 2 – масляный насос; 3 – трубопровод; 4 – регулятор давления; 5 – колонны; 6 – станина; 7 – червячно-винтовой механизм; 8*а* – верхний захват; 8*б* – нижний захват; 9 – образец; 10 – рабочий цилиндр; 11 – верхняя траверса; 12 – плунжер; 13 – поперечина; 14 – вторичный рычаг; 15 – зубчатая рейка; 16 – шкала; 17 – стрелка; 18 – первичный рычаг; 19 – трос; 20 – переключатель; 21 – перо; 22 – барабан; 23 – передача; 24 – плунжер силоизмерительного устройства; 25 – торсион

Вопросы для подготовки к защите работы

- Какова цель лабораторной работы?
- На какой машине проводятся испытания? Опишите её конструкцию.
- Как работают силоизмерительное и записывающее устройство?
- Для чего нужна диаграмма растяжения материала, и в каких координатах она строится?
- Почему диаграмму растяжения следует называть параметрической?
- Почему за ось абсцисс при построении диаграммы растяжения принимают абсолютное удлинение?
- С какой целью обращают функциональную зависимость нагрузки от удлинения?
- Какой вид имеет диаграмма растяжения малоуглеродистой стали?
- Сколько характерных зон деформирования имеет диаграмма растяжения?
- Как называют зоны деформирования диаграммы растяжения?
- Как проходит процесс деформирования на различных участках диаграммы?
- Почему диаграмма растяжения, полученная на машине, имеет начальный криволинейный участок O_1A?
- От каких факторов зависят механические характеристики материалов?
- На какие группы делят механические характеристики?
- Какую реакцию твёрдых тел измеряют механическими характеристиками прочности?
- Что относят к характеристикам прочности?
- Как отличают истинное разрушающее напряжение от условного?
- Для какого участка диаграммы справедлив закон Гука?
- Что называется пределом пропорциональности?
- Что называется пределом упругости?
- Что называется пределом текучести?
- Что называется площадкой текучести и при испытании каких материалов она бывает на диаграмме растяжения?
- Покажите на диаграмме растяжения зону упругости и объясните ее суть.
- Что называется пределом прочности?
- Как определить параметры, характеризующие пластичность материала?
- Что подразумевается под истинным напряжением?
- Объясните, почему образец разрушается при нагрузке меньшей, чем максимальная.
- Из каких частей состоит полная деформация и чему она равна?
- Какие деформации называют упругими и какие остаточными (пластическими)? Как их определить на диаграмме растяжения?
- Чем отличаются друг от друга диаграммы растяжения при пластичном и хрупком разрушении материалов?
- Что называют наклёпом? Как изменяются механические свойства материала после наклёпа?
- Как используют в технике явление наклёпа? Приведите примеры.
- Когда появляется шейка на образце?
- Какой точке диаграммы растяжения соответствует момент зарождения шейки образца?
- Чем характеризуется удельная работа разрыва и как её определяют?
- На основании каких данных испытаний определяют марку стали?
- Какую способность твёрдых тел измеряют характеристикой вязкости?
- Что является количественным показателем вязкости материала?
- Какими размерами характеризуют пропорциональный образец?
- На какую величину восстанавливаются размеры образца после его разрыва?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностр. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин; под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. 862 с.

Дополнительная:

Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.

Практическое занятие № 2

Тема: «Составление характеристики механических свойств материалов (определение твердости)»

Цель работы: Изучить механические свойства материалов (определение твердости)

Порядок выполнения работы:

Задание:

1 Изучить теоретические вопросы:

1.1 схему испытания (с зарисовкой) твердости по Бринеллю;

1.2 определение твердости по формуле;

1.3 устройство автоматического рычажного пресса (с зарисовкой);

1.4 выбор диаметра шарика и нагрузки;

1.5 методику измерения отпечатка с помощью лупы.

2 Изучить порядок работы на твердомере

3 Определить твердость образцов

4 Определить приблизительное значение предела прочности образцов

5 Сделать вывод о зависимости твердости и прочности различных материалов образцов.

Результаты оформить в виде протокола.

Материал	Толщина образца, мм	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, Н	Диаметр отпечатка, мм			Твердость, НВ	Предел прочности, Gв, МПа
				d_1	d_2	dcp		

6 Содержание и оформление отчета по работе

- тема
- цель
- задание
- описание методики проведения испытаний с зарисовкой рис. 1 и рис. 3
- результаты измерений
- выводы по работе

Общие сведения

Под ***твердостью*** понимают свойство материала сопротивляться проникновению в него более твердого наконечника (индентора), не деформирующегося при испытании.

Твердость можно определять методом вдавливания, царапанья, упругой отдачи и т.д. наиболее распространен метод вдавливания статической нагрузкой, который предусматривает внедрение индентора в образец (изделие) под действием нагрузки, прикладываемой плавно и постепенно, причем время выдержки под нагрузкой регламентируется соответствующими стандартами на методы измерения твердости. В результате вдавливания поверхностные слои металла, находящиеся под индентором и вблизи него, пластически деформируются. Особенность происходящей при этом деформации в том, что она протекает только в небольшом

объеме, окружено недеформированным металлом. Таким образом, твердость характеризует сопротивление металла пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое, т.е. способность одного тела противостоять проникновению (внедрению) в него другого более прочного тела.

Испытания на твердость получили большое распространение в промышленности, т.к. они дают возможность изучать свойства материала не только на опытных образцах, но и на готовых конструкциях и деталях. К тому же имеется возможность по результатам испытаний на твердость определить величину предела прочности материала без проведения испытаний на растяжение.

Наибольшее распространение получили статические методы:

1 Метод Бринелля – вдавливание стального закаленного шарика;

2 Метод Роквелла – вдавливание стального шарика при контроле мягких материалов или алмазного конуса при испытании твердых материалов;

3 Метод Виккерса – вдавливание алмазной пирамиды.

Указанные методы определения твердости регламентированы, соответствующими ГОСТами. Метод измерения твердости по Бринеллю - ГОСТ 9012-59, метод определения твердости по Роквеллу – ГОСТ 9013-59, метод определения твердости по Виккерсу – ГОСТ 2999-75.

Методика и техника эксперимента

Определение твердости по методу Бринелля

При определении твердости по Бринеллю стальной шарик диаметром D вдавливается в испытуемый образец под действием нагрузки P (рис. 1) приложенной в течение определенного времени. значение твердости определяют по величине поверхности отпечатка, оставляемого шариком, который изготовлен из термически обработанной инструментальной стали.

Вдавливание шарика осуществляется на твердомере Бринелля (рис. 3) следующим образом. На столик 2 устанавливают испытуемый образец или изделие 3. Вращая маховик 1 по часовой стрелке, поднимают столик вверх для обеспечения контакта образца с индентором-шариком 4. Потом нажатием кнопки включается электродвигатель 6 прибора, после чего нагрузка начинает плавно передаваться на испытуемый образец. эта нагрузка, создаваемая грузом 5, действует обычно 10-60 с ,в зависимости от твердости измеряемого материала; выключается двигатель автоматически. Столик 2 вместе с образцом опускают вращением маховика 1 в обратном направлении. Образец 3 снимают и измеряют диаметр полученного на нем отпечатка с помощью лупы, на окуляре которой нанесена шкала с делениями, соответствующими 0,1 мм. Схема измерения диаметра отпечатка специальной лупой показана на рис. 2.

Число твердости по Бринеллю (НВ) определяют путем деления нагрузки P (Н) на площадь поверхности сферического отпечатка F ($мм^2$) и вычисляют по формуле:

$$НВ=\frac{P}{F}=\frac{2P}{\pi D\left(D-\sqrt{D^2-d^2}\right)}; \qquad (1)$$

где D – диаметр вдавливаемого шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм;

Между числами твердости по Бринеллю и пределом прочности Gв существует следующая приближенная зависимость:

$$G_в \approx kHB\ ; \qquad (2)$$

где k – коэффициент, определяемый опытным путем. Значения k для стали, алюминия и меди:
- сталь НВ<175 - 3,4
- сталь НВ>175 - 3,6
- алюминий отожженный - 4,0
- медь отожженная - 3,5.

Чем тверже металл, тем меньше диаметр отпечатка и тем выше число твердости по Бринеллю.

Диаметр шарика, нагрузку и продолжительность выдержки под нагрузкой выбирают в зависимости от твердости и толщины испытуемого изделия или образца. Нормы испытания на твердость приведены в таблице 1.

На практике при измерении твердости шариком определенного диаметра и установленной нагрузкой пользуются таблицами, указывающими число в зависимости от диаметра отпечатка.

Измерение твердости по Бринеллю не рекомендуется применять:
- для сталей твердостью >450 НВ из-за деформации стального шарика;
- для цветных металлов с твердостью > 200НВ;
- для тонких поверхностных слоев (толщиной 1-2 мм), которые шарик будет продавливать.

Таблица 1

Нормы испытания на твердость по Бринеллю

Материал	Твердость по Бринеллю НВ	Толщина образца, мм	Диаметр шарика D, мм	Нагрузка P, Н	Соотношение P и D	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	140-450	6-3 4-2 <2	10,0 5,0 2,5	29420 7354 1834	$P=30D^2$	10 10 10
Черные металлы	<140	6 6-3 <3	10,0 5,0 2,5	9810 2451 614	$P=10D^2$	10 10 10
Цветные металлы	>130	6-3 4-2 <2	10,0 5,0 2,5	29420 7354 1834	$P=30D^2$	30 30 30
	35-130	9-3 6-3 <3	10,0 5,0 2,5	9810 2452 614	$P=10D^2$	30 30 30
	8-35	>6 6-3 <3	10,0 5,0 2,5	2451 614 153	$P=2,5D^2$	60 60 60

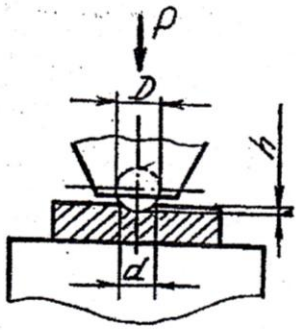


Рис. 1 Схема измерения твердости по методу Бринелля

Рис. 2 Схема измерения диаметра отпечатка

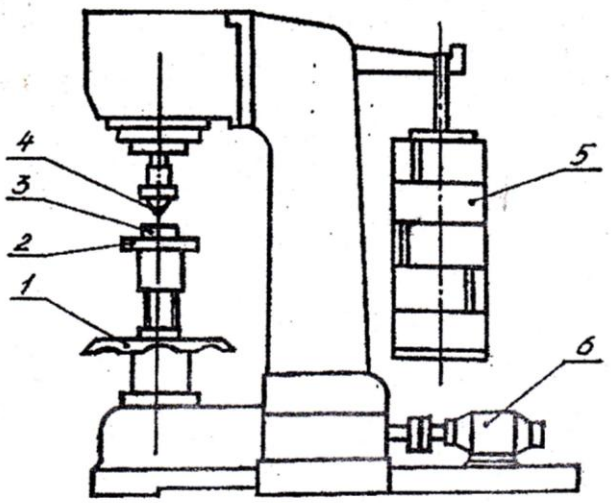


Рис. 3 Схема прибора для определения твердости по методу Бринелля

Устный отчет по практической работе:

1 Определение твердости.
2 Перечислить методы измерения твердости.
3 На чем основан метод измерения твердости по Бринеллю?
4 Как определяется твердость по методу Бринелля (формула)?
5 Как осуществляется выбор диаметра шарика и нагрузки в лабораторной работе?
6 Методика измерения отпечатка.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностр. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин; под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. 862 с.

Дополнительная:

Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.

Практическое занятие № 3

Тема: «Составление характеристики механических свойств материалов (определение ударной вязкости)»

Цель: Изучить методику определения ударной вязкости пластических масс и других неметаллических материалов при испытании стандартных образцов на маятниковом копре.

Оборудование: маятниковый копер – ХР-05, образцы для испытания на удар, штангенциркуль, шаблоны.

Порядок выполнения работы:

1. Записать номер, тему и цель работы.
2. Изучить теоретический материал работы.
3. Дать определение удельной ударной вязкостью, записать формулу.
4. Описать внешние факторы эксплуатации деталей.
5. Зарисовать рис.1 и дать ему описание.
6. Зарисовать рис.2, описать устройство и принцип работы маятника.
7. Описать форму надреза образцов.
8. Записать данные для расчета и формулы с расчетами

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Среди многочисленных методов ударных испытаний наиболее широкое практическое применение нашел метод испытания на ударный изгиб с измерением величины ударной вязкости. Эта характеристика механических свойств играет огромную роль при оценке служебных свойств конструкционных, а также инструментальных сталей.

