



Комитет образования ЕАО
Областное государственное профессиональное
образовательное бюджетное учреждение
«ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ТЕХНИКУМ»

Рассмотрено _____ на
заседании ПЦК
(пр.№ _____ от _____)
Председ. ПЦК _____

Утверждено
Директор ОГПОБУ
«Политехнический техникум»
М.Б.Калманов _____

Методическая разработка
для преподавателей спец.дисциплин в СПО

**Практикум
по дисциплине «Материаловедение»
профессия «Сварщик»**

Учебно-методический практикум



Разработчик(и):

Щербаков А.Н.,
преподаватель спец.дисциплин, мастер п/о

Учебная методическая разработка для преподавателей и студентов СПО содержит материалы, позволяющие организовать учебный процесс спец.дисциплины «Материаловедение» (профессия «Сварщик») с применением современных интерактивных технологий. Даёт возможность познакомиться с опытом работы мастера производственного обучения в организации занятий по достаточно трудно усваиваемой специальной дисциплине.

Данный учебно-методический практикум содержит богатый практический материал, дает возможность повторить некоторые разделы дисциплины (так как содержит материал для контроля знаний обучающихся).

Данный методический материал помогает педагогу разобраться в актуальных вопросах преподавания дисциплины «Материаловедение» в техникуме, организовать образовательный процесс, делая его практикоориентированным.

Методическая разработка будет интересна преподавателям, методистам, студентам СПО.

Содержание

1. Введение.....	4
2. Практическая работа №1. Дефекты кристаллического строения.....	5
3. Практическая работа №2. Механические свойства металлов.....	9
4. Практическая работа №3. Способы упрочнения сплавов.....	15
5. Практическая работа №4. Диаграммы состояния сплавов.....	20
6. Практическая работа №5. Углеродистые стали.....	29
7. Практическая работа №6. Сплавы цветных металлов.....	41

ВВЕДЕНИЕ

Методическая разработка «Практикум по дисциплине «Материаловедение» представляет собой сборник теоретических сведений и заданий для выполнения практических работ по дисциплине «Материаловедение».

Цель проведения практических работ – привить студентам навыки самостоятельной работы с технической литературой; умение самостоятельно делать выводы. Для выполнения практических заданий Вам потребуются следующие умения и навыки:

- поиск сведений по определённой теме,
- выбор необходимой и достаточной информации из одного или нескольких источников,
- понимание как текстового, так и графического, и численного представления информации,
- анализ полученной информации,
- обобщение имеющихся данных,
- логическое построение ответа на вопрос, исключение противоречивых утверждений,
- использование фактических данных для подтверждения своего заключения (например, механических характеристик материалов),
- расчёт параметров структуры и механических характеристик с использованием формул,
- построение графических зависимостей по найденным числовым данным,
- выбор режимов термической обработки сплавов с использованием графических и аналитических зависимостей,
- грамотная и чёткая формулировка своих мыслей и окончательного вывода.

Познавательная ценность, самостоятельность работы студентов и приобретение ими навыков работы с технической литературой, анализа и интерпретации полученной информации, высокий обучающий эффект делают практические работы одной из важных частей изучения дисциплины «Материаловедение».

Темы практических работ соответствуют всем основным разделам дисциплины. Каждое задание выполняется индивидуально или подгруппой из двух человек для получения навыков совместной работы.

Перед выполнением практической работы необходимо прочитать теоретический материал и усвоить основные положения. В ходе выполнения работы Вам понадобятся дополнительные сведения из учебной и справочной литературы. Каждый студент оформляет выполненное задание индивидуально.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление о видах дефектов в кристаллах и их влиянии на прочность материалов.
3. Ответить на вопросы индивидуального задания.

Основные сведения по теме работы.

Идеальные кристаллы в природе не встречаются. Реальные кристаллы, в том числе металлы, всегда имеют отклонения от правильного строения, или дефекты.

Дефекты кристаллического строения классифицируют по геометрическому признаку – по размерам вызываемых ими нарушений периодичности кристаллической решётки. Различают точечные, линейные, поверхностные и объёмные дефекты.

Точечными называют дефекты, которые малы во всех трёх пространственных направлениях, т. е. соизмеримы с межатомным расстоянием. Это вакансии, межузельные атомы, примеси замещения и внедрения.

Вакансия – это отсутствие атома в узле кристаллической решетки, «пустое место». Атомы вокруг вакансии сближаются, так как в этом месте силы притяжения между атомами превышают силы отталкивания: $F_{\text{пр}} > F_{\text{отт}}$. Кристалл как бы сжимается, стремится «залечить» дефект. Смещение атомов вокруг вакансии упрощённо показано на рис. 1.1, а.

Вакансии играют огромную роль в процессах диффузии: они способствуют движению атомов внутри металла.

Число их растёт с увеличением температуры: атомы с поверхности металла могут переходить в окружающую среду, получив дополнительную энергию, а образовавшиеся вакансии продвигаются вглубь металла.

Межузельный атом – это собственный, «родной» атом металла, выбитый из узла. Их всегда меньше, чем вакансий. Вокруг межузельного атома соседи раздвигаются: здесь $F_{\text{отт}} > F_{\text{пр}}$ (см. рис. 1.1, б).

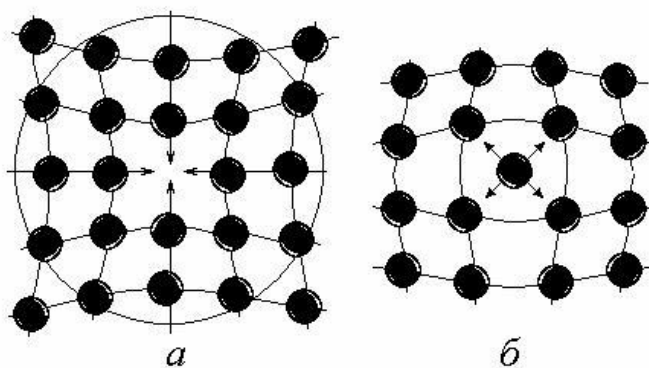


Рис. 1.1. Точечные дефекты:
вакансия (а) и межузельный атом (б)

Примесной атом, или **примесь** – это атом другого, «чужого» вещества, попавшего в металл (обычно из руды при выплавке). Примесные атомы могут замещать собственные в узлах кристаллической решётки (*примесь замещения*) или занимать поры между ними (*примесь внедрения*).

Примесные атомы искажают решётку сильнее, чем собственные межузельные атомы, что упрощённо показано на рис. 1.2.

Из всех точечных дефектов существенное влияние на прочность металла оказывают только примеси, особенно примеси внедрения. Они затрудняют пластическую деформацию металла, поэтому повышают прочностные характеристики.

2) *Линейными* называют дефекты, которые

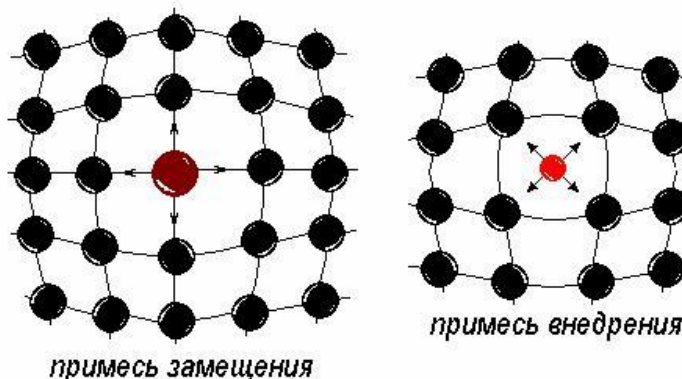


Рис. 1.2. Точечные дефекты: примесные атомы

малы только в двух пространственных направлениях, а в третьем имеют протяженность в тысячи и миллионы межатомных расстояний. Эти дефекты называют **дислокациями**. Дислокации бывают краевые, винто-вые и смешанные.

Краевая дислокация – это область под краем незавершённой, недостроенной атомной плоскости в металле. (Можно сказать и «над краем», так как понятия «низ» и «верх» в тонкой структуре металла не имеют значения.) Недостроенная плоскость является как бы «лишней», нарушающей идеальную структуру металла (рис. 1.3, а). Ее называют *экстраплоскостью*.

Краевая дислокация может возникнуть при воздействии силы P , деформирующей кристалл: в верхней части кристалла сдвиг прошел до линии AB , а левее этой линии кристалл остался недеформированным.

Возникла экстраплоскость, ее край AB и есть линия краевой дислокации (см. рис. 1.3, б).

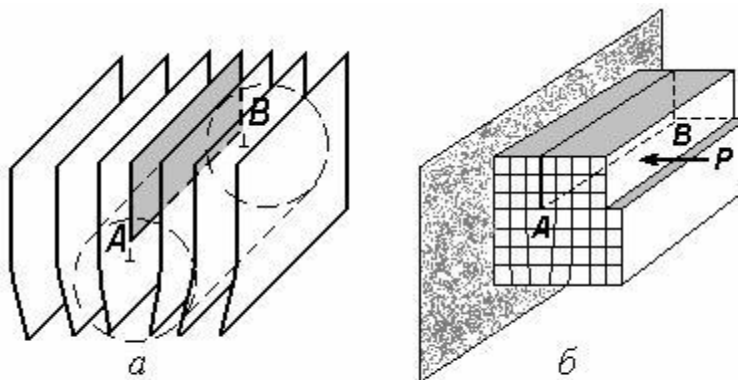


Рис. 1.3. Краевая дислокация (а) и возникновение дислокации при сдвиге (б)

У края экстраплоскости создается разрежение атомов, поэтому ближайшие к нему атомы сдвигаются в сторону отсутствующего ряда. Решётка здесь стремится сжаться, «закрыть» дефект. Область искажения решётки мала в двух направлениях, а в третьем может проходить через весь кристалл.

Можно представить краевую дислокацию как трубку диаметром в 2-3 межатомных расстояния, но очень большой длины. В эту разреженную область должны стремиться атомы примесей, так как это энергетически выгодно.

Это **границы зёрен** в поликристаллах, границы субзёрен и двойников (рис. 1.7). Внешние поверхности металлических изделий также являются поверхностными дефектами с особым строением.

Угол разориентировки между двумя соседними зёрнами может быть любым, а между двумя субзёрнами в зерне – не более 6°.

Очень важно хорошо представлять, что граница зерна – это не «стена» из чего-то между соседними зёрнами и не пустота между ними. Это область, где нарушается строго упорядоченное строение металла: атомные плоскости в одном зерне не имеют продолжения в соседнем, там атомные плоскости расположены в другом направлении.

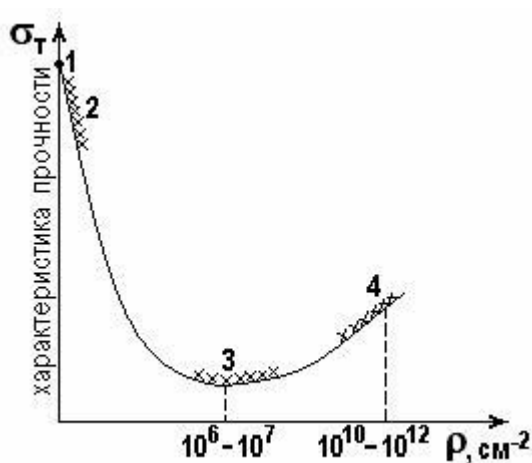


Рис. 1.6. Влияние плотности дислокаций на прочность:

1 – идеальный кристалл; 2 – «усы», кристаллы с минимальной плотностью дефектов; 3 – отожжённые металлы; 4 – сильно деформированные металлы с высокой плотностью дислокаций

Надо также не забывать, что границы зёрен – не линии, хотя именно так мы видим их на отполированной и протравленной поверхности металла. Это поверхности раздела между зёрнами, представляющими собой неправильные многогранники. Каждое зерно как бы «завёрнуто» в свою границу.

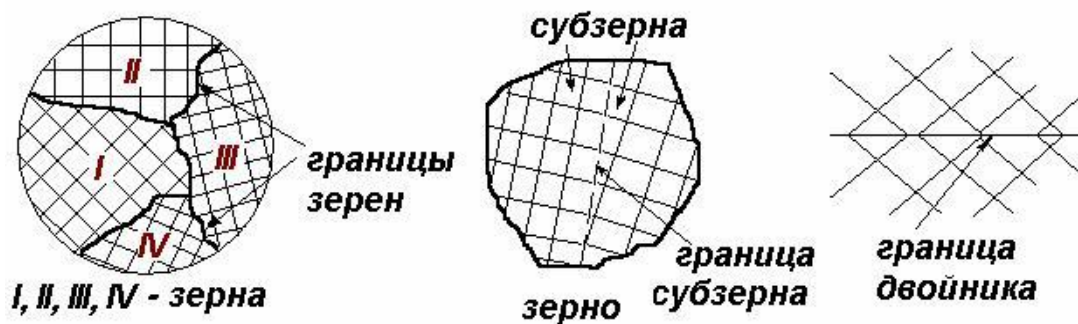


Рис. 1.7. Поверхностные дефекты: границы зёрен, субзёрен и двойников

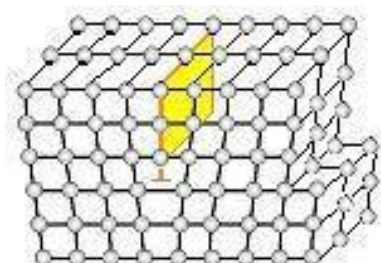
Влияние поверхностных дефектов на прочность металла велико: границы зёрен и субзёрен являются препятствиями для развития деформации, а значит – упрочняют металл. Чем больше поверхность границ в единице объёма, тем прочнее металл.

Объёмные дефекты во всех трёх измерениях намного больше межатомного расстояния. Это раковины, поры, зародыши трещин, не-металлические включения. Все объёмные дефекты являются очагами возможного разрушения, т. е. влияют на прочность отрицательно. По сути, эти дефекты – брак литейного производства и других видов обработки.

Задание для практической работы.

1. По какому признаку классифицируются дефекты кристаллического строения?

2. Какой это дефект?



3. Как дислокации влияют на прочность металла?

4. Объёмные дефекты кристаллического строения – это ...

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Цель работы:

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление о стандартных механических характеристиках и некоторых эксплуатационных свойствах металлов.
3. Ответить на вопросы индивидуального задания.

Основные сведения по теме работы.

Механические свойства определяют поведение металла под нагрузкой. Характеристики механических свойств получают при *механических испытаниях*. Для этого воздействуют на образец из данного материала какой-то силой и измеряют реакцию материала.

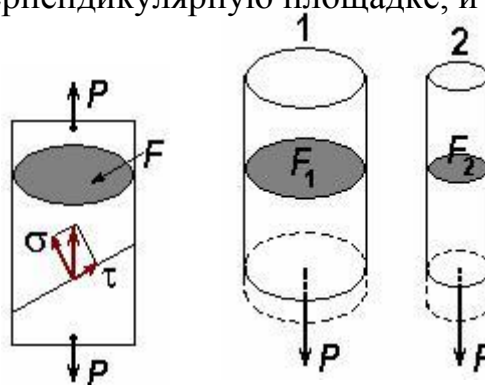
Под действием различных внешних сил металл деформируется и разрушается. Но величиной приложенной нагрузки нельзя охарактеризовать условия нагружения. Важно знать, на какую площадь поперечного сечения эта нагрузка действует.

За характеристику нагружения принимают **напряжение** – отношение силы к площади сечения, на которую она действует:

$$\sigma = \frac{P}{F}.$$

Напряжение, действующее на любую произвольно взятую площадку, можно разложить на нормальную составляющую σ , перпендикулярную площадке, и касательную (рис. 2.1, а).

При одинаковой нагрузке P деформация стержней (рис. 2.1, б) будет разной: второй удлинится больше, так как площадь его поперечного сечения меньше. Напряжение, которое выдерживает металл, является его основной механической характеристикой, не зависящей от размеров изделия.



Напряжение (а); деформация стержней
при одинаковой нагрузке (б)

Прочность – это способность металла сопротивляться деформации разрушению под действием внешних и внутренних напряжений. Государственные стандарты предусматривают получение характеристик прочности при испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб, кручение. Все это – *статические испытания*, с постепенным, плавным возрастанием нагрузки.

Наиболее информативно испытание на растяжение на разрывной машине; его и проводят в большинстве случаев для получения стандартных характеристик прочности (рис. 2.2, а).

Разрывная машина снабжена устройством для записи так называемой *диаграммы растяжения* – графика зависимости между приложенной нагрузкой P и удлинением образца Δl (рис. 2.2, б). Современные машины имеют выход на компьютер, который не

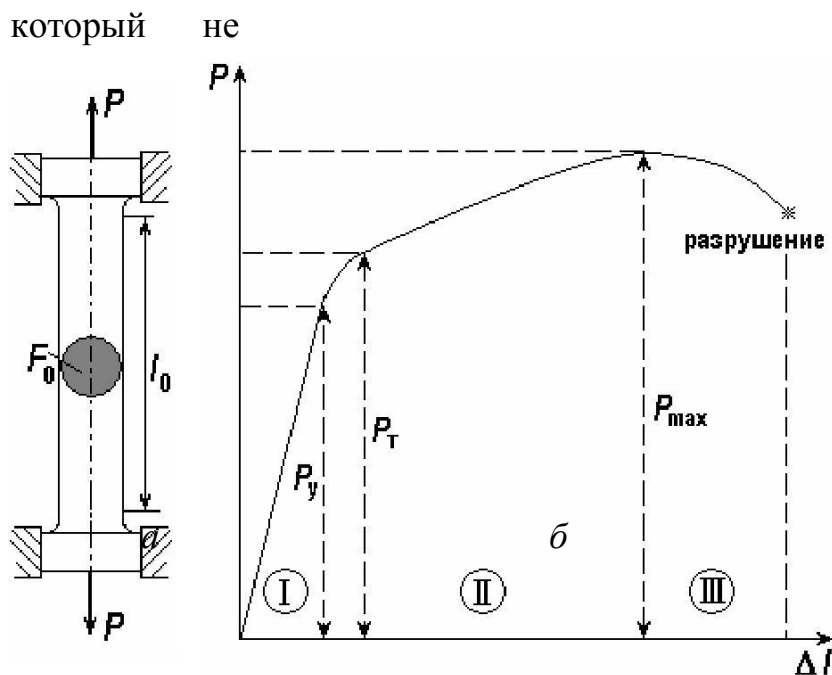


Рис. 2.2. Образец для испытаний на растяжение и схема испытания на разрывной машине (а); диаграмма растяжения пластичного металла (б)

только записывает диаграмму, но и рассчитывает характеристики прочности.

При росте нагрузки P длина образца l изменяется нелинейно.

На кривой растяжения можно выделить три

участка: I – область упругой деформации, II – область пластиче-

ской деформации, III – область развития трещин. Величина упругой деформации в металлах невелика: менее 1 %. Пластическая деформация у чистых металлов может достигать десятков процентов. Именно в этой области идет активное скольжение дислокаций. При превышении нагрузки P_{max} на образце возникает местное сужение – *шейка*, и деформация становится сосредоточенной. Дальнейшее развитие деформации в шейке приводит к зарождению трещин и разрушению образца.

Из этого испытания можно получить следующие характеристики прочности:

$$\sigma_y = \frac{P_y}{F_0} \text{ [МПа]}$$

предел упругости

напряжение, F_0

– это наибольшее

после которого образец возвращается к прежней форме и размерам;

предел текучести

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \text{ [МПа]}$$

— это

напряжение пластического течения металла без увеличения нагрузки;

предел прочности

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0} \text{ [МПа]}$$

— это

наибольшее напряжение, которое металл выдерживает, не разрушаясь.

Истинный, или физический предел текучести T определить трудно: не у всех металлов образуется «площадка текучести». Поэтому чаще всего определяют *условный предел текучести* $\sigma_{0.2}$, который вызывает

остаточную деформацию 0,2 %: $T \approx \sigma_{0.2}$.

Прочностные расчеты чаще ведут по пределу текучести, так как значительная пластическая деформация большинства деталей и конструкций недопустима. Но и предел прочности знать необходимо, так как он показывает, при каком напряжении начнется разрушение.

Пластичность

Пластичность — это способность металла деформироваться без разрушения.

Характеристики пластичности определяют из того же испытания на растяжение. Это

$$\text{относительное удлинение} = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

и

$$\text{относительное сужение} = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \cdot 100 \text{ [\%]},$$

где l_0 и l_K , мм — длина образца до и после испытания;

F_0 и F_K , мм² — начальная и конечная площадь поперечного сечения образца (рис. 2.2, а).

Относительное удлинение и относительное сужение являются одновременно и критериями надёжности: материал, имеющий большие значения и , более надёжен.

Твёрдость

Твёрдость — это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела.

Методы измерения, приборы, обозначение, единицы измерения твёрдости описаны в методических указаниях к лабораторной работе «Определение твёрдости металлов и сплавов». Изучить самостоятельно!

Вязкость

Вязкость – это способность материала сопротивляться разрушению при ударных, динамических нагрузках.

Характеристика вязкости определяется при испытании на ударный изгиб. Это, в отличие от всех предыдущих, динамическое испытание, при котором нагрузка прилагается к образцу с очень большой скоростью, за тысячные доли секунды.

Испытание проводится на маятниковом копре (рис. 2.3).

Тяжёлый маятник, поднятый на определённый угол α , отпускают. На пути движения маятника находится образец. Удар ножа маятника разрушает его. Произведённая при разрушении работа определяется как разность между потенциальной энергией маятника до и после испытания.

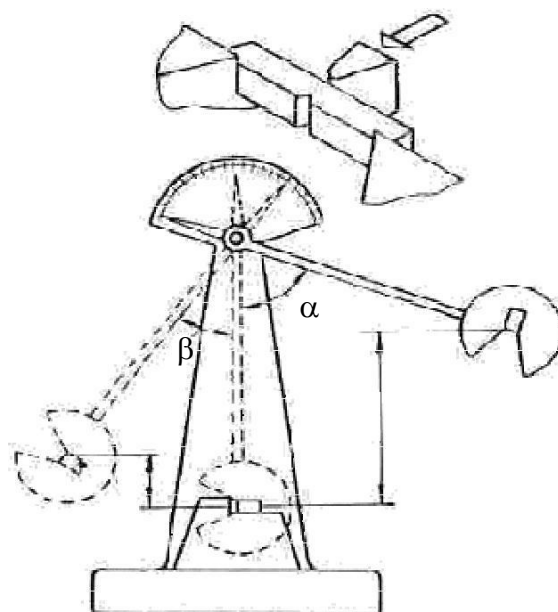


Рис. 2.3. Схема испытания на ударный изгиб

Ударная вязкость – это работа разрушения образца, отнесённая к площади поперечного сечения:

$$KV = \frac{A_p}{F} \text{ [Дж/м}^2\text{]}, \text{ где}$$

A_p – работа разрушения,

F – площадь поперечного сечения образца.

Образец должен иметь надрез – концентратор напряжения. Обозначение ударной вязкости зависит от вида надреза (рис. 2.4).

Для одного и того же материала $KCU > KCV > KCT$, т. е. чем острее надрез, тем легче разрушается материал.

Ударная вязкость тоже является критерием надёжности материала, гарантией, что он не будет разрушаться хрупко, внезапно.

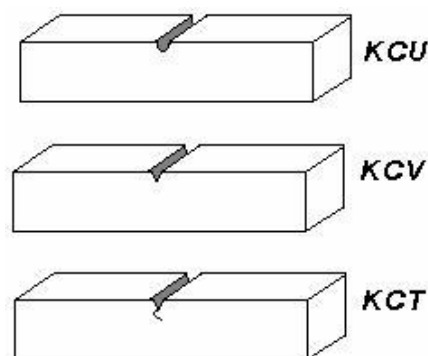


Рис. 2.4. Образцы для испытаний на ударную вязкость

Строго говоря, ударная вязкость является комплексной характеристикой, включающей удельную работу зарождения трещины a_z и удельную работу распространения трещины a_p . Для более достоверной оценки надёжности материала методом экстраполяции определяют ударную вязкость при радиусе концентратора r , стремящемся к нулю (рис. 2.5). Это и будет работа распространения трещины a_p , позволяющая оценить надёжность (зародыши трещин в материале есть почти всегда, вопрос в том, будут ли они расти).

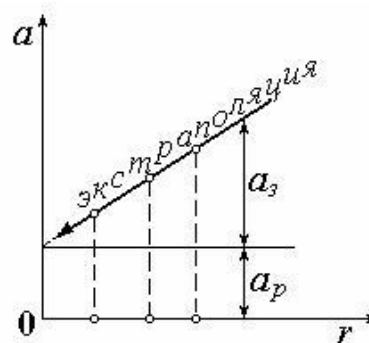


Рис. 2.5. Определение работы зарождения трещины

Некоторые эксплуатационные свойства

В условиях эксплуатации свойства материалов могут не соответствовать стандартным, приведённым в справочниках значениям. В различных агрессивных средах, при действии высоких или низких температур материалы проявляют значительно меньшую прочность и долговечность, чем при нормальных условиях.

1) Хладноломкость

При низких температурах (от 0 до -269°C , температуры жидкого гелия) увеличивается склонность металла к хрупкому разрушению. При этом резко снижается ударная вязкость (KCU , KCT) и изменяется строение излома — от волокнистого, матового до кристаллического, блестящего.

Свойство металла хрупко разрушаться, терять вязкость при понижении температуры называется **хладноломкостью**.

За характеристику хладноломкости принимают **температурный порог хладноломкости** t_{50} . Это температура, при которой величина ударной вязкости уменьшается вдвое (рис. 2.6). При этом излом имеет строение наполовину вязкое, наполовину хрупкое.

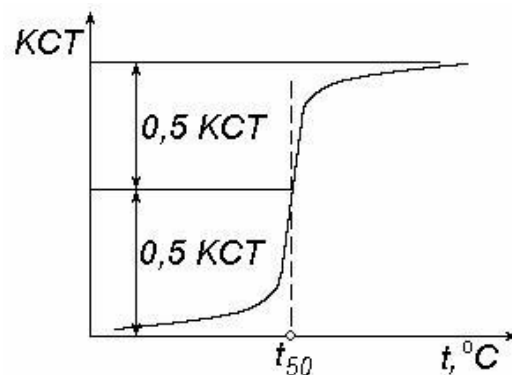


Рис. 2.6. Определение порога хладноломкости

хладноломкости

2) Выносливость

Многие детали — валы, оси, шестерни — испытывают переменные по величине и направлению нагрузки. Под действием многократно повторяющихся знакопеременных нагрузок в металле накапливаются повреждения, дефекты. Это явление называется **усталостью**.

В таких условиях работы напряжения, меньшие σ и даже τ , могут вызвать зарождение и рост **усталостной трещины**. Обычно она возникает на поверхности детали и затем подрастает с каждым циклом нагружения. Это постепенно приведёт к разрушению.

Выносливость – это способность металла противостоять усталости, сопротивляться разрушению при знакопеременных нагрузках.

Характеристики выносливости определяются из испытаний на специальных машинах циклического действия. Нагрузка, действующая на каждую точку поперечного сечения образца, непрерывно меняется по величине и направлению (рис. 2.7).

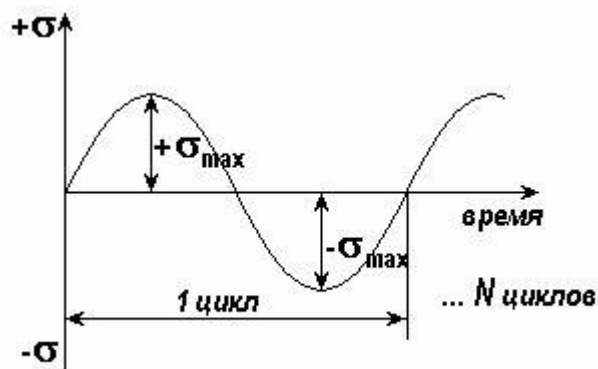


Рис. 2.7. Схема циклического нагружения при усталостных испытаниях

Пределом выносливости, или **пределом усталости** σ_{-1} называется наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения образца после заданного числа циклов нагружения.