Удельной ***ударной вязкостью*** *а материала называют отношение работы* ΔW_F*, затраченной маятником на разрушение стандартного образца к площади его поперечного сечения А в месте излома.*

$$a = \frac{\Delta W_F}{A}\left[\frac{Н \cdot м}{м^2}\right] \qquad (1)$$

В процессе ***эксплуатации деталей*** *могут возникнуть* ***внешние факторы****, под воздействием которых материал становится хрупким:*

1. увеличение скорости деформирования (возникновение ударных нагрузок);

2. понижение температуры;

3. возникновение двухосного и трехосного напряженных состояний;

4. образование концентраторов напряжений – надрезов, раковин, трещин и т. д.

Чем больше величина ударной вязкости, тем лучше материал сопротивляется динамической нагрузке. Образцы из хрупких материалов ломаются легко, с небольшой затратой работы на разрушение. Образцы из пластичных материалов наоборот – требуют на разрушение большей энергии. Материалы, требующие большой затраты энергии на излом называют вязкими. Все материалы, из которых изготавливают детали, воспринимающие динамические нагрузки, обязательно испытывают на удар.

Величина ударной вязкости очень сильно зависит от температуры. По мере понижения температуры ударная вязкость образцов из одного и того же материала уменьшается. У некоторых материалов существует температурный интервал, в котором удельная ударная вязкость резко меняет свое значение. Этот интервал называется температурным интервалом хрупкости. Чем больше смещен температурный интервал хрупкости в сторону низких температур, тем материал менее чувствителен к воздействию температуры при ударных нагрузках и тем более он надежен в работе.

Изменение формы образца также сказывается на величине ударной вязкости. Переход к более широким образцам и к образцам с более острым надрезом смещает температурный интервал в сторону более высоких температур. На образцах из металлов всегда создается надрез - концентратор напряжений.

Склонность стали к хрупкому разрушению, возрастает также при повышенном содержании фосфора, концентрирующегося по границам зерен, при крупнозернистой структуре, при наличии карбидов по границам зерен, полосчатости, т.е. под влиянием целого ряда внутренних, структурных факторов.

Определение ударной вязкости при динамических испытаниях на ударный изгиб является основным практическим методом оценки склонности стали к хрупкому разрушению, которое, в отличие от вязкого, происходит без заметной пластической деформации и развивается катастрофически быстро.

Охрупчивание стали при некоторых условиях отпуска называется *отпускной хрупкостью*. Понижение ударной вязкости при этом вызвано повышением температуры перехода в хрупкое состояние. Наблюдаются два вида отпускной хрупкости. Отпускная хрупкость первого рода (необратимая) и отпускная хрупкость второго рода (обратимая), определяемые путем испытаний на ударный изгиб при комнатной температуре.

Ударная вязкость в зависимости от температуры отпуска меняется немонотонно (рис. 1).

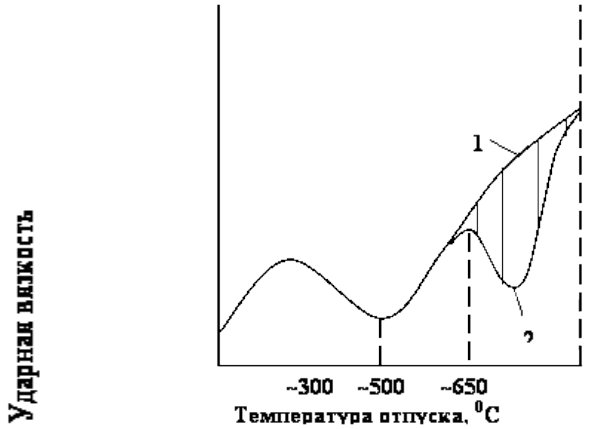


Рис.1. Зависимость ударной вязкости стали от температуры отпуска

Сталь, отпущенная в интервале температур порядка 300…350 ^{0}C, имеет минимальную ударную вязкость. Отпускная хрупкость первого рода проявляется у большинства сталей независимо от их состава и скорости охлаждения. Считают, что это явление обусловлено выделениями частиц типа цементита по границам зерен, которые при дальнейшем повышении температуры вновь растворяются. При этом менее прочные приграничные участки становятся концентраторами напряжений, т. е. хрупкое состояние обусловлено возникновением объемно-напряженного состояния, получающегося при неоднородном распаде мартенсита. Сталь в состоянии необратимой отпускной хрупкости имеет блестящий межкристаллитный излом.

Хрупкость первого рода устраняется нагревом стали выше 400 ^{0}C, снижающим твердость.

Хрупкость второго рода наблюдается в легированных сталях при охлаждении в печи или на воздухе после отпуска в интервале температур 500…550 ^{0}C или при слишком длительной выдержке в этом температурном интервале.

В стали в состоянии отпускной хрупкости второго рода уменьшается работа зарождения и особенно распространения трещины.

При быстром охлаждении в воде этот вид хрупкости не возникает, излом стали – волокнистый, характерный для вязкого состояния. После медленного охлаждения с температуры 500…650 ^{0}C сталь имеет хрупкий кристаллический излом. Хрупкость второго

рода можно устранить повторным отпуском при 600…650 ^{0} С с последующим обратным быстрым охлаждением.

Хрупкость второго рода часто встречается в сталях, содержащих повышенное количество P и As или Mn, Si, Cr или при одновременном введении в сталь Cr и Ni (или Mn).

Появление отпускной хрупкости второго рода наиболее вероятно связано с диффузией растворенных атомов некоторых элементов и насыщением поверхностных слоев зерна этими элементами без выделения избыточных мелкодисперсных фаз (карбидов, фосфидов и т. д.). Особенно большое влияние оказывает обогащение пограничных зон фосфором, снижающим работу образования межзеренных трещин, вызывающих развитие отпускной хрупкости.

С помощью испытаний на ударный изгиб выявляются такие ***дефекты*** *как синеломкость, хладноломкость, обратимая и необратимая отпускная хрупкость и т. п.*

Ударные испытания выявляют такие различия между материалами, которые не отражаются при обычных (статических) испытаниях гладких образцов. Например, значения предела прочности мало отличаются для мелкозернистого железа (36,5 кгс/мм^2) и крупнозернистого железа (34,5 кгс/мм^2), тогда как в значениях ударной вязкости имеется существенное различие: 13,1 кгсм/см^2 и 2,6 кгсм/см^2, соответственно.

Одно из ***важнейших достоинств ударных испытаний*** *как метода оценки состояния металла – повышенная чувствительность*. Так, например, колебания механических свойств около среднего значения для осевой стали (0,35% C) составляют 99% для A_H, 15% для σ_b, 8,8% для δ и 5,7% для ψ.

На величине ударной вязкости часто сказывается и способ выплавки стали: электросталь имеет наибольшую, бессемеровская – наименьшую, мартеновская – промежуточную величину ударной вязкости.

Ударная вязкость в значительной мере отражает состояние поверхности образца, т. к. распределение деформации в образце неравномерно и часто бывает сосредоточенно, в основном, в поверхностных слоях. Наличие твердых поверхностных слоев понижает ударную вязкость, а мягкие поверхностные слои повышают ее. Например, если надрезы на стальном образце, предназначенном для испытания на ударный изгиб, сделаны до термической обработки, то даже небольшое обезуглероживание поверхности, приводящее к образованию мягкого и пластичного феррита, может повысить ударную вязкость вдвое.

Поэтому при ударных испытаниях предписывается изготовлять надрез на ударных образцах (ГОСТ 9454-78) после их термической обработки.

Наряду с определением ударной вязкости значение имеет вид излома ударных образцов. В изломе не допускается крупнозернистость, шлаковины, расслоения и другие дефекты.

Наиболее простым из методов практического массового контроля является метод ударных испытаний при 20 ^{0}С на маятниковых копрах. На результатах определения ударной вязкости сказывается и скорость маятника в момент удара.

Однако широкое применение нашли испытания при пониженных температурах, разработанные Н.Н. Давиденковым, так называемые “сериальные испытания”.

При проведении таких испытаний делается серия опытов на ударный изгиб при постепенно понижающейся температуре до перехода металла в хрупкое состояние, причем температура резкого уменьшения ударной вязкости служит мерой качества металла. Чем ниже эта температура – “критическая температура хрупкости” – тем выше сопротивление металла хрупкому разрушению.

Охлаждающими смесями могут быть: сухая углекислота, дающая температуру -70 ^{0}С, жидкий воздух дает -183 ^{0}С, жидкий азот позволяет получить температуру -195 ^{0}С, жидкий водород, дающий -252 ^{0}С.

Применение “сериальных испытаний” целесообразно только для типично хладноломких материалов с ОЦК-решеткой (Fe-α, Zn и сплавы на их основе), которые дают резкий переход в

хрупкое состояние. Многие легированные стали, особенно содержащие Ni, при понижении температуры дают постепенное понижение вязкости и поэтому для них определение даже “критического интервала хрупкости” становится затруднительным. Некоторые сплавы, например Al+4% Mg, остаются вязкими и разрушаются путем среза даже при жестких условиях (при одновременном действии удара, надреза и низкой температуры), поэтому для таких материалов применение ударных испытаний как сериальных, так и при 20 ^{0}C нецелесообразно.

Нецелесообразно применять ударные испытания и для чугунов, литых алюминиевых и магниевых сплавов, т. к. сопротивление отрыву этих материалов достигается уже при статических нагрузках.

Таким образом, испытания на ударный изгиб являются одним из наиболее чувствительных методов контроля, чутко реагирующих на небольшие изменения состояния металла.

Ударные испытания являются ценным, а иногда необходимым дополнением к статическим испытаниям гладких образцов, главным образом для низко- и среднеуглеродистых сталей.

Испытания на ударную вязкость или ударный изгиб (КС) проводятся для оценки надежности и работоспособности материалов в условиях динамического нагружения и их склонности к хрупкому разрушению, которые, в свою очередь, зависят от скорости изменения нагрузки и “мягкости” напряженного состояния. Поскольку вязкость (в том числе ударная) является интегральной характеристикой, зависящей одновременно от прочности и пластичности, то она более резко реагирует на изменения структурного состояния материалов, чем другие свойства, что особенно ярко проявляется при пониженных температурах.

*Испытание проводится на специальном **маятниковом копре** (рис. 2). Работа* ΔW_F*, затраченная маятником на разрушение определяется по зависимости*

$$\Delta W_F = Gh_1 - Gh_2 - W_{ПОТЕРЬ}$$

где G - вес маятника;

Gh_1 *- потенциальная энергия, запасенная маятником в самом верхнем его положении;*

Gh_2 *- потенциальная энергия, сохраненная маятником после разрушения образца.*

$W_{потерь}$ *- энергия потерь, затраченная маятником на преодоление вредных сопротивлений (трение в узлах копра, сопротивление воздуха). Потери для каждого экземпляра копра известны.*

Испытания проводятся для металлов согласно ГОСТ 9454-84; для пластмасс - согласно ГОСТ 4647-84.

Металлы испытываются на копрах с предельной энергией маятника до 300 Нм и скоростью в пределах от 4 до 7 м/с, пластмассы - до 5 Нм и $3{,}5 \pm 0{,}5$ *м/с, соответственно.*

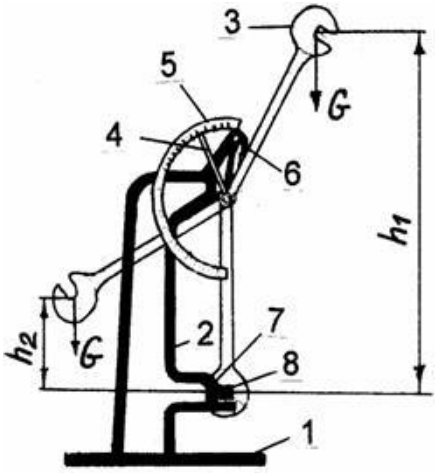


Рис.2. Схема маятникового копра

Описание установки для испытаний. ***Испытание на ударную вязкость*** *проводится на маятниковом копре ХР-05, схема которого показана на рис. 2. Копер состоит из массивного основания 1 с двумя вертикальными стойками 2. К верхней части этих стоек на горизонтальной оси подвешен маятник 3, представляющий собой плоский стальной диск с вырезом. Кроме того, на оси маятника установлена стрелка 4, напротив которой к стойке 2 прикреплена шкала 5 для отсчета затрат энергии на разрушение образца. Для фиксации маятника в исходном верхнем положении предусмотрена защелка 6.*

На стойках 2 предусмотрены опоры 7 для установки образцов 8 из испытуемого материала. Расстояние между опорами 7 регулируется в пределах от 40 до 70 мм (см. рис.3, а). Для образцов толщиной 5 мм и менее, расстояние между опорами 7 принимают $40 \pm 0{,}2$ *мм, а для образцов толщиной более 5 мм –* $70 \pm 0{,}2$ *мм.*

При проведении испытаний маятник 3 поднимают вверх и фиксируют защелкой 6. Стрелку 4 устанавливают на нуль, а на опоры 7 помещают испытуемый образец 8. Затем, повернув защелку 6, отпускают маятник 3, который при своем падении разрушит образец и двигаясь далее, переместит стрелку 4 по шкале 5, на которой считывают величину энергии, сохраненной маятником после разрушения образца. Образец устанавливают на нижних опорах копра симметрично относительно опор и так, чтобы надрез был обращен в сторону, противоположную направлению удара.

Образцы для испытаний на ударную вязкость изготавливают механической обработкой из листов, плит или стержней; а также прессованием; или литьем под давлением. При испытании листовых и слоистых материалов толщиной менее 10 мм ширину поперечного сечения образцов принимают равной толщине этих листов. На образцах следует указать направление, соответствующее длине листа или плиты, из которых изготовлены эти образцы, так как механические свойства пластмасс в различных направлениях неодинаковы.

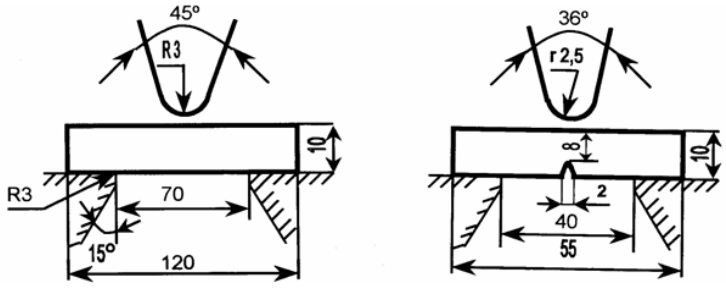
Образцы, изготовленные литьем под давлением, в соответствии с ГОСТ 4647 – 84 имеют размеры поперечного сечения ($6 \pm 0{,}2$) х ($4 \pm 0{,}2$) мм и длину - 55 ± 1 мм.

Поверхность образцов должна быть гладкой, ровной, без трещин, сколов, вздутий и раковин.

Форма надреза *стандартных образцов может быть в виде U, V, T.*

Согласно ГОСТ 9454-78 в качестве основного используется образец с U-образным надрезом, но в отдельных случаях применяются также образцы и с другой формой надрезов. V-образный выполняется с углом при вершине 45^0 *и радиусом закругления 0,25 мм, а роль T-образного надреза играет созданная на специальном приборе усталостная трещина. В соответствии с этим при записи ударной вязкости (КС) в ее обозначение вводится третья буква, указывающая вид надреза – KCU, KCV, KCT.*

Параметром KCV оценивается пригодность материалов для сосудов давления, трубопроводов и других конструкций повышенной надежности. Параметр KCT характеризует работу развития трещины при ударном изгибе и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Он учитывается при выборе металлов и сплавов для конструкций особо ответственного назначения (летательные аппараты, роторы турбин и т. п.)



а) **б)**

Рис. 3. Схема установки образцов: а) образцы из пластмасс; б) образцы из металлов

Данные для расчётов:
α-угол подъёма маятника до испытания, α=69о
β-угол вылета маятника после испытаний, β=6о
L-длинна плеча маятника, равна 2,1 м
P-Вес маятника, равен 7 кг
b-длинна грани квадратного сечения образца, равна 0,002 м
F-Площадь поперечного сечения квадратного образца (м2) F=b2
H-высота подъёма маятника до испытаний (м)
h-высота вылета маятника после испытаний (м)
Ар-работа определяемая расчетно (кГм)
Ат –работа затраченная на разрушение образца определяемая по таблице (кГм)
Ап-ударная вязкость определяемая по таблице (кГм/см2)
KCU-ударная вязкость определяемая расчётно (кГм/см2)

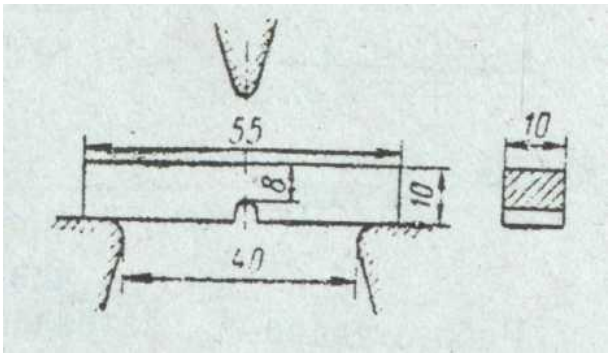


Рисунок 3.1 Образец для испытания на удар

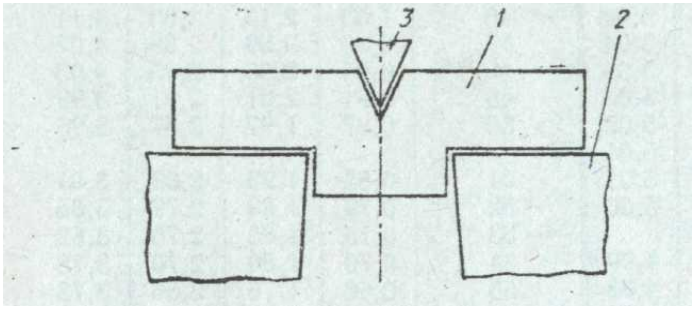


Рисунок 3.2 Шаблон для установки опор симметрично относительно ножа маятника

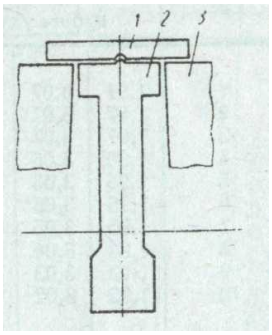


Рисунок 3.3 Шаблон для установки надреза образца симметрично относительно опор и ножа маятника.

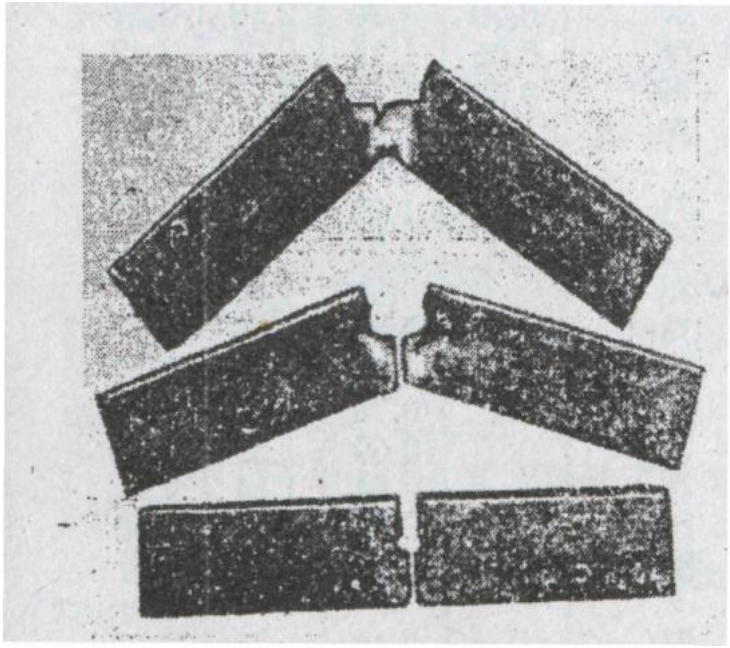


Рисунок 3.4 Искривление образцов в зависимости от вязкости стали при испытании на удар.

Если образец не сломался, что может быть в случае недостаточного запаса энергии копра или в случае очень вязкого материала (рис. 3.4**),** то в протоколе испытания отмечается «не сломался». Для излома другого образца увеличивается запас энергии маятника поднятием его на большую высоту.
Найти работу Ар затраченную на разрушение образца.
Ударная вязкость определяется с помощью формулы

$$KCU = \frac{A_p}{F} \quad (3.1)$$

$$KCU = \frac{9,352}{0,000004} = 2338000 \quad (кгм/см2)$$

Работа по излому образца определяется по формуле

Ар=Р(Н-h) (3.2)
Ар=7(1,347-0,011)=9,352 (кгм)

Высота подъёма маятника до испытания определяется с помощью формулы

H=L(1-cosα) (3.3)
H=2,1(1-cos69o)=1,347 (м)

Высота вылета маятника после испытания

h=L(1-cosβ) (3.4)
h=2,1(1-cos6)=0,011 (м)

Площадь поперечного сечения

F=b2 (3.5)
F=0,0022=0,000004 (мм2)
Определение ударной вязкости с помощью таблиц.
Чтобы не вычислять величину Ан по формуле, пользуются специальной таблице, в которой для каждого угла α начального подъема маятника и угла β взлета маятника указана величина работы Ат=1,95 кГм
Ударная вязкость определяется в этом случае по той же формуле Ап=Ат/F
Ап=1,95/0,000004 =487500 (кгм/см2)
Вывод: Ударная вязкость показывает, какой стойкостью обладает материал к ударному излому

Вопросы для подготовки к защите работы

- Какая цель лабораторной работы?
- В каких случаях проводятся испытания на ударную вязкость?
- Какие существуют методы определения работы удара?
- Что такое удельная ударная вязкость?
- В каких единицах измеряется удельная ударная вязкость?
- Какие факторы влияют на величину ударной удельной вязкости?
- О каких свойствах материала судят по величине ударной удельной вязкости?
- Как определить энергию, запасенную маятником в самом верхнем положении?
- Как влияет расстояние между опорами установки образца на величину удельной ударной вязкости?
- Чем принципиально отличаются образцы из металла от образцов из других материалов?
- Как изменится удельная ударная вязкость с изменением температуры?
- Чем отличается маятниковый копер для определения ударной вязкости металлов от копра для испытаний неметаллических материалов?
- Как влияет на ударную вязкость содержание в металле углерода и фосфора?
- Что понимают под температурным интервалом хрупкости?
- В чем состоит принцип работы маятникового копра?
- Какие материалы подвергаются испытаниям на ударную вязкость?
- В чем сходство и различие статических и динамических испытаний?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностр. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин; под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. 862 с.

Дополнительная:

Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.

Практическая работа № 4

Тема: Составление характеристики диаграммы состояния ($Fe-Fe_3-C$) «железо-цементит

Цель работы: Изучить диаграмму состояния железо-цементит ($Fe-Fe_3-C$)

Порядок выполнения работы:

1. Записать номер, тему и цель работы.
2. Прочитать теоретическую часть.
3. Описать структурные превращения в системе
4. Зарисовать диаграмму состояния железо-цементит ($Fe-Fe_3-C$)

Теоретическая часть

Диаграмма железоуглеродистых сплавов может быть представлена в двух вариантах: метастабильном, отражающем превращения в системе “железо-карбид железа”, и стабильном, отражающем превращения в системе “железо-графит”. Наибольшее практическое значение имеет диаграмма состояния “железо-карбид железа”, т.к. для большинства технических сплавов превращения реализуются по этой диаграмме.

Карбид железа (Fe_3C) называют цементитом, поэтому метастабильную диаграмму железоуглеродистых сплавов называют диаграммой состояния “железо-цементит” ($Fe-Fe_3C$).

На рисунке 1 представлена диаграмма состояния системы сплавов железо-углерод.

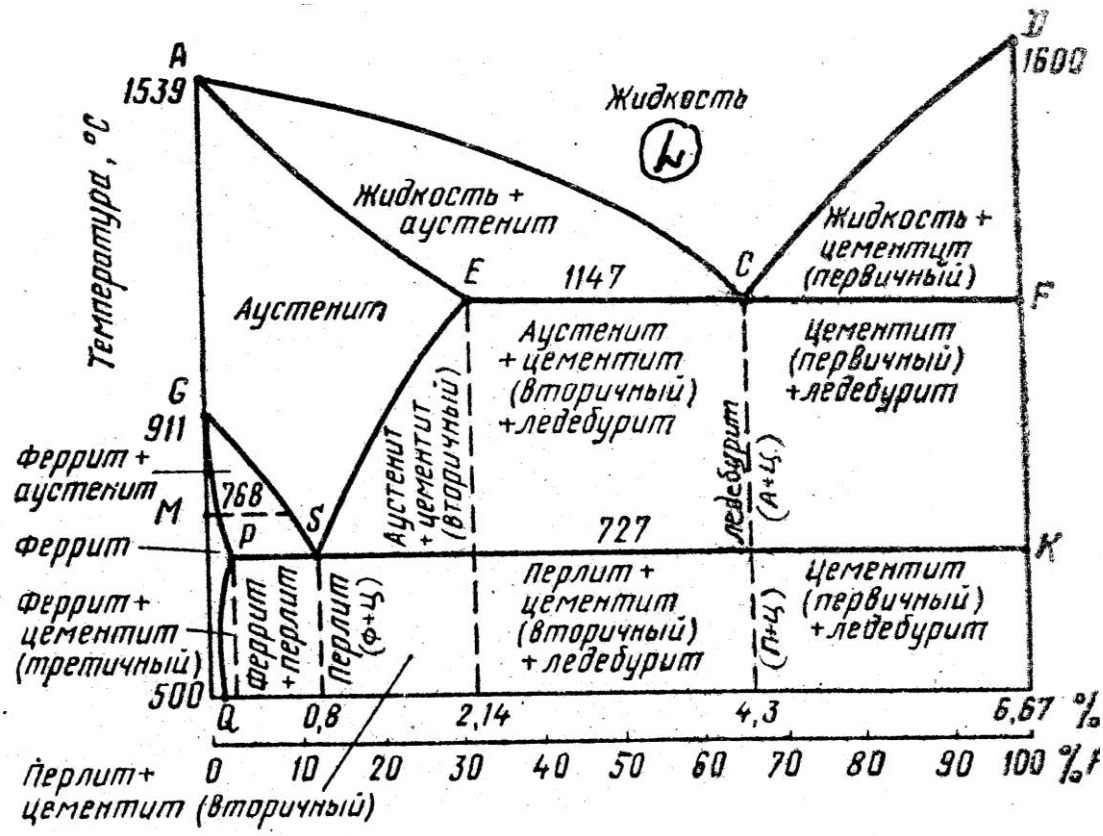


Рис. 1. Диаграмма состояния системы сплавов железо-углерод

Анализ диаграммы железо-углерод

Диаграмма состояния (Fe – C) отражает сложный фазовый состав железоуглеродистых сплавов, поскольку в этих сплавах превращения происходят не только в жидком, но и в твердом состоянии.