При испытании сталей стандартное число циклов нагружения $N = 10^7$, при испытании цветных метал-

лов и сплавов $N = 10^8$.

Задание для практической работы

- 1. При каком напряжении деформация металла идёт без увеличения нагрузки?**
- 2. Дайте определение характеристике пластичности ψ .**
- 3. Какими характеристиками оценивают прочность металла?**
- 4. Что такое вязкость?**

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы.

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление о способах упрочнения металлов и количественной зависимости предела текучести от параметров структуры.
3. Выполнить индивидуальное задание.

Основные сведения по теме работы.

Значительная пластическая деформация деталей машин и конструкций при эксплуатации недопустима. Поэтому повышение прочности металлов и сплавов означает, прежде всего, повышение предела текучести σ_T .

Область II на диаграмме растяжения является областью борьбы за прочность (рис. 3.1). Здесь происходит пластическая деформация, т. е. движение дислокаций:

Чтобы затруднить перемещение дислокаций, нужно создать препятствия для их движения – или избавиться от дислокаций совсем.

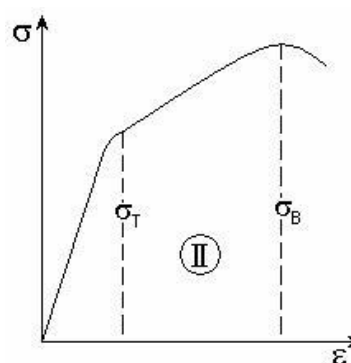


Рис. 3.1. Область пластической деформации

Упрочнение за счёт создания бездефектных кристаллов

Бездефектные кристаллы удастся вырастить в виде тонких нитей, или «усов» (их длина несколько миллиметров, толщина до 20 мкм). Их прочность действительно близка к теоретически рассчитанной.

Кристаллы крупных размеров вырастить без дефектов не удаётся.

Не совсем ясно, играет в прочности «усов» главную роль отсутствие дефектов или поверхностное натяжение. Изделия, содержащие такие кристаллы, высокой прочностью не обладают.

Можно сказать, что пока этот путь создания высокопрочных материалов не реализован.

Упрочнение за счёт торможения движущихся дислокаций

1) Упрочнение самими дислокациями

В ходе пластической деформации создается такая высокая плотность дислокаций, что они сами начинают взаимно тормозить скольжение друг друга. Возникает так называемый «лес дислокаций».

При повторном испытании уже продеформированного образца предел текучести оказывается больше: $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$ (рис. 3.2).

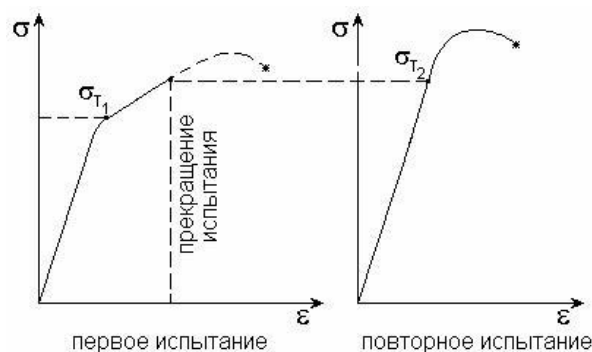


Рис. 3.2. Упрочнение металла при повторном испытании на растяжение

Увеличение предела текучести связано с плотностью дислокаций зависимостью

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; α – коэффициент, зависящий от природы металла; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями), ρ – плотность дислокаций.

Примерами использования такого механизма упрочнения являются дробеструйный наклёп пружин, рессор и штампов, патентирование проволоки, чистовая обработка поверхностным пластическим деформированием (обкатка роликми, дорнование отверстий).

2) Упрочнение границами зёрен

В мелкозернистом металле площадь поверхности зёрен в единице объёма больше, чем в крупнозернистом (рис. 3.3). Мелкозернистый металл прочнее, так как на пути скольжения дислокаций встречается больше барьеров –

границ зёрен: $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$.

Зависимость предела текучести от размера зерна описывается отношением Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; k – постоянная для данного металла, d – диаметр зерна.

Примеры: модифицирование сплавов при выплавке и литье, рекристаллизация сильно наклёпанного металла, измельчение зерна при фазовых превращениях.

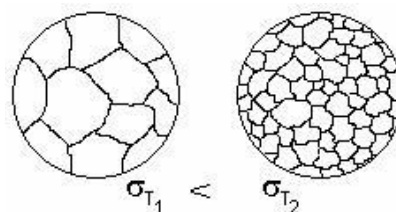


Рис. 3.3. Упрочнение границами зерен

3) Упрочнение растворёнными атомами примесей

Искажения решётки, вызванные атомами примесей, мешают дислокациям свободно скользить (рис. 3.4).

В первом приближении упрочнение при образовании твёрдого раствора можно определить по формуле Мотта-Набарро в зависимости от количества примеси:

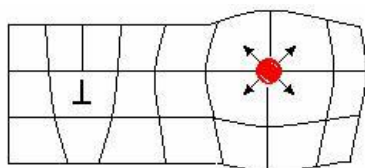


Рис. 3.4. Упрочнение твёрдым раствором

$$\sigma_T = G \cdot \varepsilon^2 \cdot C,$$

где G – модуль сдвига, ε – параметр, зависящий от различия размеров атомов растворённого компонента r и растворителя r_0 , C – атомная концентрация растворённого компонента. Можно принять параметр $\varepsilon = (r - r_0)/r_0$.

Примерами применения такого механизма упрочнения являются практически все сплавы в современной технике. Все они являются твёрдыми растворами. При закалке сплавов создают пересыщенные твёрдые растворы, добиваясь значительного упрочнения.

4) Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Дисперсные, т. е. очень мелкие, частицы имеют размеры порядка 100 нм. Более крупные частицы не являются таким эффективным препятствием для дислокаций.

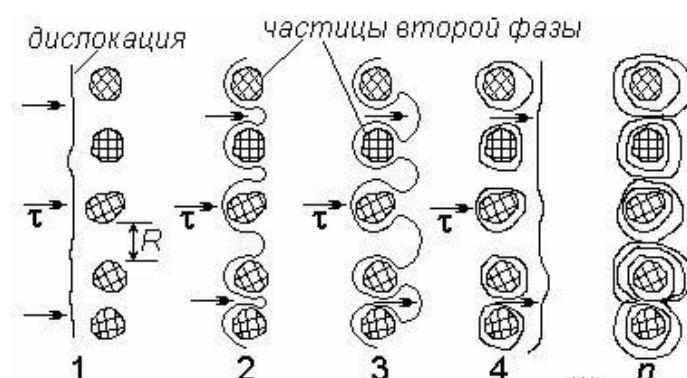


Рис. 3.5. Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Огибая мелкие частицы (рис. 3.5, 2), дислокации замыкаются вокруг них (3), при этом возникают дислокационные петли (4), или кольца. Прохождение множества дислокаций приводит к образованию так называемых колец Орована (n). Дальнейшее скольжение дислокаций на этом участке затруднено.

Если частицы второй фазы не округлые, а игольчатые, то дислокации «наматываются» на них, как нитки на веретено.

Упрочнение дисперсными частицами зависит от расстояния между ними L :

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b)/L,$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

По такому механизму упрочняются очень многие сплавы: дуралюмины, бронзы, сплавы титана, некоторые стали.

В большинстве современных высокопрочных материалов используются несколько способов упрочнения одновременно: твёрдый раствор и мелкие частицы химического соединения, твёрдый раствор с высокой плотностью дислокаций и т. п.

Задания для практической работы

1) Объясните следующие явления на основе представлений о дислокациях:

- а) холодная механическая обработка повышает твёрдость алюминия;
- б) сплав, состоящий из 20 % цинка и 80 % меди, твёрже чистой меди;
- в) твёрдость никеля возрастает при введении в него частиц окиси тория.

2) Необходимо получить сплав:

- а) с большим сопротивлением деформации, твёрдостью, прочностью, имеющий высокую долговечность и работоспособность при работе в условиях износа и значительных механических нагрузок;
- б) с высокой пластичностью, низкими значениями твёрдости и сопротивления деформации, имеющий хорошую обрабатываемость резанием и давлением.

Опишите структуру сплава, которая обеспечит требуемые свойства в обоих случаях.

3) Определить предел текучести и величину упрочнения металла после холодной пластической деформации, в результате которой плотность дислокаций увеличилась до 10^{10} см^{-2} .

Металл	σ_0 , МПа	b , нм	α	G , ГПа
алюминий	40	0,404	0,3	27
железо	130	0,286	0,2	77

Связь между пределом текучести и плотностью дислокаций описывается уравнением

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; α – коэффициент, зависящий от природы металла; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

4) Сплав железа с 0,8 % углерода имеет структуру твёрдого раствора с дисперсными частицами карбида железа Fe_3C , очень твёрдыми и прочными. Определить предел текучести сплава, если расстояние между частицами Fe_3C составляет: а) 20 нм, б) 40 нм, в) 60 нм, г) 80 нм, д) 100 нм.

Считать, что дислокации проходят между частицами. Предел текучести зависит от расстояния между частицами следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b)/L,$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

Металл	σ_0 , МПа	b , нм	G , ГПа
железо	130	0,286	77

Построить график зависимости $\sigma_T = f(L)$ и проанализировать его.

5) Определить предел текучести железа с величиной зерна 100, 50, 30, 10 и 5 мкм, используя отношение Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2},$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения (130 МПа для железа);

k – постоянная для данного металла (129 МПа·мм^{1/2} для железа).

Построить график зависимости $\sigma_T = f(d)$ и проанализировать его.

6) Сплав алюминия с 4 % меди имеет структуру твёрдого раствора с дисперсными частицами интерметаллического соединения CuAl_2 , имеющими повышенную прочность. Определить предел текучести сплава, если расстояние между частицами CuAl_2 составляет: а) 24 нм, б) 40 нм, в) 60 нм, г) 80 нм, д) 100 нм.

Считать, что дислокации проходят между частицами. Предел текучести зависит от расстояния между частицами следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b)/L,$$

где σ_0 – напряжение сдвига до упрочнения; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

Металл	σ_0 , МПа	b , нм	G , ГПа
алюминий	40	0,404	27

Построить график зависимости $\sigma_T = f(L)$ и проанализировать его.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ

Цель работы.

1. Изучить основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов.
2. Научиться анализировать диаграммы состояния: определять температуры начала и окончания плавления сплавов, находить области равновесного существования твёрдых растворов, обосновывать возможность проведения упрочняющей термической обработки сплавов, оценивать их технологические свойства.
3. Выполнить индивидуальное задание.

Основные сведения по теме работы.

Для практической работы с двойными сплавами необходимо знать их структуру, возможность её изменения с изменением температуры и состава сплава и, таким образом, судить о свойствах сплавов и о возможностях изменения свойств в нужном направлении. Необходимость изменить структуру и свойства сплавов может возникнуть, если при получении детали методом литья произошла внутрикристаллическая ликвация, если нужно упрочнить сплав термической обработкой, и в некоторых других случаях. Для определения возможности проведения термической обработки и назначения её температурного режима нужно знать закономерности изменения фазового состава в зависимости от температуры и химического состава сплава в данной системе. Графическая зависимость, содержащая эту информацию, называется *диаграммой состояния*. Диаграммы состояния позволяют получать разностороннюю информацию о сплавах. С их помощью можно судить о литейных свойствах сплавов и, соответственно, о возможности получения из них отливок, о склонности сплавов к внутрикристаллической ликвации и ликвации по удельному весу при кристаллизации, о пластичности различных сплавов и возможности их пластического деформирования при изготовлении изделий.

Чаще всего для построения диаграмм состояния металлических систем используют термический анализ, основанный на том, что плавление, кристаллизация и все структурные изменения сплавов в твёрдом состоянии происходят с тепловыми эффектами (с поглощением или выделением тепла). Следовательно, снимая кривые нагрева или охлаждения сплавов разного состава какой-либо системы, можно зафиксировать температуры, при которых происходят те или иные изменения в структуре. Если затем эту информацию представить графически в координатах «температура - состав сплава», то получится диаграмма состояния системы. На диаграмме состояния будут, по крайней мере, две линии: начала кристаллизации (*ликвидус*) и окончания

кристаллизации (*солидус*). У многих сплавов, кроме того, происходят различные превращения в твёрдом состоянии, что тоже отражается линиями на диаграмме.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов в сплаве, соответствия или различия в их атомно-кристаллическом строении возможно образование различных фаз: твёрдых растворов, механической смеси кристаллов отдельных компонентов, химических соединений и др. Это взаимодействие описывается различными видами диаграмм состояния с разными возможностями изменения структуры и проведения термической обработки сплавов.

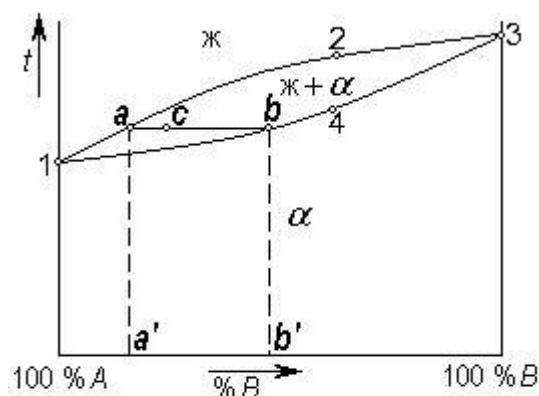
Определение состава и количества фаз

В процессе кристаллизации изменяются и концентрация фаз, и количество каждой фазы. В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого служат правило отрезков и правило концентраций.

Правило концентраций

Для определения *состава фаз*, находящихся в равновесии при любой температуре, лежащей в двухфазной области (например, в точке *c*, рис 4.1), нужно провести через эту точку прямую, параллельную оси концентраций (линия *acb*). Точки *a* и *b* пересечения этой прямой с линиями диаграммы, ограничивающими данную область, определяют присутствующие в сплаве фазы (в нашем случае – жидкость и кристаллы твёрдого раствора α).