Анализ диаграммы в настоящей работе проводится по упрощенной схеме. Ниже приводятся основные характеристики компонентов системы железо-углерод.

Ж е л е з о – металл переходной группы, серебристо-серого цвета, очень пластичный, с температурой плавления 1539º С. Железо имеет несколько аллотропических модификаций. При нормальной температуре железо имеет объемо-центрированную кристаллическую решетку и обозначается Fe - α . α – железо обладает сильно выраженными магнитными свойствами. При температуре 768º С (точка Кюри) железо теряет магнитные свойства. Кристаллическая решетка при этом не меняется – аллотропического превращения не происходит. При температуре 911º С происходит аллотропическое превращение железа. Кубическая объемо-центрированная решетка переходит при этой температуре в кубическую гранецентрированную решетку. Такое железо обозначается Fe - γ. γ – железо имеет высокую пластичность и вязкость, оно немагнитно.

У г л е р о д – неметаллический элемент с температурой плавления 3500º С. Углерод имеет три аллотропические модификации: алмаз, графит и уголь. В форме алмаза и угля в металлических сплавах углерод не присутствует. В форме графита в промышленных сплавах углерод встречается только в серых чугунах. Кристаллическая решетка графита –

гексагональная. Чаще всего в железоуглеродистых сплавах углерод встречается в виде твердых растворов внедрения в α- и γ- железо, а также в виде химического соединения Fe_3C – цементита.

Фазами сплава являются:

Ф е р р и т (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в α – железо. Феррит имеет кубическую объемо-центрированную кристаллическую решетку. Максимальная растворимость углерода в α – железе равна 0,25% при температуре 727º С; минимальная при комнатной температуре – 0,01% .

А у с т е н и т (А) – твердый раствор углерода и других примесей в γ- железе. Аустениту присуща кубическая гранецентрированная решетка. Растворимость углерода в аустените меняется в зависимости от температуры сплава. Так, при температуре 1147º С в аустените растворяется до 2,14% углерода, а при температуре 727º С – только до 0,8%.

Ц е м е н т и т (Ц) – карбид железа Fe_3C, химическое соединение железа с углеродом, содержащее 6,6% углерода. Обладает сложной кристаллической решеткой.

Различают *первичный цементит* (Ц1) – который кристаллизуется из жидкой фазы у всех железоуглеродистых сплавов, содержащих углерод более 4,3%; *вторичный цементит* (Ц2), выделяющийся при вторичной кристаллизации из аустенита в интервале температур от 1147 до 727º С, и *третичный цементит* (Ц3), образующийся за счет переменной растворимости феррита в интервале температур ниже 727º С.

П е р л и т (П) – эвтектоидная механическая смесь, состоящая из двух фаз: феррита и цементита. Перлит образуется при распаде аустенита эвтектоидного состава (0,8%) при температуре 727º С. Содержание углерода в перлите для всех железоуглеродистых сплавов постоянно и равно 0,8%.

Л е д е б у р и т (Л) – эвтектическая смесь, образующаяся из жидкой фазы, содержащей 4,3% при температуре 1147º С. Ледебурит состоит из двух фаз – аустенита и цементита. При температуре 727º С вследствие аллотропических превращений (Fe_γ-Fe_α) происходит перекристаллизация ледебурита с образованием смеси, состоящей из зерен перлита и цементита.

Выше линии ACD (рис. 1) все сплавы находятся в жидком состоянии. Она называется линией – л и к в и д у с. Ниже линии AECF, называемой с о л и д у с, все сплавы системы полностью кристаллизуются и находятся в твердом состоянии. Горизонтальные линии ECF и PSK, соответственно называются линиями э в т е к т и ч е с к и х и э в т е к т о и д н ы х превращений.

Фазовые превращения на линиях по диаграмме железо-углерод.

Обозначение линий	Фазовые превращения на линиях (при охлаждении)	Перечень фаз	Количество фаз
AC	Начало выделения аустенита из жидкости	Аустенит + жидкость	2
AE	Конец выделения аустенита из жидкости	Аустенит + жидкость	2
EC	Конец выделения аустенита из жидкости и образование ледебурита	Аустенит + цементит + + жидкость	3

CD	Начало выделения цементита (первичного) из жидкости	Жидкость + цементит	2
CF	Конец выделения цементита из жидкости и образование ледебурита из жидкости	Жидкость + цементит + + аустенит	3
ECF	Образование ледебурита из жидкости	Жидкость + аустенит + цементит	3
GS	Начало выделения феррита из аустенита	Аустенит + феррит	2
GP	Конец выделения феррита из аустенита	Аустенит + феррит	2
PS	Конец выделения феррита из аустенита и образование перлита из аустенита	Аустенит + феррит + + цементит	3
PSK	Образование перлита из аустенита	Аустенит + феррит + + цементит	3
SE	Начало выделения цементита (вторичного)	Аустенит + цементит	2
SK	Конец выделения цементита (вторичного) из аустенита образование перлита из аустенита	Аустенит + цементит + + феррит	3
PQ	Начало выделения цементита (третичного) из феррита	Феррит + цементит	2

Диаграмма железо-цементит (Fe – Fe_3C)

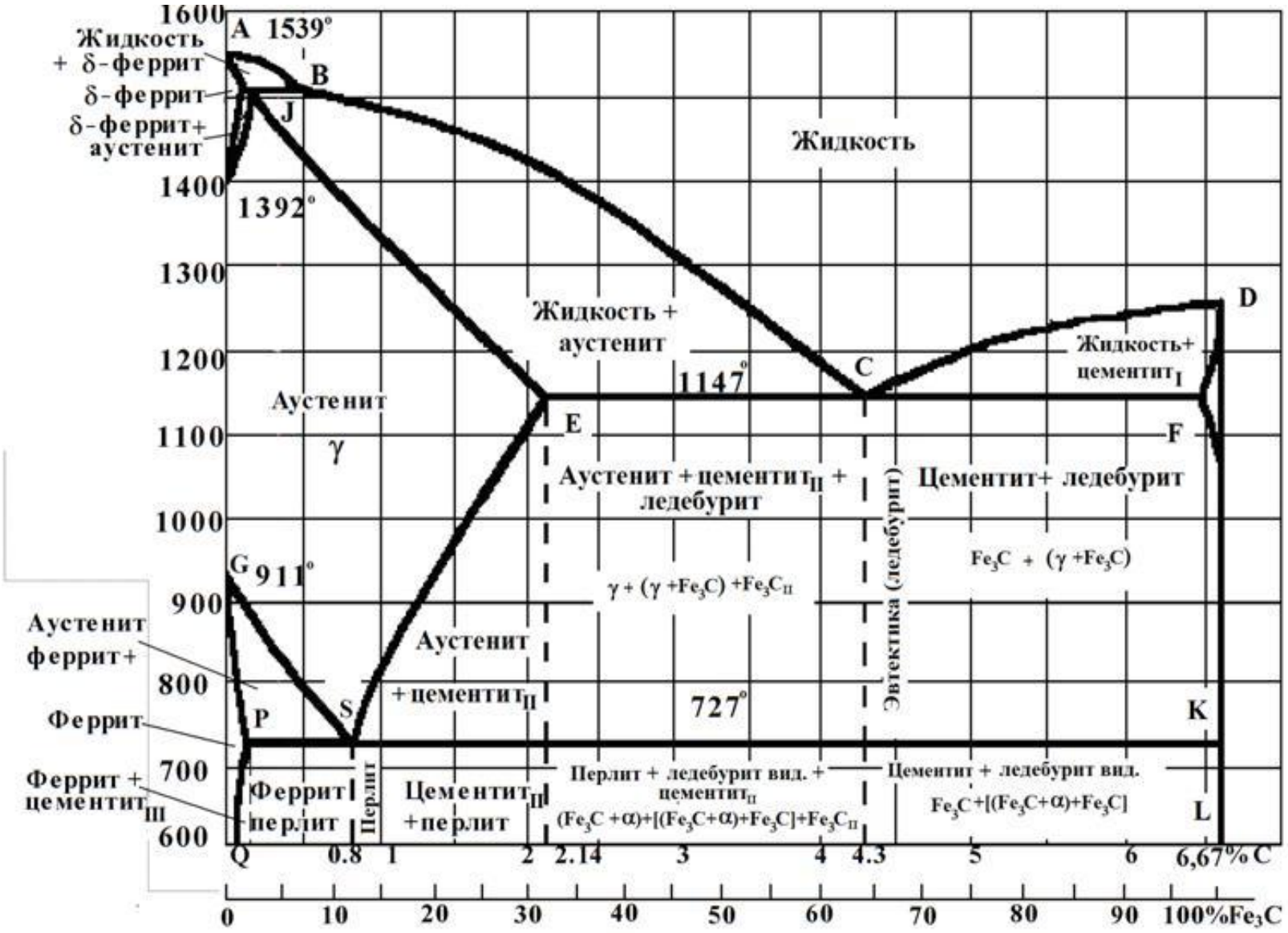


Рис.3.1. **Диаграмма состояния железо-цементит**

Контрольные вопросы:

1 Фазы железоуглеродистых сплавов

2 Компоненты железоуглеродистых сплавов

3 В каких координатах построена диаграмма состояния системы железо-углерод

4 Описать структурный состав сплава выше и ниже линии солидус и ликвидус

5.Общая характеристика диаграммы *Fe - C*..

6.Назовите области диаграммы (однофазные и двухфазные).

7.Назовите фазы в диаграмме и охарактеризуйте каждую из них.

8.В каких состояниях может находиться углерод в железоуглеродистых сплавах ?

9.Объясните, как определяется состав и количество фаз в диаграмме.

10.Расскажите о классификации сталей.

11.Влияние углерода на механические свойства сталей.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

I. Гуляев А.П. Металловедение. - М.: Металллургия, 1986. – 542 с.

2. Арзамасов Б.И. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1986.

3. Лахтин Ю.М., Леонтьева Б.П. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1990. – 493 с.

4. Основы материаловедения. Под ред. И.И.Сидорина. - М.: Машиностроение, 1976.

5. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. - М.: Металлургия, 1983.

6. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Металлургия, 1984. 359 с.

7. Руководство к лабораторным работам по материаловедению. Под ред. И,И.Сидорина. - М.: Высшая школа, 1967.

Практическая работа № 5

Тема: Составление характеристики выбора материала для деталей по заданным эксплуатационным свойствам

Цель работы: Изучить выбор материалов для деталей по заданным эксплуатационным свойствам

Порядок выполнения работы:

1. Записать номер, тему и цель работы.
2. Дать понятие эксплуатационным свойствам.
3. Перечислить и описать основные виды эксплуатационных свойств.
4. Привести свой пример.

Краткие теоретические сведения.

Эксплуатационные свойства материала должны обеспечить детали надежное выполнение своих функций. С этой точки зрения его выбор производится на основании расчетов, экспериментов или опыта эксплуатации аналогичных деталей. Данные по выбору марок материалов для изготовления деталей, работающих в определенных условиях, обычно приводятся в справочниках.

Под *эксплуатационными свойствами материала* понимают свойства нанесенного и обработанного на детали покрытия, обеспечивающие требуемый срок эксплуатации детали в заданных условиях.

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях, к ним относятся:

1.износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения;

2.коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных и щелочных сред;

3.жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре;

4.жаропрочность – это способность материала сохранять прочность и твердость при высоких температурах;

5.хладостойкость– способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах;

6.антифрикционность – способность материала прирабатываться к другому материалу.