Проекция точки *a* пересечения этой линии с ликвидусом на ось концентраций (точка *a'*) указывает состав жидкой фазы, а проекция точки *b* пересечения с солидусом (*b'*) – состав твёрдой фазы. Линия *ab*, соединяющая составы фаз, находящихся в равновесии, называется *конодой*.



Правило отрезков

Количество твёрдой фазы в точке $c_{\text{фаз}}$ определяется отношением длины отрезка *ас*, примыкающего к ликвидусу, к длине всей коноды *ab* (рис. 4.1). *Количество жидкости* – отношением длины отрезка *bc*, примыкающего к солидусу, к длине всей коноды: $\frac{bc}{ab}$

$$Q = \frac{ac}{bc} \times 100 \%;$$

$$Q_{жс} = \frac{ac}{bc} \times 100 \%.$$

Это понятно, если проследить изменение этих отрезков при охлаждении: отрезок *ac* будет расти, а отрезок *bc* – наоборот, уменьшаться. Количество твёрдой фазы при охлаждении растёт, а количество жидкости уменьшается до полного её исчезновения.

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной взаимной растворимостью компонентов

Если компоненты сплава образуют неограниченные твёрдые растворы, то на диаграмме состояния имеются только две линии: линия начала кристаллизации и линия окончания кристаллизации (рис. 4.2). Каждая из них является совокупностью критических точек для всех сплавов данной системы.

Линию начала кристаллизации 1-2-3 называют линией *ликвидус* (от латинского слова *liqua* – жидкость). Выше этой линии все сплавы системы находятся в жидком состоянии.

Линию окончания кристаллизации 1-4-3 называют линией *солидус* (от латинского слова *solid* – твёрдое тело). Ниже этой линии все сплавы системы находятся в твёрдом состоянии.

В твёрдом состоянии сплавы с такой диаграммой не имеют фазовых превращений и поэтому не могут подвергаться упрочняющей термообработке.

Механические и физические свойства сплавов, имеющих такую диаграмму состояния, сильно отличаются от свойств исходных компонентов. В частности твёрдость, прочность, электросопротивление сплавов выше, чем у чистых металлов, а пластичность и магнитная проницаемость – ниже.

По законам физической химии, первые образующиеся из жидкости кристаллики богаче тугоплавким компонентом B , чем те, что кристаллизуются последними. Так как первые кристаллы зарождаются у стенок литейной формы, а последние – в сердцевине отливки, то по сечению отливка может оказаться химически неоднородной. Поверхностные слои будут богаче тугоплавким компонентом B , а сердцевина – легкоплавким компонентом A . Такое явление называется *ликвацией*.

Ликвация может проявляться и в объёме одного кристалла: в центре он окажется обогащён тугоплавким компонентом, а у границ – легкоплавким. Это – *микроликвация* (внутрикристаллическая или дендритная ликвация).

Ликвация – явление нежелательное. Микроликвация проявляется при большой скорости охлаждения, а при медленном охлаждении успевает пройти диффузия, выравнивающая состав сплава в объёме зерна. Если микроликвация все же возникла, то для её устранения применяют диффузионный отжиг: нагрев отливки до температур, близких к солидусу, в течение длительного времени. Но ликвация, возникшая во всём объёме отливки (*зональная*) отжигом не устраняется.

Примеры сплавов с полной взаимной растворимостью компонентов: $\text{Cu} - \text{Ni}$, $\text{Ag} - \text{Au}$, $\text{Mo} - \text{W}$, $\text{Mo} - \text{V}$.

Диаграмма состояния сплавов с полным отсутствием растворимости компонентов

Если компоненты сплава не растворяются друг в друге, то из жидкого расплава образуются или кристаллы чистого компонента A (в левой части диаграммы состояния), или кристаллы чистого компонента B (в правой части диаграммы). Тогда ликвидус диаграммы состоит из двух частей: линия 1-2, на которой начинается кристаллизация компонента A , и линия 2-3, на которой

начинается кристаллизация компонента B (рис. 4.3).

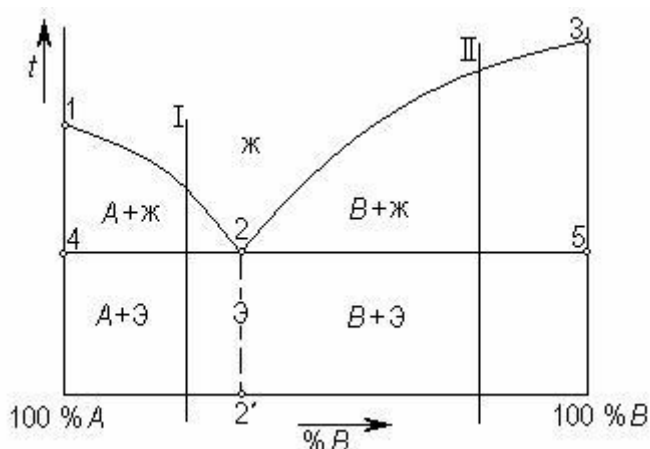


Рис. 4.3. Диаграмма состояния с полным отсутствием растворимости

В левой области 1-2-4-1

из расплава кристаллизуется компонент A , следовательно, в жидкости содержание компонента A убывает, а содержание компонента B , наоборот, растёт. В правой области 2-3-5-2 идёт кристаллизация компонента B ; при этом содержание компонента B в расплаве убывает, а содержание компонента A , наоборот, растёт. К моменту достижения температуры солидуса (линии 4-2-5) в любом сплаве концентрация компонентов в жидкости соответствует точке 2.

Точка 2 принадлежит обеим ветвям ликвидуса и обеим областям кристаллизации. Кроме того, она находится одновременно на ликвидусе и на солидусе. Это означает, что сплав состава 2' начинает и заканчивает кристаллизацию при одной и той же температуре. В этом сплаве при кристаллизации образуются одновременно кристаллы и компонента A , и компонента B . Они должны быть очень мелкими, так как температура точки 2 значительно ниже температур кристаллизации обоих компонентов и степень переохлаждения очень велика. Такая смесь очень мелких кристаллов двух компонентов, кристаллизующаяся при постоянной и самой низкой для данной системы температуре, называется **эвтектикой** (от греческого слова «легкоплавкая»).

Сплав состава 2' называют **эвтектическим**; сплавы в левой области диаграммы, до точки 2', называют **дозэвтектическими**, а в правой области – **заэвтектическими**.

Из диаграммы видно, что кристаллизация всех сплавов данной системы заканчивается образованием эвтектики. Эвтектика представляет собой мелкозернистую структурную составляющую сплава со своими механическими свойствами. Ее принято обозначать русской буквой «Э». Состав эвтектики кратко можно записать: $\text{Э} = A + B$. Важно помнить, что эвтектика – это смесь двух фаз, а не одна фаза.

Структура сплавов состоит из эвтектики и кристаллов чистых компонентов, которые образовались из расплава в начале кристаллизации. В доэвтектических сплавах (сплав I на рис. 3) это кристаллы компонента A и эвтектика (рис. 4.4, а), в заэвтектических (сплав II на рис. 3) – кристаллы компонента B и

эвтектика (рис. 4.4, б).

Сплавы с такой диаграммой тоже не имеют фазовых превращений в твёрдом состоянии, они всегда двухфазные, и поэтому не могут подвергаться упрочняющей термообработке.

Сплавы для получения отливок должны иметь со-

став, близкий к эвтектическому, так как именно эвтектика, кристаллизующаяся при постоянной температуре, обладает наилучшими литейными свойствами: малой усадкой и высокой жидкотекучестью. Из эв-

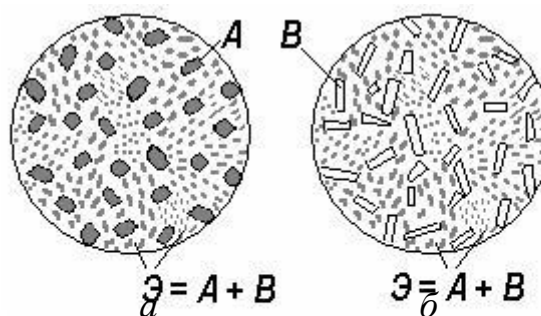


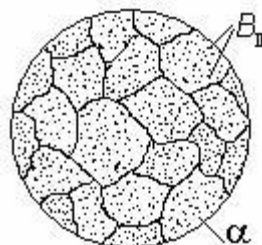
Рис. 4.4. Микроструктура сплавов:
а – доэвтектического; б – заэвтектического

тектических сплавов делают припои, плавкие вставки, предохранители, их используют в подшипниках скольжения как антифрикционный слой.

Примеры сплавов с полной взаимной нерастворимостью компонентов: Pb – Sb, Pb – Pd, Ca – Mg.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов

Если компоненты сплава образуют твёрдые растворы с ограниченной концентрацией, то диаграмма состояния представляет собой сочетание двух предыдущих вариантов (рис. 4.5).



Возьмем пример, когда компонент *B* ограниченно растворяется в компоненте *A*, но компонент *A* в решетку *B* не встраивается. Ликвидус диаграммы (линия 1-2-3), как и в предыдущем случае, имеет две ветви. Под кривой 2-3 идет кристаллизация компонента *B*, но под кривой 1-2 образуются кристаллы не чистого компонента *A*, а твёрдого раствора компонента *B* в решётке компонента *A*. Обозначим его буквой α . Пусть предельная растворимость компонента *B* в решетке *A* составляет величину, равную отрезку *A-4'*, где 4' – проекция точки 4 на ось концентраций. В таком случае солидус диаграммы на участке 1-4 представляет собой кривую, как и на диаграмме с неограниченной растворимостью. А за пределом растворимости, правее точки 4, солидус является прямой, параллельной оси концентраций, как на диаграмме с полной нерастворимостью компонентов. На этом участке, 4-2-5, идет кристаллизация эвтектики, которая состоит из мельчайших кристалликов твёрдого раствора и компонента *B*: $\alpha + B$.

Ниже солидуса 1-4-2-5 все сплавы данной системы находятся в твёрдом состоянии, но фазовые превращения на этом не заканчиваются. Вспомним, что все твёрдые тела при охлаждении сжимаются, то есть межатомные расстояния в кристаллической решётке уменьшаются. Это значит, что «чужие» атомы компонента *B* начнут вызывать все большие напряжения в решётке растворителя. При бесконечно медленном, равновесном охлаждении эти атомы «выталкиваются» из кристаллов твёрдого раствора, поскольку система стремится к минимуму свободной энергии, а напряжения от «лишних» атомов этот запас свободной энергии повышают. Атомы компонента *B*, уходя из твёрдого раствора, образуют собственные кристаллики, очень маленькие по сравнению с первичными (выросшими из расплава) кристаллами твёрдого раствора (рис. 4.6).

Итак, растворимость при охлаждении снижается; каждой температуре соответствует своя равновесная концентрация растворенного компонента *B*. Вот откуда на диаграмме появляется линия 4-6 – линия фазового превращения в твердом состоянии. Ее называют *линией предельной растворимости* компонента *B* в кристаллической решётке компонента *A*. Выше этой линии сплав является однофазным твёрдым раствором, а ниже – двухфазным: $\alpha + B_{II}$.

Нижний индекс «II» означает в данном случае то, что эти кристаллы компонента B являются вторичными, т. е. появились при распаде твёрдого раствора, а не из расплава.

Если бы компонент A тоже ограниченно растворялся в компоненте B , то на диаграмме справа тоже появилась бы линия предельной растворимости.

Важная особенность сплавов с концентрацией второго компонента от точки 6 до точки 4': их можно подвергать *упрочняющей термической обработке*, так как у них есть фазовое превращение в твёрдом состоянии. Если ускорить охлаждение сплава, то выделение атомов B из твёрдого раствора может и не успеть произойти. Поэтому сплавы с переменной растворимостью второго компонента подвергают *закалке* (это нагрев выше линии предельной растворимости и быстрое охлаждение, чтобы не дать атомам B выделиться из твёрдого раствора) и *старению* (это нагрев полученного пересыщенного твёрдого раствора до температур ниже критических, чтобы образовались мельчайшие кристаллики второй фазы). После такой термообработки сплавы становятся значительно прочнее: происходит упрочнение дисперсными частицами второй фазы.

Сплавов с ограниченной взаимной растворимостью компонентов, имеющих диаграмму такого типа, гораздо больше, чем сплавов с диаграммами первых двух видов. Примеры сплавов с ограниченной взаимной растворимостью: Al–Cu, Al–Si, Ag–Cu, Pb–Sn, Fe–C.

Диаграмма состояния сплавов, в которых образуется химическое соединение компонентов

Если компоненты сплава A и B взаимодействуют между собой с образованием химического соединения A_mB_n , то диаграмма состояния рассматривается как две отдельные диаграммы, для каждой из которых химическое соединение является одним из компонентов.

Ведь химическое соединение – это новое сложное вещество со своей собственной кристаллической решёткой, температурой плавления и свойствами. При кристаллизации сплава химическое соединение образует свои кристаллы, которые могут смешиваться с кристаллами исходных компонентов или растворять в своей решетке какую-то их долю.

Диаграммы состояния таких сплавов выглядят более сложными, чем рассмотренные ранее, но если мысленно разделить («разрезать») диаграмму по линии, соответствующей составу химического соединения, то левая и правая части окажутся уже известными простыми диаграммами.

На рис. 4.7 левая часть диаграммы (до химического соединения A_mB_n) представляет собой уже известную диаграмму с ограниченной растворимостью компонентов, а правая – диаграмму с полным отсутствием растворимости. Эвтектика $\mathcal{E}_1$ состоит из кристаллов твёрдого раствора и химического соединения A_mB_n . Твёрдый раствор – это раствор компонента B в решётке A (или химического соединения A_mB_n в решётке компонента A). Под кривой предельной растворимости из твёрдого раствора выделяются кристаллы химического соединения. В правой части диаграммы эвтектика $\mathcal{E}_2$ строится из кристаллов компонента и химического соединения A_mB_n .

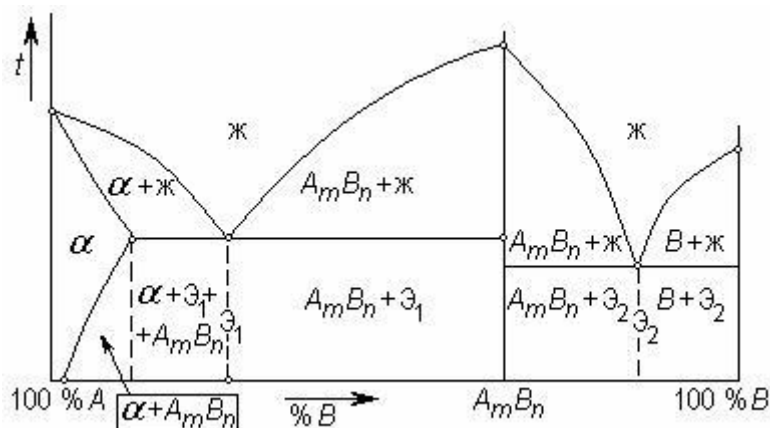
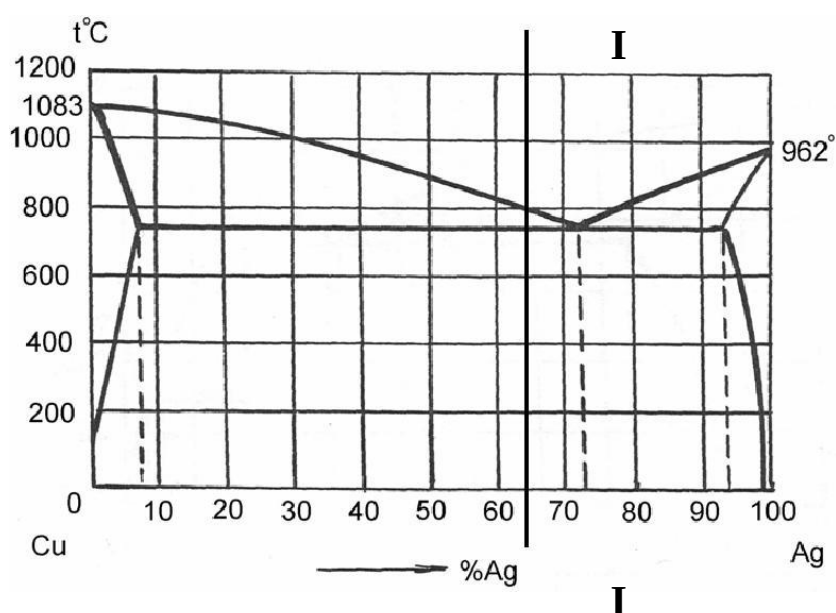


Рис. 4.7. Диаграмма состояния с химическим соединением.

Таким образом, при анализе диаграмм состояния могут быть получены сведения о структуре и свойствах сплавов. Так, при сплавлении компонентов в зависимости от их природы в сплавах могут образовываться различные кристаллические (твёрдые) фазы – например, твёрдые растворы и (или) химические соединения. Причем сплавы одних и тех же компонентов, но различного химического состава (с разным процентным содержанием компонентов) могут быть однофазными или двухфазными. В сплавах, состоящих из одних и тех же двух фаз, их кристаллы могут комбинироваться в различные структурные составляющие, отличающиеся размерами, формой и взаимным расположением зёрен. И все эти структурные факторы влияют на свойства сплавов.

Задания для практической работы.

1. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ МЕДЬ – СЕРЕБРО



Зарисовать, соблюдая масштаб, диаграмму состояния и выполнить следующие задания:

1. Установить *тип диаграммы* состояния.
2. Каков физический смысл температур 1083 и 962 °С?
3. Укажите линии *ликвидус* и *солидус* и объясните их физический смысл.
4. Заполнить все области на диаграмме состояния *буквенными обозначениями*. Дать определения сплавам, соответствующим этим обозначениям.
5. Указать химический состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав?
6. Определить химический состав сплава по заданной на диаграмме линии *I-I* и охарактеризовать его структуру при комнатной температуре.
7. Определить, используя *правило рычага (отрезков)*, для сплава, содержащего 30 % Ag, концентрацию Ag в жидкой фазе при 900 °С и отношение масс жидкой и твёрдой фаз.
8. Дать заключение о возможностях использования диаграмм состояния для практической работы со сплавами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Цель работы

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление об углеродистых сталях, как самом распространённом конструкционном материале. Изучить взаимосвязь между составом, структурой и механическими свойствами углеродистых сталей. Усвоить маркировку сталей.
3. Научиться выбирать сталь с необходимыми свойствами для конкретного назначения.
4. Выполнить индивидуальное задание.

Основные сведения по теме работы

Сталь – важнейший материал современной техники. Уникальное сочетание прочности, твёрдости и пластичности обусловлено особенностями строения этого сплава: наличием в структуре отожжённой стали перлита, в котором пластинки мягкого, вязкого феррита чередуются с твёрдыми и прочными пластинками цементита. Возможность значительного упрочнения в результате закалки и легирования, технологичность и недефицитность исходного сырья делают сталь незаменимой для изготовления многих деталей и конструкций. Объём выплавки стали в мире непрерывно растёт; количество марок стали превышает 2000.

Примерно 80 % от всего объема выплавляемой стали составляют углеродистые стали, содержащие только железо, углерод и небольшую долю компонентов, неизбежно попадающих в сталь при выплавке: кремний, марганец, серу и фосфор.

Влияние углерода на свойства

Углерод – не случайная примесь, а важнейший компонент углеродистой стали, создающий её свойства.

Машиностроительные заводы получают сталь с металлургических предприятий в отожжённом или горячекатаном состоянии. Структура конструкционных сталей (доэвтектоидных) состоит из феррита и перлита, инструментальных – из перлита и цементита.

С увеличением содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита – очень твёрдой и хрупкой фазы. Твёрдость цементита превышает твёрдость феррита примерно в 10 раз (800 *HВ* и 80 *HВ* соответственно). Поэтому прочность и твёрдость стали растут с повышением содержания углерода, а пластичность и вязкость, наоборот, снижаются (рис. 5.1).

При повышении содержания углерода до 0,8 % увеличивается доля перлита в структуре (от 0 до 100 %), поэтому растут и твёрдость, и прочность. Но при дальнейшем росте содержания углерода появляется вторичный цементит по границам перлитных зерен. Твёрдость при этом почти не увеличивается, а прочность снижается из-за повышенной хрупкости цементитной сетки.

Кроме того, увеличение содержания углерода приводит к повышению порога хладноломкости: каждая десятая доля процента повышает t_{50} примерно на 20°. Это

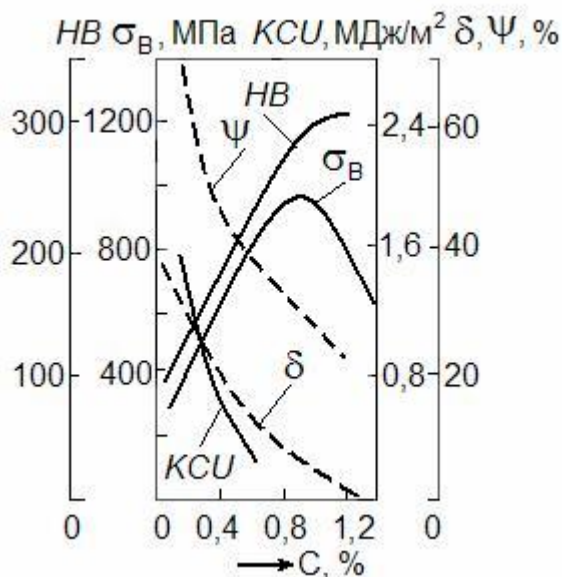


Рис. 5.1. Влияние углерода

на механические свойства стали

значит, что уже сталь с 0,4 % C переходит в хрупкое состояние примерно при 0 °C, т. е. менее надежна в эксплуатации.

Влияет содержание углерода и на все технологические свойства стали: чем больше в стали углерода, тем она труднее обрабатывается резанием, хуже деформируется (особенно в холодном состоянии) и хуже сваривается.

Влияние постоянных примесей на свойства стали

Полезные примеси, марганец и кремний, попадают в сталь из исходного материала – чугуна, а также при раскислении.

Марганец, содержащийся в углеродистой стали в количестве 0,3-0,8 %, повышает предел прочности, немного снижает вязкость. Он связывает серу в сульфид MnS , в этом его главная польза.

Содержание **кремния** в углеродистой стали не должно превышать 0,4 %. Растворяясь в феррите, кремний значительно повышает предел текучести. При этом ухудшается штампуемость стали: листовая сталь может давать надрывы при глубокой вытяжке. Сталь, предназначенную для получения деталей холодной листовой штамповкой, кремнием (ферросилицием) не раскисляют.

Сера – вредная примесь. Она вызывает *красноломкость* стали: хрупкость при горячей обработке давлением. В сталь попадает, в основном, из доменного топлива – кокса. Сера с железом образует сульфид FeS , а FeS с железом, в свою очередь, образует легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988 °C. Под

ковку и прокатку стальные слитки нагревают до 1200 °С. Поэтому при повышенном содержании серы в металле границы зёрен могут оплавиться, и заготовка разрушится.

Марганец активнее железа взаимодействует с серой и связывает её в сульфид MnS , который эвтектики не образует. Но сульфиды, как любые неметаллические включения, являются концентраторами напряжений, снижают пластичность и вязкость. Поэтому содержание серы в стали должно быть ограничено.

Фосфор, напротив, вызывает хладноломкость стали, сдвигая порог хладноломкости в область более высоких температур. Каждая сотая доля процента фосфора повышает t_{50} примерно на 25?! Это значит, что фосфор еще опаснее, чем сера. Его содержание еще более ограничено. Для снижения содержания фосфора в стали нужно повышать качество шихты, применять флюсы, удаляющие фосфор.

При выплавке в сталь попадают *газы* (азот, кислород, водород). Это тоже вредные примеси. Они снижают пластичность, увеличивают склонность к хрупкому разрушению. Оксиды являются местами зарождения трещин. Азот делает сталь непригодной для холодной штамповки. Водород вызывает охрупчивание закалённой стали. Он восстанавливает металлы из оксидов с образованием воды, а вода испаряется при нагреве и вызывает внутренние надрывы в металле – флокены. Содержание газов в стали ограничивается тысячными долями процента.

Классификация углеродистых сталей

Стали можно подразделять на группы по различным классификационным признакам.

1. По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные. В свою очередь, углеродистые стали можно подразделить на низкоуглеродистые (до 0,3 % С), среднеуглеродистые (от 0,3 до 0,6 % С) и высокоуглеродистые (свыше 0,6 % С).

2. По структуре стали классифицируют на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные, о чем уже говорилось при рассмотрении диаграммы железо – углерод.

3. По степени раскисления стали подразделяются на спокойные, полуспокойные и кипящие.

Раскислением называют последний этап выплавки стали, когда в расплав добавляют элементы, более активные, чем железо, чтобы восстановить его из оксида FeO . Марганец и кремний вводятся в жидкую сталь в виде ферросплавов – ферро-марганца и ферросилиция, алюминий – в виде металла технической чистоты. Недостаточно раскисленная сталь в изложнице «кипит»: из нее выделяются пузырьки CO , так как идет процесс восстановления железа углеродом, поэтому её называют кипящей.

Спокойная сталь – это хорошо раскисленная сталь. При выплавке спокойной стали в конце процесса последовательно осуществляется её раскисление марганцем, кремнием и алюминием.

Полуспокойная сталь раскисляется только марганцем и алюминием. Поэтому из неё в меньшей степени удалён кислород.

Кипящая сталь – это плохо раскисленная сталь. Раскисление в этом случае осуществляется только марганцем. В стали к моменту разливки остается кислород, образующий с углеродом газообразный оксид СО. Пузырьки СО поднимаются в жидкой стали к поверхности, создавая видимость «кипения» расплава в изложнице. Они сохраняются в слитке стали при кристаллизации, ухудшая механические свойства.

4.Классификация сталей *по качеству* лежит в основе маркировки углеродистых сталей. *Качество стали* – это металлургическое понятие. Оно определяется содержанием вредных примесей: серы, фосфора и газов. Чем этих примесей меньше, тем качество стали выше. Дальнейшая обработка, механическая или термическая, не способна изменить качество стали, сложившееся в процессе выплавки.

Выделяют четыре группы сталей по качеству (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Классификация сталей по качеству

Группа	Стали обыкновенного качества	Качественные стали	Высококачественные стали	Особо высококачественные стали
Номер ГОСТа	ГОСТ 380-94	ГОСТ 1050-88		
Содержание вредных примесей	$\leq 0,05 \% S$; $\leq 0,04 \% P$	$\leq 0,04 \% S$ $\leq 0,035 \% P$	$\leq 0,025 \% S$ и P	$\leq 0,015 \% S$ и P

Маркировка углеродистых сталей

Стали обыкновенного качества изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6 и Ст3Г, Ст5Г с повышенным содержанием марганца. Буквы Ст обозначают «сталь», цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава. С увеличением номера марки увеличивается содержание углерода и марганца в стали (табл. 5.2). Например, в стали марки Ст1 содержится 0,06-0,12 % С и 0,25-0,5 % Мп; в стали марки Ст6 – 0,38-0,49 % и 0,5-0,8 % Мп. Стали Ст3Г и Ст5Г содержат около 1 % Мп. Чем больше номер марки, тем выше прочностные свойства и ниже пластичность стали (табл. 5.3). Например, сталь

марки Ст1 имеет $\sigma_B = 320-400$ МПа и $\delta > 33$ %, а сталь марки Ст6 – $\sigma_B = 600-720$ МПа и $\delta = 11-16$ %.