Износостойкость является *эксплуатационным свойством материала*, детали или сопряжения, поэтому износ может выражаться различными способами

Предельная температура применения не должна изменять *эксплуатационные свойства материала*.

Тогда пленка из высокоплавкого полимера обеспечивает *необходимые электроизоляционные, прочностные, теплофизические и эксплуатационные свойства материала*, а пленка с более низкой температурой плавления (внутренний слой в кабеле) - сварку материала при сохранении требуемого уровня его основных показателей. Кроме того, пленка не должна расслаиваться после сварки (получения кабеля) и после термического старения в течение заданного времени.

Легирование интерметаллидов является эффективным методом управления *эксплуатационными свойствами материала*.

Теплостойкость (максимальная температура, выше которой *эксплуатационные свойства материала* резко ухудшаются) пластмассовых труб низкая: для полиэтиленовых она составляет 120 С, для поливинилхлоридных труб 60 С, для полипропиленовых труб 150 С и для стеклопластиковых труб 120 - 160 С.

Одним из наиболее агрессивных внешних факторов, влияющих на *эксплуатационные свойства материалов*, является влага, находящаяся в атмосфере.

Понижение температуры текучести под влиянием пластификатора отрицательно сказывается на *эксплуатационных свойствах материала*, но имеет большое значение при переработке полимеров в изделия.

Разработаны и в основном заполнены базы по иностранным маркам и *эксплуатационным свойствам материалов*.

Химические свойства ароматических полиамидов изучены мало, хотя в ряде случаев они определяют *эксплуатационные свойства материала* и их знание совершенно необходимо для осуществления модификации ароматических полиамидов.

Таким образом, условия переработки, в частности, на стадии фиксирования формы изделия, определяют *эксплуатационные свойства материала*. Отверждение расплава может приводить как к кристаллическому, так и к аморфному стеклообразному состоянию полимера.

Им же введен термин технической жесткости климата и погоды, под которым понимается интенсивность воздействия комплекса климатических факторов на *эксплуатационные свойства материалов* и надежность машин, оборудования и сооружений.

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

Вопросы для самопроверки:

1. Назовите основные механические характеристики машиностроительных материалов.
2. Какие из свойств материалов определяют работоспособность конструкции и ее служебные характеристики? Приведите примеры.
3. Расскажите о некоторых методах определения механических свойств машиностроительных материалов.
4. Назовите основные технологические свойства машиностроительных материалов

Литература:

1. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах. Изд. 3, переработанное. Том 1,2. Под ред. А.Н. Малова. М. «Машиностроение», 1972.
2. Технология конструкционных материалов. Учебник для вузов. М. «Машиностроение», 1977.

Практическая работа № 5

Тема: Составление характеристики режимов резания для конструкционных материалов
Цель работы: Изучить режимы резания для конструкционных материалов

Порядок выполнения работы:

1. Дать описание **классификации и характеристике движения резания, зарисовать рис.1**
2. Дать описание режимам резания, **зарисовать рис.2**.

1. Классификация и характеристика движения резания

Чтобы с заготовки срезать слой металла, необходимо режущему инструменту и заготовке сообщить относительные движения. Эти относительные движения обеспечиваются рабочими органами станков, в которых заготовка и инструмент устанавливаются и закрепляются. Движения рабочих органов станков делят на рабочие или движения резания, установочные и вспомогательные.

Рабочие или движения резания – это движения, которые обеспечивают срезание с заготовки слоя металла. К ним относят главное движение резания и движение подачи.

За главное движение резания принимают движение, определяющее скорость деформирования металла и отделения стружки. За ***движение подачи*** принимают движение, которое обеспечивает непрерывность врезания режущей кромки инструмента в материал заготовки. Эти движения могут быть непрерывными или прерывистыми, по своему характеру – вращательными, поступательными, возвратно-поступательными. Скорость главного движения обозначают буквой *V*, скорость движения подачи (величину подачи) - *S*.

Установочные движения – движения, обеспечивающие взаимное расположение инструмента и заготовки для срезания с нее определенного слоя материала.

Вспомогательные движения – движения рабочих органов станков, не имеющие прямого отношения к процессу резания. Примерами служат: быстрые перемещения рабочих органов, переключение скоростей резания и подач и др.

Для любого процесса резания можно составить **схему обработки.** На схеме условно обозначают обрабатываемую заготовку, ее установку и закрепление на станке, закрепление и положение инструмента относительно заготовки, а также движения резания. Инструмент показывают в положении, соответствующем окончанию обработки поверхности заготовки. Обработанную поверхность на схеме выделяют утолщенными линиями. Показывают характер движений резания.

На заготовке различают: **обрабатываемую поверхность 1**, с которой срезается слой металла; **обработанную поверхность 3**, с которой металл уже срезан; **поверхность резания 2**, образуемую в процессе обработки главной режущей кромкой инструмента.

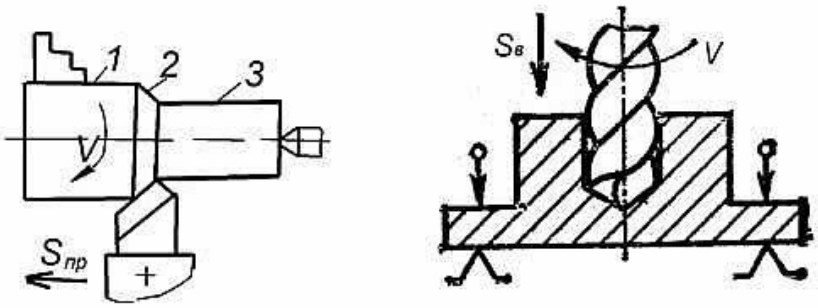


Рис.1. Схемы обработки заготовки точением и сверлением

2. Режимы резания

Основными элементами режима резания являются: ***скорость резания V, подача S и глубина резания t.*** Элементы режима резания рассмотрим на примере токарной обработки.

Скорость резания *V* – это расстояние, пройденное точкой режущей кромки инструмента относительно заготовки в направлении главного движения в единицу времени. Скорость резания имеет

размерность м/мин или м/сек. При точении скорость резания равна:

$V = \frac{\pi D_{заг} n}{1000}$ м/мин, где *Dзаг* – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

n – частота вращения заготовки в минуту.

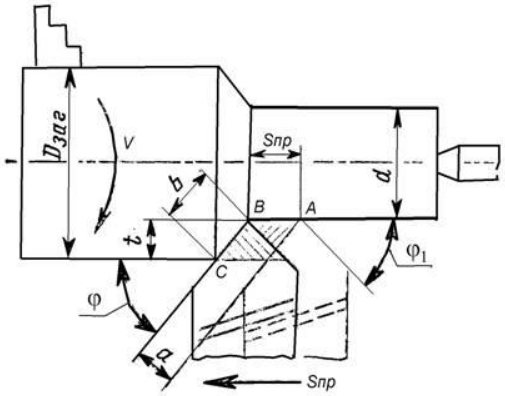


Рис.2. Элементы режима резания и геометрия срезаемого слоя

Подачей *S* называют путь точки режущей кромки инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи за один оборот или один ход заготовки или инструмента.

Подача в зависимости от технологического метода обработки имеет размерность:

мм/об – для точения и сверления;

мм/об, мм/мин, мм/зуб – для фрезерования;

мм/дв.ход – для шлифования и строгания.

По направлению движения различают подачи: продольную *Snp*, поперечную *Sn*,

вертикальную *Sв*,

наклонную *Sн*, круговую *Sкр*, тангенциальную *Sm* и др.

Глубиной резания *t* называют расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно последней. Глубину резания относят к одному рабочему ходу инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Глубина резания имеет размерность мм. При точении цилиндрической поверхности глубина резания определяется по формуле:

$t = \frac{D_{заг} - d}{2}$, где *d* –диаметр обработанной цилиндрической поверхности заготовки, мм.

Глубина резания ***всегда перпендикулярна*** направлению движения подачи. При подрезании торца глубиной резания является величина срезаемого слоя, измеренная перпендикулярно к обработанному торцу. При прорезании и отрезании глубина резания равна ширине канавки, образуемой резцом.

Глубина резания и подача являются технологическими величинами, которыми оперируют в производственных условиях (при нормировании). Для теоретических исследований имеют значение геометрические величины срезаемого слоя: ширина, толщина и площадь срезаемого слоя.

Шириной срезаемого слоя «*b*» называется расстояние в мм между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по поверхности резания.

$b = \frac{t}{\sin \varphi}$, где φ - главный угол в плане.

Толщиной срезаемого слоя «*a*» называется расстояние в мм между двумя последовательными положениями поверхности резания за один оборот обрабатываемой детали, измеренное перпендикулярно к ширине срезаемого слоя

$a = S \cdot \sin \varphi$.

Площадь срезаемого слоя «*f*» равна

$t = \frac{D_{заг} - d}{2}$, мм2.

Эта площадь сечения срезаемого слоя называется *номинальной*. Действительная площадь срезаемого слоя будет меньше номинальной за счет гребешков, оставляемых резцом на обработанной поверхности. Высота и форма остающихся гребешков влияет на шероховатость обработанной поверхности.

Вопросы для самоконтроля:

1. Расскажите о порядке выбора глубины резания и подачи.
2. Выберите скорость резания при точении конструкционной стали σb = 75 кг/мм² при глубине резания t — 3 мм твердосплавным резцом Т15К6, пользуясь табл. 6, принимая подачу s = 0,2 мм/об.
3. Выберите скорость резания при точении σb = 50-60 кг/мм² при глубине резания t = 2 мм твердосплавным резцом Т5К10 при подаче s = 0,25 мм/об.
4. Выберите скорость резания при точении легированной стали σb = 100 кг/мм² при глубине резания t = 1 мм твердосплавным резцом Т30К4 при подаче s = 0,15 мм/об и при стойкости резца в 30 мин.
5. Каким основным требованиям должен удовлетворять токарный станок для скоростного резания?

Литература

1. Курсовое проектирование по технологии машиностроения. Минск, «Высшая школа», 1975.
2. Нефедов Н. А., Осипов К.А. Сборник задач и примеров по резанию металлов и режущему инструменту. 5–е изд., перераб. и доп. — М : «Машиностроение», 1990.
3. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно–заключительного для технического нормирования станочных работ. Изд. 2–е, М., «Машиностроение», 1974.
4. Справочник металлиста. В 5–ти т. Т. 3. Под ред. А. Н. Малова. М. «Машиностроение», 1977.
5. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах. Изд. 3, переработанное. Том 1,2. Под ред. А.Н. Малова. М. «Машиностроение», 1972.
6. Технология конструкционных материалов. Учебник для вузов. М. «Машиностроение», 1977.

Практическое занятие № 7

Тема: Составление характеристики термической обработки углеродистых сталей.

Цель работы: Изучить влияние термической обработки на свойства углеродистой стали.

Порядок выполнения работы:

1. Записать тему и цель работы.
2. Дать определение термической обработке.
3. Зарисовать рис.1 и дать его описание.
4. Перечислить и описать основные термические обработки стали.
5. По формуле (1) определить твердость отпечатка.

$$HB = \frac{2P}{\pi \cdot D\sqrt{D^2 - (D^2 - d^2)}} \qquad (1)$$

Теоретическая часть

Механические свойства стали можно изменить в желаемом направлении термической обработкой. При этом изменение свойств происходит вследствие превращений, ведущих к получению стали одного и того же состава, но и различных структур.

Термической обработкой называется технологический процесс тепловой обработки металлов и сплавов, в результате, которого изменяются их свойства в желательном для нас направлении. Это достигается путём изменения структуры металла и сплава.

Аустенит устойчив только при температурах выше линии *PSK.* Поэтому охлаждение сталей ниже этих температур сопровождается распадом аустенита на феррито-цементитную смесь. Температура начала такого распада и полнота его протекания зависит от скорости охлаждения. Структуру стали после охлаждения ее различными скоростями можно определить с помощью диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита или так называемой *С*-образной кривой (рис. 1).