Таблица 5.2

*Массовая доля элементов (%) в углеродистых сталях
обыкновенного качества*

Сталь	С	Mn	Si в стали			S	P
			кп	пс	сп		
Ст0	$\leq 0,23$	–	–	–	–	0,06	0,07
Ст1	0,06–0,12	0,25–0,5	0,05	0,05–0,17	0,12–0,3	0,05	0,04
Ст2	0,09–0,15	0,25–0,5	0,05	0,05–0,17	0,12–0,3	0,05	0,04
Ст3	0,14–0,22	0,3–0,65	0,07	0,05–0,17	0,12–0,3	0,05	0,04
Ст4	0,18–0,27	0,4–0,7	0,07	0,05–0,17	0,12–0,3	0,05	0,04
Ст5	0,28–0,37	0,5–0,8	–	0,05–0,17	0,15–0,35	0,05	0,04
Ст6	0,38–0,49	0,5–0,8	–	0,05–0,17	0,15–0,35	0,05	0,04

Таблица 5.3

Механические свойства углеродистых сталей обыкновенного качества

Сталь	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
		Не менее	
Ст0	≥ 310	–	20
Ст1	320–420	–	31
Ст2	340–440	200	29
Ст3	380–490	210	23
Ст4	420–540	240	21
Ст5	500–640	260	17
Ст6	600	300	12

Примечание. Механические свойства приведены для спокойных и полуспокойных сталей. В сталях Ст1кп – Ст4кп значения σ_B на 10-20 МПа и σ_T на 10 МПа меньше, а значения δ на 1 % больше, чем в спокойных и полуспокойных сталях того же номера.

В конце марки ставятся буквы «кп», «пс» или «сп», показывающие степень раскисления стали при выплавке. Они означают соответственно «кипящая», «полуспокойная» и «спокойная». Например, Ст3кп, Ст4пс, Ст5Гсп.

Содержание кремния в стали определяется степенью раскисления. Кипящая сталь почти не содержит кремния (не более 0,05 %). В полуспокойной стали доля кремния составляет 0,05-0,15 %, в спокойной – 0,15-0,3 %.

Степень раскисления сказывается на свойствах стали и её стоимости. Кипящие стали самые дешевые, но у спокойных более высокие механические свойства, меньшая склонность к хладноломкости. Зато кипящие стали можно использовать для получения деталей листовой штамповкой с глубокой вытяжкой. У спокойных сталей с повышенным содержанием кремния сопротивление деформированию возрастает, сталь сильно упрочняется, и возможно появление надрывов при штамповке.

Стали обыкновенного качества поставляются в горячекатаном состоянии. Их структура и свойства заданы при получении изделий на металлургическом заводе. Поэтому при изготовлении деталей на предприятиях-потребителях металла без применения горячей обработки механические свойства стали будут соответствовать уровню, гарантированному Государственным Стандартом (ГОСТ 380-94) для данной марки.

Если из этих сталей получают изделия с применением горячей обработки (ковки, штамповки), то структура и, следовательно, свойства стали меняются. Для улучшения структуры и свойств после изготовления изделия горячей обработкой давлением может проводиться термическая обработка – отжиг или нормализация.

Металлургические заводы выпускают стали обыкновенного качества в виде проката самого различного профиля и размеров. Это могут быть прутки круглого, квадратного, шестигранного сечения; уголки, швеллеры, листы, трубы, балки и т. д.

Стали обыкновенного качества, особенно стали марок Ст2, Ст3, применяются для изготовления сварных конструкций (фермы, рамы). В сельскохозяйственном машиностроении из сталей Ст3, Ст4 делают валики, оси, рычаги, получаемые холодной штамповкой, цементируемые шестерни, червяки, поршневые кольца.

Среднеуглеродистые стали Ст5 и Ст6 применяют для более нагруженных изделий: рельсов, валов, железнодорожных колес.

Качественные стали. ГОСТ 1050-88 регламентирует химический состав и механические свойства качественных сталей, поставляемых в виде проката и нормализованных поковок (табл. 5.4).

Марки *конструкционных* качественных сталей обозначаются содержанием углерода в сотых долях процента:

05, 08, 10, 15, 20, ... 45, 50, ... 85.

В марках спокойных качественных сталей степень раскисления не указывается. Кипящими (почти не содержащими кремния) могут быть стали марок 05, 08, 10, 15, 20; полуспокойными (около 0,17 % Si) – стали 08, 10, 15, 20.

Примеры марок качественных сталей: 35, 70, 08кп, 10пс.

Марки *инструментальных* качественных сталей обозначаются буквой «У» и содержанием углерода в десятых долях процента:

У7, У8, У9, ... У14.

Высококачественные стали содержат пониженное количество вредных примесей, благодаря чему менее склонны к хрупкому разрушению, более надёжны при эксплуатации. Обозначение марок такое же, как и у качественных сталей, но в конце марки ставится буква «А»: 45А, У10А.

Особо высококачественные стали содержат еще меньше вредных примесей и неметаллических включений. Этого можно добиться только за счет двойного переплава. Способ переплава указывается в конце марки через дефис: «-Ш» – электрошлаковый, «-ВД» – вакуумно-дуговой, «-ШД» – электрошлаковый и вакуумно-дуговой и т. п. Именно это обозначение говорит об особо высоком качестве стали. Но углеродистые стали с таким уровнем качества не выплавляют, так как это делает сталь неоправданно дорогой. Только легированные стали для особо ответственных назначений подвергают двойному переплаву: 30ХГС-Ш, 5ХНТ-ВД, ШХ15-Ш.

Таблица 5.4

Свойства углеродистых качественных сталей (ГОСТ 1050-88)

Сталь	С, %	Свойства после нормализации*					НВ по- сле отжи- га	KCU, МДж/м ² **
		в	02		ψ	НВ		
		МПа		%				
08	0,05–0,12	320	200	33	60	131	—	—
10	0,07–0,14	340	210	31	55	143	—	—
15	0,12–0,19	380	230	27	55	149	—	—
20	0,17–0,24	420	250	25	55	163	—	—
25	0,22–0,3	460	280	23	50	170	—	0,9
30	0,27–0,35	500	300	21	50	179	—	0,8
35	0,32–0,4	540	320	20	45	207	—	0,7
40	0,37–0,45	580	340	19	45	217	187	0,6
45	0,42–0,5	610	360	16	40	229	197	0,5
50	0,47–0,55	640	380	14	40	241	207	0,4
55	0,52–0,6	660	390	13	35	255	217	—
60	0,57–0,65	690	410	12	35	255	229	—
65	0,62–0,7	710	420	10	30	255	229	—
70	0,67–0,75	730	430	9	30	269	229	—
75	0,72–0,8	1100	900	7	30	285	241	—
80	0,77–0,85	1100	950	6	30	285	241	—
85	0,82–0,9	1150	1000	6	30	302	255	—
60Г	0,57–0,65	710	420	11	35	269	229	—
65Г	0,62–0,7	750	440	9	—	285	229	—
70Г	0,67–0,75	800	460	8	—	285	229	—

* Механические свойства для сталей 75, 80, 85 гарантируются после закалки и среднего отпуска при температуре 480 °С.

** Ударная вязкость сталей 25 – 50 определяется после улучшения – закалки и высокого отпуска при температуре 600 °С.

5) *По назначению* можно выделить много различных групп. Основные группы – это строительные стали, конструкционные стали, инструментальные стали. В свою очередь, конструкционные стали делятся на цементуемые стали, улучшаемые стали, рессорно-пружинные стали и т. д.

Строительные стали содержат не более 0,22 % С. Низкое содержание углерода необходимо для хорошей свариваемости, так как большинство строительных металлических конструкций соединяют различными способами сварки.

По содержанию вредных примесей это могут быть стали как обыкновенного качества, так и качественные. Стали поставляются в виде листов и сортового фасонного проката, иногда в нормализованном состоянии.

Во многие марки строительных сталей добавляют небольшое количество не-дефицитных легирующих элементов: Mn, Si, Cr, Ni, Cu, V, Ti. Такие стали прочнее углеродистых. Имеют низкий порог хладноломкости. Их применение позволяет экономить металл в строительных конструкциях.

Никель и медь добавляют потому, что они понижают порог хладноломкости и увеличивают коррозионную стойкость.

Конструкционные стали

Данная группа сталей применяется для изготовления деталей машин (валы, втулки, шестерни, рычаги, кулачки и т. п.).

По содержанию вредных примесей это качественные стали.

Среди материалов этой группы есть низкоуглеродистые стали, например: 08кп, 10, 15 (содержащие соответственно 0,08; 0,1; 0,15 % С) и среднеуглеродистые, примерами которых могут быть марки 40, 45, 50, 60 (в которых соответственно 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 % С).

Низкоуглеродистые стали, вследствие их хорошей пластичности, широко применяются для изготовления изделий холодной пластической деформацией (например, штамповкой). В этом случае необходимо, чтобы металл выдерживал большие деформации без разрушения. Примерами подобных изделий могут быть детали кузова легковых автомобилей, корпуса или кожухи сложного профиля для различных изделий и т. п.

Стали марок 05, 08, 10 предназначены для получения деталей из листа холодной листовой штамповкой, в том числе глубокой вытяжкой.

Стали 15, 20, 25 используют для изготовления мелких деталей, работающих в нормализованном состоянии (крепеж, втулки, трубы, змеевики), а также для цементуемых деталей (кулачки, малонагруженные шестерни).

Среднеуглеродистые конструкционные стали используются для изготовления упрочняемых термической обработкой деталей. Чаще всего они подвергаются закалке и отпуску на твердость *HRC* 40–50.

Стали 30, 35, 40, 45, 50, 55 – улучшаемые стали. Они упрочняются закалкой с высоким отпуском. Детали работают в условиях усталостного износа (шатунны, оси, маховики, зубчатые колёса, коленчатые валы).

Стали марок 50, 55 и 60 могут подвергаться нормализации и поверхностной закалке ТВЧ. Так упрочняют шейки коленчатых валов, кулачки распределительных валиков, зубья шестерен, длинные валы и ходовые винты.

Стали марок 60–85 и близкие к углеродистым стали 60Г, 65Г, 70Г применяют в качестве рессорно-пружинных.

Среди конструкционных углеродистых сталей есть так называемые *автоматные стали*. Это стали, которые за счет повышенного содержания серы и фосфора имеют хорошую обрабатываемость резанием. Используются они при массовом производстве деталей на станках-автоматах, автоматических линиях, т. е. там, где требуется высокая производительность обработки при достаточно хорошей стойкости режущего инструмента.

При обозначении автоматных сталей в начале марки ставится буква «А», например: А12, А20. Цифры показывают содержание углерода (0,12 и 0,20 %).

Эти стали имеют пониженную вязкость и пластичность, более низкую коррозионную стойкость, что связано с особенностями их состава. Широкое применение они находят при изготовлении крепёжных деталей типа гаек, болтов, шпилек.

Инструментальные стали

Эта группа сталей предназначена для изготовления различных видов инструмента: режущего, мерительного, штампового. Примеры инструмента из углеродистых инструментальных сталей: напильники, зубила, метчики, ножовочные полотна, мелкие штампы для холодного деформирования металла, шаберы, мерительные линейки и т. п.

Инструмент должен иметь высокую прочность, твёрдость и износостойкость, поэтому инструментальные стали упрочняют закалкой на мартенсит с последующим низкотемпературным отпуском. Они должны содержать большое количество углерода: 0,7–1,3 % С. Термическая обработка инструмента формирует мартенситную структуру с некоторым количеством избыточных карбидов (в заэвтектидных сталях), что соответствует твёрдости 60–63 HRC.

Для инструмента, испытывающего при работе значительные динамические нагрузки, может производиться отпуск при более высокой температуре (270–350 °С). При этом изделию обеспечивается большой запас вязкости и высокая работоспособность. Твёрдость получается на уровне 48–52 HRC.

При обозначении марок углеродистых инструментальных сталей в начале ставится буква У («углеродистая»), а затем цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента, например: У8, У12. В этих сталях содержится соответственно 0,8 и 1,2 % С.

Выплавляются стали данной группы чаще всего как качественные. Но иногда инструментальные стали могут быть и высококачественными. В этом случае в конце марки ставится буква А. Например: У10А, У11А.

Следует иметь в виду, что из углеродистых инструментальных сталей изготавливают мелкий инструмент. Это связано с их низкой прокаливаемостью. Кроме того, такой инструмент должен работать с небольшим разогревом режущей кромки, не выше 200–250 °С, так как при более высоких температурах углеродистые стали быстро разупрочняются.

Для понимания деления конструкционных материалов на группы по разным признакам и определения их практического назначения может быть полезна общая классификация металлических сплавов, приведённая в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Классификация сплавов

Опорный признак	Наименование вида сплава
Число компонентов	Двойной
	Тройной и др.
Число фаз	Однофазный (фаза: твердый раствор, интерметаллид)
	Многофазный (фазы: чистый компонент, твердый раствор, химическое соединение)
Основа	Железный
	Алюминиевый
	Медный
	Никелевый и др.
Основной легирующий элемент	Хромистая сталь
	Бериллиевая бронза и др.
Назначение	Конструкционный
	Инструментальный
	Специальный
Основное эксплуатационное свойство	Антифрикционный
	Жаропрочный
	Жаростойкий
	Износостойкий

Опорный признак	Наименование вида сплава
	Химически стойкий
	С особыми физическими свойствами (тепловыми, магнитными, электрическими)
Технология изготовления изделий	Литейный
	Деформируемый
	Спечённый
Технология упрочнения	Термически упрочняемые
	Термически неупрочняемые
	Химико-термическое упрочнение
	Деформационное упрочнение
	Другие виды упрочнения

Задания для практической работы

1) Поясните, чем отличаются друг от друга стали марки Ст1 и Ст6. Какая из этих марок стали подойдёт для изготовления сварных строительных конструкций? Обоснуйте ответ.

2) Валики и кронштейны из стали обыкновенного качества получают штамповкой в холодном состоянии. Для производительной штамповки заготовок без дефектов материал должен иметь предел текучести не более 200-220 МПа и относительное удлинение не менее 20 %. Назначьте марку стали, приведите её механические характеристики, опишите структуру стали.

3) Поясните, чем отличаются друг от друга стали марки Ст3кп и Ст3сп. Подойдут ли эти марки стали для изготовления ответственных сварных строительных конструкций, работающих при низких температурах? Обоснуйте ответ.

4) Поясните, чем отличаются друг от друга стали марки Ст3 и 30. Какую из этих сталей можно упрочнять термической обработкой? Обоснуйте ответ.

5) Назначьте марку стали для изготовления коленчатого вала, который упрочняется нормализацией; шейки вала (места опоры на подшипники) подвергают закалке ТВЧ. Приведите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру.

6) Зубчатые колёса редуктора работают в условиях усталостного износа. Назначьте марку углеродистой качественной стали для этих деталей. Приведите её химический состав и механические характеристики, опишите структуру стали.

7) Какие марки качественной стали подойдут для изготовления деталей холодной листовой штамповкой? Обоснуйте ответ. Приведите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру.

8) Для каких изделий рационально применять углеродистую качественную сталь марки 65? Обоснуйте ответ. Приведите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру.

9) Для изготовления напильников нужно подобрать марку углеродистой высококачественной стали. Приведите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру. Укажите, требуется ли термическая обработка для этих изделий, и какая именно.

10) Для изготовления пружин нужно подобрать марку углеродистой высококачественной стали. Приведите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру. Укажите, требуется ли термическая обработка для этих изделий, и какая именно.

- 11) Из каких сталей изготавливают горячекатаные профили: балки, уголки и т. п.? Приведите пример марки, укажите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру.
- 12) Из каких сталей изготавливают рельсы? Приведите пример марки, укажите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру.
- 13) Поясните, чем отличаются друг от друга стали 70 и У7. Для каких изделий применяют эти стали? Обоснуйте ответ.
- 14) Для изготовления режущего инструмента (свёрла, фрезы) выберите марку углеродистой инструментальной стали. Приведите химический состав и механические характеристики стали, опишите её структуру. Укажите, требуется ли термическая обработка для этих изделий, и какая именно.
- 15) Какую сталь следует предпочесть для изготовления деталей листовой штамповкой с глубокой вытяжкой: Ст2сп или Ст2кп? Обоснуйте ответ.
- 16) Детали (рычаги, штоки) из качественной стали должны иметь предел прочности не менее 600 МПа и ударную вязкость не менее 0,4 МДж/м². Назначьте марку стали и укажите необходимую обработку.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

СПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Цель работы.

1. Изучить теоретический материал по теме работы.
2. Получить представление о сплавах на основе алюминия, меди, титана и других цветных металлов. Ознакомиться с возможностями термической обработки цветных сплавов. Усвоить маркировку сплавов на основе алюминия и меди.
3. Освоить основы выбора сплавов с необходимыми свойствами для конкретных условий эксплуатации.
4. Выполнить индивидуальное задание.

Основные сведения по теме работы.

Сталь – почти идеальный металлический материал, но она имеет существенный недостаток: детали и конструкции, сделанные даже из высокопрочной стали, тяжелы. Во многих отраслях техники, особенно в самолётостроении, необходимы такие же прочные, но более лёгкие материалы. Лёгкими принято считать все металлы и сплавы, плотность которых составляет меньше половины плотности железа, т. е. не превышает $3,5 \text{ г/см}^3$. К ним относятся алюминий Al ($= 2,7 \text{ г/см}^3$), магний Mg ($= 1,74 \text{ г/см}^3$), бериллий Be ($= 1,82 \text{ г/см}^3$). Наибольшее применение из этих металлов в качестве конструкционного материала имеет алюминий.

Алюминий и его сплавы

Алюминий – серебристо-белый металл с матовым оттенком. Кристаллическая решётка алюминия – гранецентрированный куб с периодом $a = 0,4041 \text{ нм}$. Полиморфных превращений алюминий не имеет. Температура плавления – 660°C . Чистый отождённый алюминий непрочен: $\sigma_{\text{в}} = 50\text{--}60 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 15\text{--}20 \text{ МПа}$, твёрдость $20\text{--}25 \text{ НВ}$, зато пластичность у него высокая: удлинение при разрыве составляет $30\text{--}50 \%$, относительное сужение – $80\text{--}95 \%$.

Чистый алюминий применяют в электротехнике для изготовления проводников тока, его электропроводимость $37,6 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$. Он уступает только серебру с проводимостью $63,0 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$ и меди – $60,1 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$. Все примеси, присутствующие в алюминии (постоянными являются Fe и Si), ухудшают его тепло- и электропроводимость. Алюминий устойчив к коррозии на воздухе, а также в среде многих газов и жидкостей благодаря защитному действию плотной пленки оксида Al_2O_3 . Чем чище металл, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминий допускает глубокую вытяжку, хорошо сваривается газовой и контактной сваркой, плохо обрабатывается резанием, имеет низкие литейные качества.

Из алюминия высокой чистоты получают фольгу для электрических конденсаторов. Токоведущие детали изготавливают из алюминия технической чистоты.

Основная масса алюминия расходуется на производство алюминиевых сплавов. Предел прочности алюминиевых сплавов достигает 500–700 МПа при плотности не более 2,85 г/см³. По удельной прочности некоторые алюминиевые сплавы соответствуют высокопрочным сталям: $\sigma_B/(\rho \cdot g) = 23$.

В зависимости от способа изготовления деталей и изделий сплавы алюминия делятся на деформируемые и литейные.

Деформируемые сплавы легко поддаются обработке давлением и предназначены для прокатки,ковки, прессования. Литейные сплавы отличаются жидкотекучестью, хорошо заполняют форму, малочувствительны к литейным трещинам; их используют для изготовления фасонных отливок при помощи литья в землю или в металлические формы.

Деформируемые сплавы, в зависимости от химического состава, делятся на сплавы с естественной твёрдостью, т. е. не поддающиеся упрочнению термической обработкой, и термически упрочняемые сплавы.

Сплавы, *не упрочняемые термической обработкой*, содержат мало легирующих элементов и применяются вместо чистого алюминия в тех случаях, когда его прочность недостаточна. Они легированы магнием в количестве 0,5–5 %, а также марганцем (до 1,2 %). Их прочность можно повысить путём холодной обработки давлением (явление наклёпа). Например, деформируемый алюминиевый сплав АМг3 (≈ 3 % Mg) в отожжённом состоянии имеет прочность на разрыв 180 МПа и удлинение 15 %, при небольшом наклёпе – 230 МПа и 8 %, после сильного наклёпа – 260 МПа и 3 %. Как видно из этих данных, в результате холодной деформации прочность сплава возрастает, а пластичность снижается.

Эти сплавы предназначены для работы в коррозионных средах, так как и марганец, и магний увеличивают коррозионную стойкость алюминиевых сплавов.

Применяют сплавы, *не упрочняемые термической обработкой*, для изготовления оконных рам вагонов, кузовов автомобилей, трубопроводов для бензина и масла, сварных баков и т. д.

Большая часть деформируемых алюминиевых сплавов – это *сплавы, упрочняемые термической обработкой*, значительно повышающей прочностные свойства. Прочность возрастает в результате дисперсионного твердения, или старения, после закалки. Это многокомпонентные сплавы, в которые входят различные элементы для повышения прочности (Cu, Mg, Zn), жаропрочности (Fe), антикоррозионных свойств (Mn, Mg).

Химический состав некоторых алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой, приводится в табл. 7.1.

Таблица 7.1

*Химический состав термически упрочняемых алюминиевых сплавов
(ГОСТ 4784-97)*

Сплавы	Марка	Химический состав, %							
		Cu	Mg	Si	Zn	Fe	Mn	Ni	Cr
Дуралю- мины	Д1	3,8–4,8	0,4–0,8	<0,7	<0,3	<0,7	0,4–0,8	<0,1	–
	Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	<0,5	<0,3	<0,5	0,3–0,9	0,1	–
	Д18	2,2–3	0,2–0,5	0,8	0,25	0,7	0,2	–	0,1
Авиаль	АВ	0,2–0,6	0,45–0,9	0,5–1,2	<0,2	<0,5	0,15–0,3	–	–
Ковочные	АК6 (АК8)	1,8–2,6	0,4–0,8	0,7–1,2	<0,3	<0,7	0,4–0,8	<0,1	–
Жаро- прочные	АК2 (АК4)	3,5–4,5	0,4–0,8	0,5–1,0	<0,3	0,5–1,0	<0,2	1,8–2,3	–
Высоко- прочные	В95	1,4–2,0	1,8–2,8	–	5–7	–	0,2–0,6	–	0,1–0,25

Типичным представителем упрочняемых термообработкой алюминиевых сплавов являются дуралюмины, в которых основной легирующий элемент – медь. Диаграмма состояния сплавов алюминий – медь приведена на рис. 7.1.



Рис. 7.1. Диаграмма состояния алюминий – медь

На диаграмме видно, что алюминий в твёрдом состоянии способен растворять определённое количество меди, причем её растворимость максимальна при 548°C . Твёрдый раствор при этой температуре содержит $5,7\% \text{ Cu}$. С понижением температуры растворимость меди быстро уменьшается: при комнатной температуре она составляет $0,2\%$. Структура алюминиевого сплава с $4\% \text{ Cu}$ в равновесных условиях состоит из кристаллов твёрдого раствора,

содержащего очень мало меди, и кристаллов интерметаллида CuAl_2 . Прочность такого сплава невелика (≈ 140 МПа).

Термическое упрочнение осуществляется в два этапа.

На первом этапе сплав нагревают под закалку до такой температуры, при которой достигается максимальное растворение меди: выше линии предельной растворимости ab , но ниже солидуса. При этом химическое соединение растворяется, и образуется однородный твёрдый раствор α с концентрацией меди 4 %. Быстрое охлаждение, чаще всего в воде, предотвращает выделение CuAl_2 , т. е. в результате закалки фиксируется структурное состояние сплава, достигнутое при высокой температуре. Атомы меди остаются в пересыщенном (переохлаждённом) твёрдом растворе. Этот пересыщенный твёрдый раствор при комнатной температуре является неустойчивой фазой, с повышенным запасом свободной энергии, связанной с искажениями кристаллической решётки алюминия атомами меди. Вся медь сверх равновесной концентрации 0,2 % будет стремиться выделиться из твёрдого раствора.

Второй этап термического упрочнения заключается в том, что из полученного при закалке твёрдого раствора постепенно, с течением времени, выделяется медь, образуя дисперсные частицы химического соединения CuAl_2 . В этом и состоит старение сплава.

Старением сплавов называют процессы распада твёрдого раствора, происходящие самопроизвольно в предварительно закалённом сплаве и приводящие к изменению структуры и свойств с течением времени.

Естественное старение происходит при комнатной температуре в течение нескольких суток (от 4 до 7). *Искусственное старение* (при повышенных температурах) происходит гораздо быстрее, в течение нескольких часов или минут, и дает наивысшие результаты.

Дисперсные частицы, возникающие в твёрдом растворе в процессе выдержки после закалки, препятствуют скольжению дислокаций при деформировании, поэтому прочность и твёрдость сплава возрастают. Прочность дуралюмина после естественного старения составляет около 400 МПа, т. е. почти вдвое больше, чем у отожжённого. Искусственное старение проводится при температурах 150–170 °С.

Все остальные алюминиевые сплавы, представленные в табл. 7.1, упрочняются такой же термической обработкой – закалкой и старением. Отличие только в выборе режима. Механические характеристики упрочнённых алюминиевых сплавов представлены в табл. 7.2.

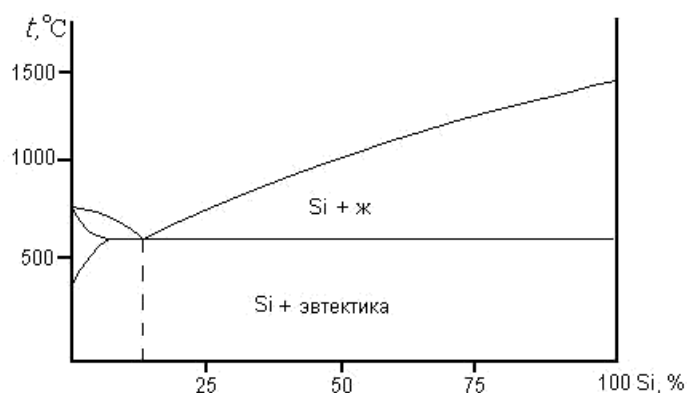


Рис. 7.2. Диаграмма состояния алюминий – кремний

Таблица 7.

Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	Механические свойства				
		в	02	$(5 \cdot 10^6)^{-1}$ (циклов)	, %	НВ
Д1*	Листы	400	240	105	20	95
	Прессованные прутки	480	320	125	14	–
Д16*	Листы	440	330	115	18	105
	Прессованные прутки	530	400	140	11	–
Д18*	Проволока	300	170	95	24	70
В95**	Листы	540	470	150	10	150
	Прессованные прутки	600	560	150	8	150
АК6**	Поковки	400	299	125	12	100
АК8**	Поковки	480	380	130	9	135

* Механические свойства после закалки и естественного старения

** Механические свойства после закалки и искусственного старения

Литейные алюминиевые сплавы должны обладать узким температурным интервалом кристаллизации для получения плотной отливки, т. е. это сплавы, близкие по составу к эвтектике или эвтектические. Широко применяются литейные сплавы Al–Cu, Al–Zn, Al–Si. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы алюминий – кремний, по составу близкие к эвтектическому. Эти сплавы называют силуминами. Маркируются литейные алюминиевые сплавы буквами АЛ (алюминиевый литейный) и кодирующей цифрой, определяющей химический состав сплава, например: АЛ2, АЛ4.

Обычный силумин АЛ2 является заэвтектическим сплавом, содержащим 12–13 % Si (рис. 7.2). После кристаллизации структура этого сплава представляет собой крупные светлые включения избыточного кремния и грубоигольчатую

эвтектику. Сплав с такой структурой обладает низкими механическими свойствами: прочность составляет 100–120 МПа, а относительное удлинение при разрыве – 3–5 %. Только путем модифицирования расплава натрием или смесью NaF и NaCl удаётся получить мелкозернистую эвтектику со значительно более мелкими кристалликами кремния. Это приводит к значительному повышению механических свойств: $\sigma_b = 180\text{--}200$ МПа и $\delta = 6\text{--}8$ %.