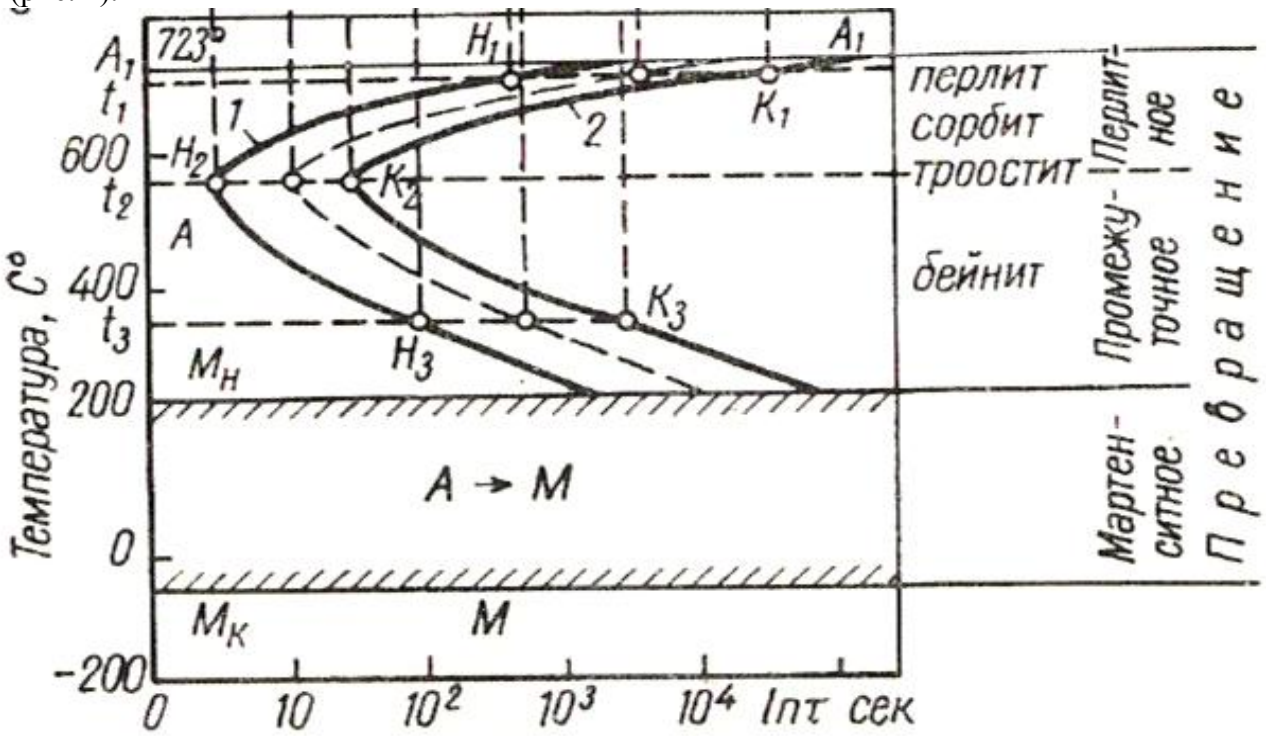


Рис. 1. Диаграмма изотермического распада аустенита.

Изменение скорости охлаждения стали обеспечивают, применяя различные среды, охлаждающая способность которых приведена в таблице 1.

Таблица 1.

Охлаждающая среда	Скорость охлаждения при температурах 650-550 °С, °С/мин	Структура среднеуглеродистой стали после охлаждения
Печь	1	Перлит
Спокойный воздух	30-50	Сорбит
Минеральное масло	100-150	Троостит
Вода при 18 °С	600	Мартенсит + остаточ. аустенит
10%-ный раствор NaOH в воде 18 ^{0}С	1200	Мартенсит

Основными операциями термической обработки стали являются: отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг - это такой вид термообработки, когда сталь нагревают до определённой температуры, выдерживают при этой температуре некоторое время и затем медленно охлаждают (чаще всего вместе с печью). Отжигом устраняется неоднородность структуры стали, достигается повышение пластичности, улучшение обрабатываемости её резанием, повышение вязкости металла, уничтожение внутренних остаточных напряжений, появившихся в результате предшествующей обработки, и подготовки структуры металла к закалке.

Основные виды отжига:

- ***рекристаллизационный отжиг.*** Применяется для устранения наклепа после холодной пластической деформации или как промежуточный отжиг при волочении. Нагрев до 727 °С;
- ***диффузионный отжиг.*** Применяется для устранения дендритной ликвации в слитках и отливках. Нагрев до 110-1200 °С с выдержкой 12-15 часов (иногда до 100 часов) и медленным охлаждением. Недостаток – укрупнение зерна. Для исправления структуры применяется нормализация;
- ***полный отжиг с фазовой перекристаллизацией.*** Применяется для улучшения обрабатываемости резанием доэвтектоидной стали. Нагрев выше линии *GSE* на 30-50 °С с последующим медленным охлаждением в печи;
- ***неполный отжиг.*** Применяется для получения зернистого перлита в заэвтектоидных сталях с целью улучшения обрабатываемости резанием. Нагрев выше линии *PSK,* выдержке и последующее медленное охлаждение;
- ***изотермический отжиг.*** Применяется для высоколегированных сталей. Нагрев выше линии *PSK*, выдержке и последующее перенесении в соляную ванну с медленным охлаждением.

Твердость стали после отжига составляет НВ=180-250 кГ/см^2. Скорость охлаждения в печи $\vartheta_{охл}$ = 1-5 °С/мин. Сталь имеет перлитную структуру, т.е. феррито-цементитную эвтектоидную смесь.

В заводской практике часто вместо сложного отжига применяют так называемую нормализацию кованых и катаных изделий, а также фасонных стальных отливок перед их обработкой на станках.

Нормализацией называют такую термическую обработку, при которой сталь, нагретую до температуры выше **Ac3** на 30 - 50°С , охлаждают на спокойном воздухе (скорость охлаждения соответствует V2 . ***Цель нормализации*** - получение в стали мелкозернистой однородной структуры, улучшение обрабатываемости резанием, устранение наклепа после обработки резанием и подготовки структуры к последующей закалке.

Закалкой называется термическая операция, заключающаяся в нагреве металла выше температуры превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением для получения структурно-неустойчивого состояния сплава. Целью закалки является, главным образом, повышение прочности и твёрдости стальных изделий. Твердость стали после отжига составляет НВ=650 - 700 кГ/см^2. Сталь после закалки имеет либо мартенситную игольчатую структуру с углом между иглами 60° или 120 °, либо мартенсит с остаточным аустенитом, либо мартенсит с троостит или мартенсит с сорбитом..

Практическое значение закалка имеет в сталях, содержащих не менее 0,3 % углерода.

Технические результаты закалки зависят от следующих факторов:

1) от химического состава стали;
2) от температуры закалки;
3) от продолжительности нагревания при закалке;
4) от скорости охлаждения при закалке;
5) от времени выдержки при температуре мартенситного превращения;
6) от массы изделия.

Скорость охлаждения сталей зависит от среды охлаждения, т.е. от закаливающей жидкости. Наиболее распространенной жидкостью является вода при температуре 12-15 °С. Низкая температура воды увеличивает внутренние напряжения в изделии. Для обострения процесса

закалки в воду добавляют поваренную соль, соду или нашатырь в количестве 2-3 %. Значительно слабее воды закаливают различного рода масла, причем минеральные масла (керосин) действуют сильнее растительных масел. Часто пользуются комбинацией воды и масла.

Получаемая игольчатая структура (мартенсит), названный в честь ученого Мартенса, представляет собой нормальную структуру сильно закаленной стали, получающуюся при очень быстром охлаждении со скоростью 600-700 °С/мин в интервале температур от температуры закалки до 200 °С.

Но оптимальные условия будут получены, если в структуре стали цементит имеет зернистую форму, а не пластинчатую, который по границам зерен повышает ее хрупкость. Для этого закаленную сталь подвергают отпуску.

Отпуском называют нагрев закаленной стали до температуры ниже критической точки (ниже линии *PSK*) **,** выдержку при заданной температуре с последующем охлаждении в печи, воде или масле до комнатной температуры.

После закалки стальные изделия находятся в напряженном состоянии. Кроме того, структура и свойства закаленной стали нестабильны, склонны к постепенному изменению. Часто при вылеживании закаленных изделий уже через несколько часов в них появляются трещины, большие поводки и коробления.

Поэтому отпуск закаленных изделий во всех случаях является обязательной операцией. Его следует проводить немедленно после закалки.Отпуском достигаются понижение вредного действия внутренних напряжений в стали, оставшихся после закалки, уменьшение её хрупкости, повышение вязкости, улучшение обрабатываемости резанием. Отпуск является заключительной операцией термообработки.

В зависимости от температуры нагрева различают:

1) ***Низкий отпуск.*** Нагрев до 150-200 °С и медленное охлаждение в печи. При этом снижаются внутренние напряжения, твердость остается высокой (58-62 HRC). Структура – мартенсит отпуска. Применяется после поверхностной закалки, цементации, нитроцементации.
2) ***Средний отпуск.*** Нагрев до 350 – 500 °С и медленное охлаждение в печи. Снимаются внутренние напряжения, твердость снижается (40-50 HRC). Структура – троостит отпуска. Этот отпуск обеспечивает высокий предел упругости и применяется после закалки рессор и пружин;
3) ***Высокий отпуск.*** Нагрев до 550-600 °С и охлаждение в масле. Обеспечивается высокий комплекс механических свойств (максимальная величина ударной вязкости). Этот отпуск называется улучшением стали. Структура – сорбит отпуска с зернистым строением цементита.

Литература:

1.Геллер Ю. А. ,Рахштадт А. Г. Материаловедение, М., Металургия.1980. 447с.
2.Лахтин Ю. М. ,Леонтьев В. П .Материаловедение, .М.,Машиностроение,1980,405с
3.Самохоцкий А. И., Кунявский М. Н. Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов. М.Машиностроение, 1981, 173с.
4.Паисов И. В. Пособие к лабораторным работам по материаловедению и термический обработки металлов, М., Металлургия, 1968, 95с.

Практическое занятие № 8

Тема: Составление характеристики микроанализа сталей после ХТО.

Цель работы: Ознакомление с основными положениями теории химико-термической обработки; изучение технологических процессов важнейших видов химико-термической обработки и структуры слоев стали после ХТО.

Порядок выполнения работы:

1 Изучить теорию и технологию химико-термической обработки.
2 дать определение химико-термической обработке, описать её процессы.
3 дать описание основных видов ХТО и зарисовать рисунки каждого вида.

Химико-термической обработкой *(ХТО) называют технологические процессы, приводящие к диффузионному насыщению поверхностного слоя деталей различными элементами.* ХТО применяют для повышения твердости, износостойкости, сопротивления усталости и контактной выносливости, а также для защиты от электрохимической и газовой коррозии. При ХТО происходят три элементарных процесса: *диссоциация, абсорбция* и *диффузия*. *Диссоциация* протекает в газовой среде и состоит в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента. Степень распада молекул газа называется *степенью диссоциации*. *Абсорбция* происходит на границе «газ–металл» и заключается в поглощении поверхностью металла насыщающего элемента. Под *диффузией* понимают проникновение элемента вглубь насыщаемого металла. В результате ХТО образуется диффузионный слой.

Двухфазные области в диффузионном слое в процессе ХТО не образуются. Наиболее распространенными видами химико-термической обработки являются *цементация, азотирование, цианирование (нитроцементация), алитирование, борирование, хромирование*.

Цементация стали. *Технологический процесс диффузионного насыщения углеродом называется* ***цементацией***. Цель ее – получить детали машин и механизмов с твердой и износоустойчивой поверхностью при сохранении вязкой, хорошо выдерживающей динамические

нагрузки сердцевины. Цементации подвергают зубчатые колеса, валы, оси, распределительные валики, кулачки, червяки, изготовленные, как правило, из малоуглеродистой стали с содержанием углерода не более 0,3 %. Данный технологический процесс осуществляется путем нагрева и длительной выдержки деталей в науглероживающей среде при температуре аустенитного состояния стали (900–950 ^{o}C).
Содержание углерода в поверхностной зоне определяется пределом его растворимости в аустените при температуре цементации (линия *SE* диаграммы «железо–цементит»). Микроструктура поверхностной области стали после цементации приведена на рисунке 15.3.

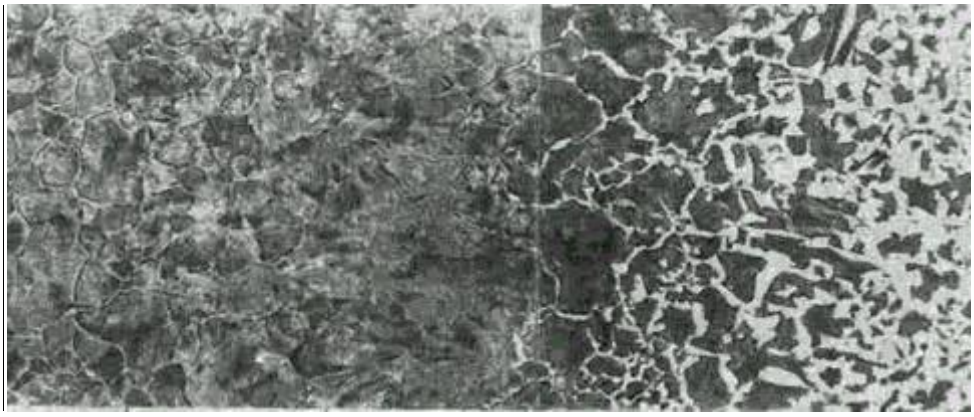


Рисунок 15.3 – Микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой цементации

После цементации изделия подвергаются неполной закалке с последующим низким отпуском. В результате термической обработки высокоуглеродистая поверхностная зона приобретает структуру отпущенного мартенсита с включением карбидов (цементита). Твердость ее достигает значения HRC 62.
После термической обработки твердость сердцевины определяется химическим составом стали и находится в пределах HRC 15–35. В зависимости от упрочнения сердцевины цементируемые стали делятся на три группы: *углеродистые стали с неупрочняемой сердцевиной, низколегированные стали со слабо упрочняемой сердцевиной, высоколегированные стали с упрочняемой сердцевиной.* К *первой группе* относятся стали 10, 15, 20. В этом случае даже после закалки в воде сердцевина имеет феррито-перлитную структуру. При закалке в масле сердцевина низколегированных сталей *второй группы,* к которым относятся 15Х, 20Х,15ХР,20ХН, претерпевает бейнитное превращение и заметно упрочняется. В сердцевине высоколегированных цементируемых сталей 20ХГР, 20ХНР, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХН3, 12Х2Н4, 18Х2Н4В после охлаждения в масле и далее на воздухе образуется структура нижнего бейнита или мартенсита, что приводит к весьма интенсивному упрочнению.
Азотированием *называется процесс поверхностного насыщения стали азотом.* Оно применяется в целях повышения твердости, износостойкости и предела усталости, а также коррозионной стойкости деталей машин. Процесс азотирования проводится при 480–650 ^{o}C в течение 1–90 ч в среде газообразного аммиака, диссоциирующего по реакции$2NH_3$ « $2N + 3H_2$.
Образовавшийся атомарный азот адсорбируется поверхностью и диффундирует в металл. Изменения микроструктуры поверхностной зоны (рисунок 15.4, б), происходящие при азотировании, можно представить на основании диаграммы **«железо–азот»** (рисунок 15.4, а). В этой системе возможно образование следующих фаз: a – азотистый феррит; g – азотистый аустенит; g¢ – нитрид Fe_4N; e – нитрид Fe_3N. Со многими легирующими элементами азот также образует химические соединения – нитриды (CrN, Cr_2N, MnN, TiN, MoN, AlN и др.).

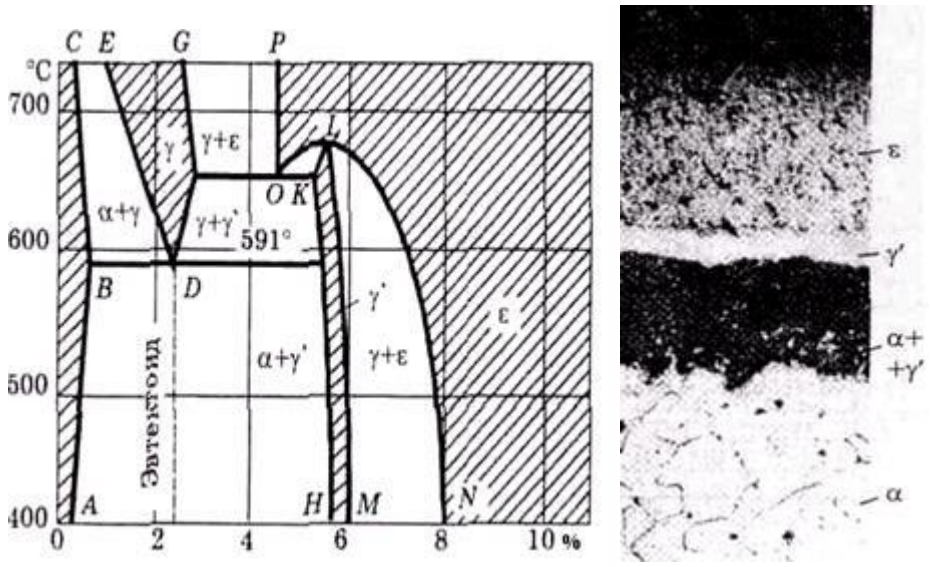


Рисунок 15.4 – Диаграмма системы Fe–N (а) и микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой азотированию (б)

Азотирование является окончательной обработкой. Термическая обработка – улучшение, заключается в закалке и высоком отпуске, предшествует азотированию. *Азотированию подвергают такие детали, как гильзы гидроцилиндров и коленчатые валы дизелей, валы, шпиндели, ходовые винты и трубчатые изделия в станкостроении, зубчатые колеса.*

Цианированием *называется процесс одновременного насыщения поверхности деталей углеродом и азотом.* Различают высокотемпературное и низкотемпературное цианирование.

Высокотемпературное цианирование проводят при 800–900 ^{o}C. Цель его – повысить твердость, износостойкость и усталостную прочность деталей машин из малоуглеродистых и среднеуглеродистых простых и легированных сталей. После высокотемпературного цианирования следует закалка и низкий отпуск.

Низкотемпературное цианирование проводят при 540–580 ^{o}C и применяют в основном для повышения стойкости окончательно термически обработанного инструмента из быстрорежущей стали.

Недостатками процесса жидкостного цианирования являются большая ядовитость цианистых солей и высокая их стоимость.

Газовое цианирование называют ***нитроцементацией***. Этот процесс осуществляют в смеси науглероживающих и азотирующих газов. В качестве науглероживающего может быть любой газ, применяемый при газовой цементации. Азотирующим газом является аммиак. Структура цианированного слоя определяется количеством углерода и азота, находящихся в нем. На состав и свойства цианированного слоя особое влияние оказывает температура цианирования. Повышение ее увеличивает содержание углерода в слое, снижение –содержание азота.

В настоящее время высокотемпературное газовое цианирование (нитроцементация) широко внедряется вместо газовой цементации. Высокотемпературное цианирование проводят при более низких температурах, не вызывающих рост зерна как, например, при газовой цементации. Кроме этого, цианированные изделия по твердости и износостойкости превосходят цементированные. Это объясняется наличием в диффузионном слое не только углерода, но и азота.

Алитированиие - это процесс насыщения **поверхности** стальных и других металлических изделий алюминием с целью повышения окалиностойкости до 1100 °С и сопротивления атмосферной **коррозии**

Борирование – *это диффузионное насыщение поверхностного слоя бором.* Процесс проводится с целью повышения поверхностной твердости и износостойкости, а также коррозионной стойкости. Наиболее перспективны для промышленного использования борирования в порошкообразных смесях, в расплавах солей и газовое борирование.

Защитный слой предохраняет активный от окисления в процессе борирования в кислородосодержащей атмосфере.

Борирование сталей проводят при температурах 800–1050 ^{o}C в течение 2–10 ч. Борированный слой состоит из двух зон: зоны боридов и переходной зоны (рисунок 15.5, а).
Средне-, тяжелонагруженные детали после борирования подвергаются закалке и отпуску.
Борирование используют для упрочнения различных деталей машин, технологической оснастки и инструмента, работающих в условиях интенсивного износа.
Хромирование *– это процесс диффузионного насыщения поверхностных деталей хромом.*
Хромирование железа и сталей с содержанием углерода менее 0,2 % проводят с целью повышения коррозионной стойкости в различных агрессивных средах и жаростойкости. Стали с содержанием углерода более 0,3 % подвергают хромированию, прежде всего, для повышения твердости и износостойкости, а также коррозионной стойкости и жаростойкости.
Диффузионное превращение хромом проводится при температурах 900–1200 ^{o}C в течение 4–10 ч. Микроструктура стали У8 после хромирования представлена на рисунке 15.5, б. При необходимости после хромирования средне- и тяжелонагруженные детали подвергают закалке с последующим отпуском. Хромирование применяется для повышения стойкости штампового инструмента, пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов, различных деталей двигателей и газовых турбин, работающих при высоких температурах, фильтров нефтяных скважин, деталей насосов и турбобуров, крепежных деталей.
а) б)

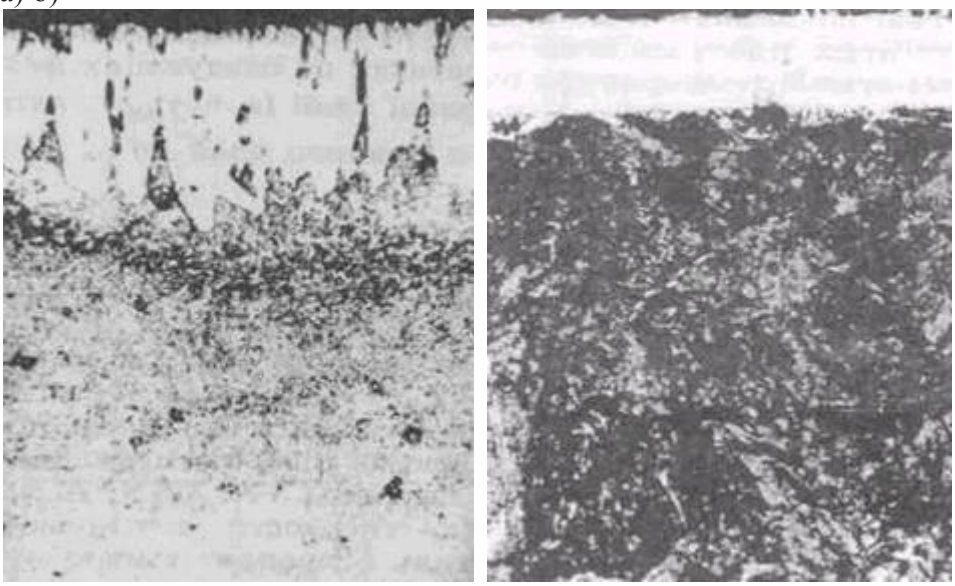


Рисунок 15.5 – Микроструктура поверхностной области стали, подвергнутой борированию (а) и хромированию (б)

Вопросы для самопроверки

1. Какие фазовые превращения происходят при нагреве доэвтектоидных сталей до температур образования аустенита?
2. Какие три фазовые превращения происходят при распаде переохлажденного аустенита?
3. Что представляют собой перлитное, бейнитное и мартенситное превращения?
4. Какая разновидность мартенсита образуется в конструкционной стали?
5. Какие структурные изменения происходят при повышении температуры отпуска закаленных сталей?
6. Что представляют собой перлит, сорбит, троостит, бейнит, мартенсит?
7. Что представляют собой отпущенный мартенсит, троостит отпуска, сорбит отпуска?
8. В чем заключается химико-термическая обработка материалов?
9. Какие основные разновидности химико-термической обработки применяются в машиностроении?
10. Какую микроструктуру имеет поверхностный слой после цементации?

11. Какую микроструктуру имеет поверхностный слой после цементации, закалки и низкого отпуска?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: учеб. для студентов машиностр. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюшин; под ред. Г.П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. 862 с.

Дополнительная:

Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.

Практическое занятие № 9

Тема: Составление характеристики микроанализа цветных сплавов

Цель: Закрепление теоретических знаний о микроанализе цветных металлов, научиться расшифровывать заданные марки цветных металлов и сплавов и определять область их применения.

Задание:

1 Определить по таблице 1 заданные марки цветных сплавов
2 Расшифровать данные марки
3 Описать характеристики заданных сплавов
4 Результаты оформить в таблицу 2
5 Сделать вывод о проделанной работе.

Классификация и маркировка цветных сплавов
Медь и её сплавы

Технически чистая медь обладает высокой пластичностью и коррозийной стойкостью, малым удельным электросопротивлением и высокой теплопроводностью. По чистоте медь подразделяют на марки (ГОСТ 859-78):

Марка	МВЧк	МОО	МО	Ml	М2	М3
Содержание Cu+Ag, не менее %	99,993	99,99	99,95	99,9	99,7	99,5

После обозначения марки указывают способ изготовления меди: к - катодная, б - бескислородная, р - раскисленная. Медь огневого рафинирования не обозначается.
МООк - технически чистая катодная медь, содержащая не менее 99,99% меди и серебра. М3 - технически чистая медь огневого рафинирования, содержит не менее 99,5% меди и серебра.

Медные сплавы разделяют на **бронзы и латуни.**

Бронзы - это сплавы меди с оловом (4 - 33% О хотя бывают без оловянные бронзы), свинцом (до 30% С), алюминием (5-11% AL), кремнием (4-5% Si), сурьмой и фосфором (ГОСТ 493-79 , ГОСТ 613-79, ГОСТ 5017-74, ГОСТ 18175-78).

Латуни - сплавы меди с цинком (до 50% Zn) и небольшими добавками алюминия, кремния, свинца, никеля, марганца (ГОСТ 15527-70, ГОСТ 17711-80).

Медные сплавы предназначены для изготовления деталей методами литья, называют литейными, а сплавы, предназначенные для изготовления деталей пластическим деформированием - сплавами, обрабатываемыми давлением.

Медные сплавы обозначают начальными буквами их названия (Бр или Л), после чего следуют первые буквы названий основных элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество элемента в процентах. Приняты следующие обозначения компонентов сплавов:

А - алюминий
Мц - марганец
С - свинец
Б - бериллий
Мг - магний
Ср - серебро
Ж - железо
Мш - мышьяк
Су - сурьма
К - кремний
Н - никель
Т - титан
Кд - кадмий
О - олово
Ф - фосфор
Х - хром
Ц – цинк
Бр – бронза
Л – латунь
М – молибден
В - вольфрам

Примеры:

БрА9Мц2Л - бронза, содержащая 9% алюминия, 2% Mn, остальное Cu ("Л"' указывает, что сплав литейный);

ЛЦ40Мц3Ж - латунь, содержащая 40% Zn, 3% Mn, ~l% Fe, остальное Cu;

Бр0Ф8,0-0,3 - бронза на ряду с медью содержащая 8% олова и 0,3% фосфора;

ЛАМш77-2-0,05 - латунь содержащая 77% Cu, 2% Al, 0,055 мышьяка, остальное Zn (в обозначении латуни, предназначенной для обработки давлением, первое число указывает на содержание меди).

В несложных по составу латунях указывают только содержание в сплаве меди:
Л96 - латунь содержащая 96% Cu и ~4% Zn (томпак);
Лб3 - латунь содержащая 63% Cu и -37% Zn.

Алюминий и его сплавы

Алюминий - легкий металл, обладающий высокими тепло- и электропроводностью, стойкий к коррозии. В зависимости от степени частоты первичный алюминий согласно ГОСТ 11069-74 бывает особой (А999), высокой (А995, А95) и технической чистоты (А85, А7Е, АО и др.). Алюминий маркируют буквой А и цифрами, обозначающими доли процента свыше 99,0% Al; буква "Е" обозначает повышенное содержание железа и пониженное кремния.

А999 - алюминий особой чистоты, в котором содержится не менее 99,999% Al;

А5 - алюминий технической чистоты в котором 99,5% алюминия.

Алюминиевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Те и другие могут быть не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются прокаткой, ковкой, штамповкой. Их марки приведены в ГОСТ4784-74. К деформируемым алюминиевым сплавам не упрочняемым термообработкой, относятся сплавы системы Al-Mn и AL-Mg:Амц; АмцС; Амг1; АМг4,5; Амг6. Аббревиатура включает в себя начальные буквы, входящие в состав сплава компонентов и цифры, указывающие содержание легирующего элемента в процентах. К деформируемым алюминиевым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al-Cu-Mg с добавками некоторых элементов (дуралюны, ковочные сплавы), а также высокопрочные и жаропрочные сплавы сложного хим.состава.

Дуралюмины маркируются буквой "Д" и порядковым номером, например: Д1, Д12, Д18, АК4, АК8.

Чистый деформируемый алюминий обозначается буквами "АД" и условным обозначением степени его чистоты: АДоч (>=99,98% Al), АД000(>=99,80% Al), АД0(99,5% Al), АД1 (99,30% Al), АД(>=98,80% Al).

Литейные алюминиевые сплавы (ГОСТ 2685-75) обладает хорошей жидкотекучестью, имеет сравнительно не большую усадку и предназначены в основном для фасонного литья. Эти сплавы маркируются буквами "АЛ" с последующим порядковым номером: АЛ2, АЛ9, АЛ13, АЛ22, АЛЗО.

Иногда маркируют по составу: АК7М2; АК21М2, 5Н2,5; АК4МЦ6. В этом случае "М" обозначает медь. "К" - кремний, "Ц" - цинк, "Н" - никель; цифра - среднее % содержание элемента.

Из алюминиевых антифрикционных сплавов (ГОСТ 14113-78) изготовляют подшипники и вкладыши как литьем так и обработкой давлением. Такие сплавы маркируют буквой "А" и начальными буквами входящих в них элементов: А09-2, А06-1, АН-2,5, АСМТ.

В первые два сплава входят в указанное количество олова и меди (первая цифра-олово, вторая-медь в %), в третий 2,7-3,3% Ni и в четвертый медь сурьма и теллур.

Титан и его сплавы

Титан - тугоплавкий металл с невысокой плотностью. Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструкционных сталей, поэтому при замене сталей титановыми сплавами можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40%. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него можно изготовить сложные отливки, но обработка резанием затруднительна. Для получения сплавов с улучшенными свойствами его легируют алюминием, хромом, молибденом.

Титан и его сплавы маркируют буквами "ВТ" и порядковым номером:
ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ4, ВТ8, ВТ14.

Пять титановых сплавов обозначены иначе:
0Т4-0, 0Т4, 0Т4-1, ПТ-7М, ПТ-3В.

Магний и его сплавы

Среди промышленных металлов магний обладает наименьшей плотностью(1700 кг/м3). Магний и его сплавы неустойчивы против коррозии, при повышении температуры магний интенсивно окисляется и даже самовоспламеняется. Он обладает малой прочностью и пластичностью, поэтому как конструкционный материал чистый магний не используется. Для повышения химико-механических свойств в магниевые сплавы вводят алюминий, цинк, марганец и другие легирующие добавки.

Магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (ГОСТ 14957-76) и литейные (ГОСТ 2856-79). Первые маркируются буквами "МА", вторые "МЛ". После букв указывается порядковый номер сплава в соответствующем ГОСТе.

Например:
МА1-деформируемый магниевый сплав №1; МЛ19-литейный магниевый сплав №19

Таблица 1

Исходные данные

№ варианта	Заданные марки	№ варианта	Заданные марки
1	М006, Амч3, ВТ1-00, МЛ3	16	БрА9Ж4Н4Мц1, Амг6, ВТ1-0, МА21
2	БрА9Мц2Л, АЛ19, ВТ1-0, МЛ4	17	ЛЦ23АбЖ3Мц2, Д16, ВТ16, МЛ19
3	БрА7Мц15Ж3Н2Ц2, А6, ОТ4-0, МА1	18	ЛАМш77-2-0,05, АЛ23, ВТ5, МА18
4	Бр04Ц7С5, АД0Е, ОТ4-1, МА2	19	Бр0Фб, Д18, ВТ1-00, МА19
5	БрОФ4-0, АЛ33, ОТ-4, МЛ19	20	ЛК80-3, АК4М4, ВТ22, МЛ8
6	ЛС63-2, Амц, ВТ5, МЛ15	21	БрКМцЗ-1, АК7, ВТ20,МЛ12
7	ЛА77-2, Д16, ВТ9, МА18	22	Бр06Ц6С3, АЛ9, ПТ-3В, МА2
8	М2р, АЛ25, ВТ14, МА15	23	ЛЦ38Мц2С2, Амг2, ВТ3, МЛ4
9	БрСу3Н3Ц3С20Ф, А8, ВТ16, МЛ5	24	БрАЖНМц9-4-4-1, АД0, ВТ14, МА20
10	ЛЦ40Мц3А, АЛ21, ВТ20, МА17	25	ЛАНКМц75-2-2, А7, ВТ9, МЛ9
11	ЛЖМц59-1-1, АК4М4, ВТ22, МЛ6	26	М006, Амч3, ВТ1-00, МЛ3
12	ЛС59-1, Д12, ПТ-7М, МЛ10	27	БрА9Мц2Л, АЛ19, ВТ1-0, МЛ4
13	Л68, А5Е, ПТ-3В, МА-12	28	БрА7Мц15Ж3Н2Ц2, А6, ОТ4-0, МА1
14	БрАЖНЮ-4-4, АЛ2, ВТ9, МА11	29	Бр04Ц7С5, АД0Е, ОТ4-1, МА2
15	БрА7Мц15Ж3Н2Ц2, АК9, ВТ5, МЛ8	30	БрОФ4-0, АЛ33, ОТ-4, МЛ19

Таблица 2

Маркировка цветных металлов

№ п/п	Заданная марка	Описание заданного металла или сплава	Область применения заданного металла или сплава

Литература

1. Тушинский, Л.И. Методы исследования материалов/ Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.Н. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 380 с.
2. Лахтин, Ю.М. Материаловедение/ Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
3. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов/ Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман и др. – М.: Высшая школа, 2001. – 622 с.
4. Евстратова, И.И. Материаловедение/ И.И. Евстратова и др. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 268 с.
5. Маркова, Н.Н. Железоуглеродистые сплавы/ Н.Н. Маркова. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – 96 с.
6. Ильина, Л.В. Материалы, применяемые в машиностроении: справочное пособие/ Л.В. Ильина, Л.Н. Курдюмова. – Орел: ОрелГТУ, 2007.

Практическое занятие № 10

Тема: Определение кинематической вязкости масла

Цель работы: Изучить и произвести расчет кинематической вязкости масла

Порядок выполнения работы:

1. Записать формулу кинематической вязкости.
2. Зарисовать вискозиметр Энглера.
3. Описать его устройство.
4. Решить задачи.

Кинематическая вязкость представляет собой отношение динамической вязкости к плотности вещества. $\upsilon = \mu / \rho$; где υ - кинематической вязкости (ню), ρ — плотность жидкости; μ — динамическая вязкость раствора (ми).

Кинематическая вязкость в старых источниках часто указана в сантистоксах (сСт).

В СИ эта величина переводится следующим образом: 1 сСт = 1 $мм^2/с$ = 10^{-6} $м^2/с$

Определение кинематической вязкости смазочного масла производят с помощью **вискозиметра** Когда две жидкости равного объема помещены в идентичные капиллярные вискозиметры и двигаются самотеком, вязкой жидкости требуется больше времени для протекания через капилляр. Если одной жидкости для вытекания требуется 200 секунд, а другой - 400, то по шкале кинематической вязкости вторая жидкость в два раза более вязкая, чем первая.

Кинематическая вязкость определяется легко и точно, поэтому для контроля над качеством производимых смазочных масел предпочтение отдают именно этому параметру.

Для определения вязкости жидкости, вязкость которой выше вязкости воды, используют вискозиметр Энглера. Кроме градусов Энглера, принятых в России и в европейских странах, используются: в Англии секунды – Редвуда 1, в США и американских странах – секунды Сейболта. Вязкость определяется по вискозиметру Редвуда или Сейболта в абсолютных единицах (секундах) путем замера времени истечения 50 мл (Редвуда) или 60 мл (Сейболта) при Т=20 ▫С

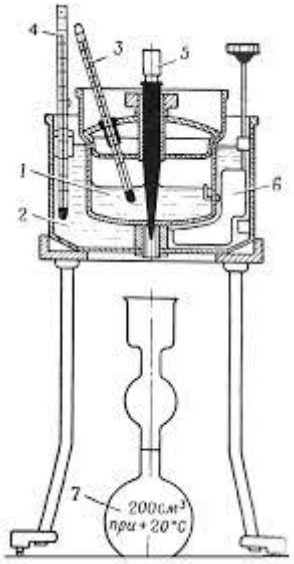


Рис. 1 Вискозиметр Энглера.

Состоит из 1- резервуар для продукта; 2 – масляная баня; 3 – термометр для продукта; 4 – термометр для бани; 5 – стержень; 6 – мешалка; 7 – мерная колба.

Решить задачу:

Пример 1.
Дана плотность жидкости ρ = 903,6 кг/м^3, динамическая вязкость раствора μ=0.62.
Определить: υ - кинематическую вязкость раствора.
Решение. Находим кинематическую вязкость по формуле.
$\upsilon = \mu / \rho = 0{,}62 * 903{,}6 = 560{,}2 \cdot 10^{-4} = 0{,}056$ Па ·с

Пример 2. Вязкость нефти, определенная по вискозиметру Энглера, составляет 8,5 ^{0}E. Определить динамическую вязкость нефти, если ее плотность р = 850 кг/м^3.

Решение. Находим кинематическую вязкость по формуле Убеллоде

$$\nu = \left(0{,}0731 \cdot {}^0E - \frac{0{,}0631}{{}^0E}\right)10^{-4};$$

$\upsilon = (0{,}0731 \cdot 8{,}5 - 0{,}0631/8{,}5) \cdot 10^{-4} = 6{,}14 \cdot 10^{-4}$ м^2/с;

находим динамическую вязкость нефти

$\mu = \nu \cdot \rho$; $\mu = 0{,}614 \cdot 10^{-4} \cdot 850 = 521{,}9 \cdot 10^{-4} = 0{,}052$ Па· с.

Контрольные вопросы

1. Что такое кинематическая вязкость?
2. Что называют динамической вязкостью и в каких единицах она измеряется?
3. В чем заключается определение кинематической вязкости и по какой формуле ее вычисляют?

Литература

1. Гуреев А.А., Иванова Р.Я., Щеголев Н.В. Автомобильные эксплуатационные материалы. – М.: Транспорт, 1974. – 280 с.
2. Путилова. Руководство к практическим занятиям по коллоидной химии. – М.: Высш. шк., 1961. – 333 с.
3. Степанов П.П., Чесноков Н.А. Современное состояние техники измерения вязкости. – М.: Стандартгиз, 1959. – 216 с.