Двойные алюминий-кремнистые сплавы обладают очень хорошей жидкотекучестью, поэтому из них изготавливают фасонные отливки сложной формы, для которых не требуется высоких механических свойств. Для повышения эксплуатационных и механических свойств (отливки для нагруженных деталей авиационных двигателей, литые детали, предназначенные для работы при температурах 250–300 °С и т. д.) сплавы легируют магнием, медью, марганцем, никелем или подвергают термической обработке – закалке в воду и искусственному старению. При этом предел прочности может достигать 240–260 МПа при относительном удлинении 20–18 %.

Легируемые силумины могут применяться для изготовления корпусов компрессоров, картеров, головок цилиндров (АЛ9), деталей, работающих в условиях высокой влажности, в судостроении и самолетостроении (АЛ8, АЛ27).

Медь и её сплавы

Медь – действительно «цветной» металл: её цвет может варьироваться от светло-розового до красного. Медь имеет гранецентрированную кубическую решётку с параметром $a = 0,361$ нм. Полиморфных превращений у меди нет; температура плавления 1083 °С. Медь обладает высокой технологичностью: хорошо паяется, сваривается, легко обрабатывается давлением. В отожжённом состоянии предел прочности меди невелик, он составляет 200–250 МПа при относительном удлинении около 40–50 %.

Главными отличительными характеристиками меди являются высокая теплопроводность и электропроводимость, пластичность и коррозионная стойкость. Но так же, как и у алюминия, примеси отрицательно влияют на свойства меди. В зависимости от содержания примесей различают следующие марки меди (ГОСТ 859–78): М00 (99,99 % Cu), М0 (99,97 % Cu), М2 (99,7 % Cu). Благодаря высокой электропроводимости медь нашла широкое применение в электротехнике. Из меди изготавливают шины, ленты, кабели, рубильники, обмотки электродвигателей и т. д. Примеси понижают электропроводимость, особенно те, что образуют с медью твердые растворы: фосфор, мышьяк, алюминий, олово. Другое основное свойство меди – высокая теплопроводность. Поэтому медь используют в металлургии и литейном производстве для водоохлаждаемых тиглей, кристаллизаторов, поддонов и изложниц.

Вредными примесями меди также являются висмут и свинец. Они практически не растворяются в меди, а образуют легкоплавкие эвтектики (с

температурой плавления 326 °С и 270 °С соответственно) и создают красноломкость при горячей прокатке меди.

На механические свойства меди примеси влияют незначительно; большей мере свойства зависят от состояния (литое, деформированное и т. д.). Для повышения прочности медь легируют цинком, алюминием, оловом, никелем, железом или подвергают холодной пластической деформации. При этом её прочность может возрасти до 380–450 МПа при уменьшении электропроводимости на 3–5 %.

Медные сплавы, как и сплавы большинства других цветных металлов, по технологическим свойствам подразделяются на деформируемые (которые используются в производстве полуфабрикатов: листов, полос, проволоки и других профилей) и литейные (применяемые для изделий, которые получают путем литья в песчаные или металлические формы, а также методами непрерывной разливки и центробежного литья). По способности упрочняться с помощью термической обработки медные сплавы делятся на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. По химическому составу медные сплавы подразделяются на две основные группы: латуни и бронзы.

Сплавы меди с цинком носят название *латуней*. Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы, такие как алюминий, никель, марганец. Маркируются двойные латуни следующим образом: вначале ставится буква Л («латунь»), а затем цифра, показывающая содержание меди в процентах. В специальных латунях после буквы Л следуют буквы русского алфавита, обозначающие легирующий элемент: А – Al, Н – Ni, К – Si, С – Pb, О – Sn, Ж – Fe, Мц – Mn, Ф – P, Б – Be. После букв ставятся цифры, показывающие среднее содержание меди и легирующих элементов в процентах (см. табл. 7.3).

Введение тех или иных легирующих элементов повышает механические и антикоррозионные свойства латуни.

Медь с цинком образует много твёрдых растворов, что очевидно из диаграммы состояния Cu–Zn (рис. 7.3).

Таблица 7.3

Химический состав и механические свойства деформируемых латуней после отжига (ГОСТ 15527-70)

Марка ла- туни	Медь	Прочие элементы	в	02			КСУ, МДж/м ²	НВ
	% (мас.)		МПа		%			
Л90	88-91	–	260	120	45	80	1,76	53
Л68	67-70	–	320	90	55	70	1,68	55
Л60	59-62	–	380	160	25	62	0,78	77
ЛАН59-3-2	57-60	2,5–3,5 Al 2–3 Ni	380	300	50	–	0,5	75
ЛЖМц59-1-1	57-60	0,1–0,4 Al 0,6–1,2 Fe 0,5–0,8 Mn	450	170	50	58	1,18	88

		0,3–0,7 Sn						
ЛО70-1	69-71	1–1,5 Sn	350	100	60	70	0,6	60
ЛК80-3	79-81	2,5–4 Si	310	200	58	55	0,4	100

Практически применяются сплавы с содержанием цинка не более 42 %, которые имеют хорошие механические свойства (см. рис. 7.4).

В технике применяются однофазные или двухфазные латуни. Однофазные латуни имеют структуру -твердого раствора, и поскольку в этой области нет фазовых превращений, то в -латуни нельзя получить неравновесное состояние, – следовательно, её нельзя закалить.

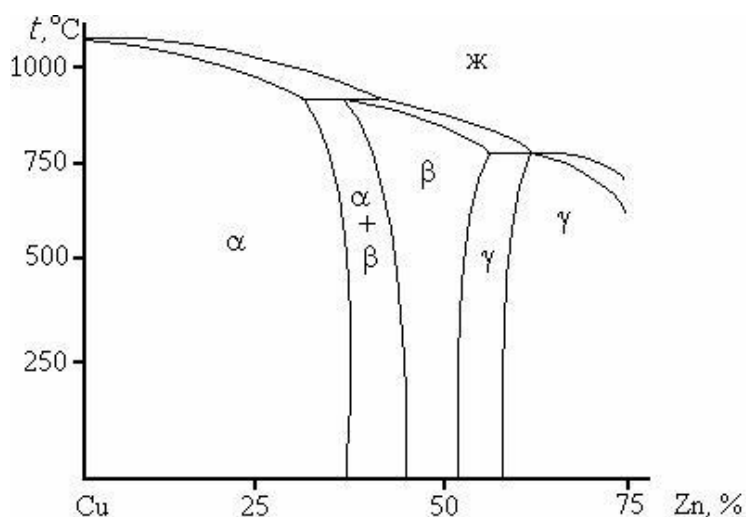


Рис. 7.3. Диаграмма состояния медь-цинк

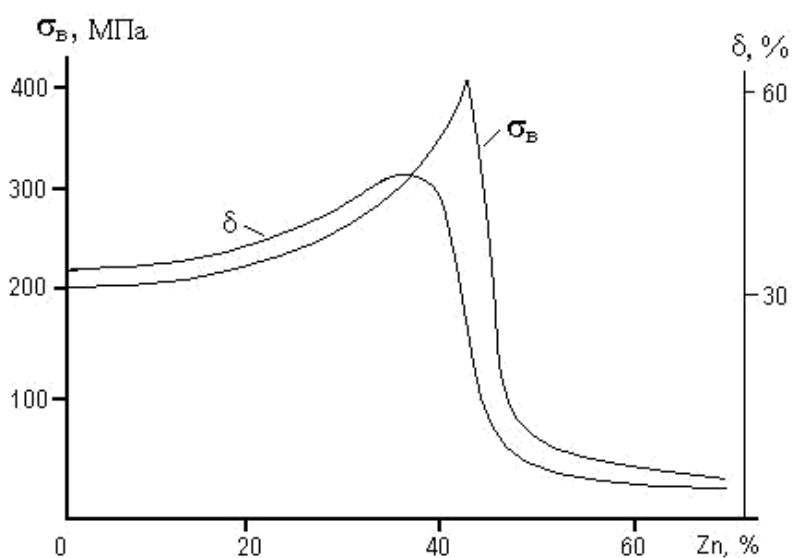


Рис. 7.4. Влияние цинка на механические свойства меди

Однофазная латунь представляет собой материал относительно невысокой твёрдости и прочности, обладающий значительной пластичностью. При переходе за предел насыщения (39 % Zn) появляется вторая фаза – электронное соединение

CuZn, что сопровождается резким снижением пластичности и повышением прочности и твёрдости. Это объясняется тем, что ϵ -фаза является твёрдой и хрупкой, поэтому при увеличении ее количества наблюдается повышение твёрдости и хрупкости сплава. Применение находят или однофазные латуни, или двухфазные, в которых нет преобладания хрупкой фазы (т. е. содержащие 41–42 % Zn).

Однофазные латуни благодаря высокой пластичности хорошо деформируются в холодном состоянии, при этом увеличивается и прочность, и твёрдость латуни. Двухфазные латуни подвергают прокатке и прессованию в горячем состоянии. Латунь очень хорошо поддается обработке резанием, особенно если она легирована свинцом. При резании свинцовистых латуней образуется короткая ломкая стружка, что облегчает обработку изделий. Для повышения прочности и твёрдости латунь легируют алюминием (≤ 4 %).

Латунь используется как конструкционный материал там, где требуются высокая прочность и коррозионная стойкость: в трубопроводной арматуре, в химическом машиностроении и особенно в судостроении. Изготавливают из латуней листы, ленты, проволоку, а затем из этого проката – радиаторные трубки, снарядные гильзы, трубопроводы, шайбы, гайки, втулки, уплотнительные кольца, токопроводящие детали электрооборудования.

Бронзы – это сплавы меди со всеми другими элементами, кроме цинка. В их названии используют прилагательные, указывающие на второй компонент. В зависимости от состава и структурного состояния после обработки прочность бронз может быть повышена с 200 до МПа. Бронзы подразделяются на алюминиевые, оловянистые, кремнистые, бериллиевые и т. д. Бронзы маркируют буквами «Бр» (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, указывающие на название и содержание в % легирующих элементов. Например, БрОФ10-1: 10 % Sn, % P, остальное медь.

Оловянистые бронзы известны с глубокой древности; именно этот замечательный материал дал название бронзовому веку. Они, как и другие сплавы, делятся на деформируемые (< 10 % Sn) и литейные (> 10 % Sn). Когда-то бронзы получали название в зависимости от их назначения: монетная (4–10 % Sn), пушечная (8–18 % Sn), колокольная (20–30 % Sn), зеркальная (30–35 % Sn). Оловянистые бронзы отличаются хорошими литейными свойствами, например, малой усадкой при кристаллизации, поэтому можно отливать сложные по конфигурации изделия. С целью экономии дорогого олова в бронзы добавляют цинк в таком количестве, чтобы он полностью растворялся в меди, образуя твёрдый раствор, тем самым повышая механические свойства.

Для повышения антифрикционных свойств и лучшей обрабатываемости резанием в оловянистые бронзы добавляют свинец. Литейные оловянистые бронзы

применяются для пароводяной арматуры, так как обладают высокой коррозионной стойкостью в воде и на воздухе.

Деформируемые бронзы имеют однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергают отжигу при 600–700 °С. Они пластичнее и прочнее, чем литейные. Кроме того, деформируемые оловянистые бронзы обладают высокими упругими свойствами, поэтому их используют для получения пружин и мембран в электротехнике и других областях.

Алюминиевые бронзы обычно содержат от 5 до 10 % алюминия. Механические и коррозионные свойства этих бронз выше, чем оловянистых. По мере изменения состава, аналогично латуням и оловянистым бронзам, меняются и свойства: твёрдость *НВ*, прочность σ_b и пластичность δ быстро растут, затем пластичность и прочность понижаются из-за образования второй хрупкой фазы. Поэтому в практике применяют двухфазные бронзы, содержащие не более 11 % Al. Двухфазные бронзы отличаются высокой прочностью – до 600 МПа и твёрдостью свыше 100 *НВ*. Так как алюминиевые бронзы испытывают эвтектоидное превращение, то их можно подвергать закалке и старению. Однофазные алюминиевые бронзы (БрА7) более пластичны, чем двухфазные, и относятся к деформируемым. Они обладают высокой прочностью и пластичностью ($\sigma_b = 400–450$ МПа, $\delta = 60$ %).

Легируют алюминиевые бронзы железом, никелем, марганцем для устранения литейных недостатков и увеличения механических свойств после упрочняющей термической обработки (закалки и последующего старения). Например, у бронзы БрАЖН 10-4-4 твердость увеличивается от 140–160 *НВ* до 400 *НВ*. Поэтому из алюминий-железоникелевых бронз изготавливают детали, работающие в условиях износа: сёдла клапанов, направляющие втулки, части насосов и турбин, шестерни и др.

Кремнистые бронзы содержат до 3 % Si и являются заменителями оловянистых бронз. Они пластичны, коррозионно-стойки в некоторых агрессивных средах, хорошо свариваются и паяются. Для повышения твёрдости и прочности кремнистых бронз их легируют марганцем и никелем с последующей термической обработкой. Эти бронзы используют вместо более дорогих оловянистых при изготовлении антифрикционных деталей, а также для замены бериллиевых бронз при производстве пружин.

Свинцовистые бронзы (БрС30) обладают высокими антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью (до 300 °С). Прочность таких бронз небольшая, но они очень пластичны, хорошо сопротивляются ударам. Поэтому из этих бронз изготавливают вкладыши подшипников, работающих при больших давлениях и скоростях.

Бериллиевые бронзы (БрБ2) содержат не более 2–2,5 % бериллия. Так как бериллий образует с медью твёрдый раствор переменной растворимости, то эту бронзу применяют только после упрочняющей термической обработки (заковки от 780 °С и старения при 320 °С). При этом повышаются как прочностные, так и упругие свойства: $\sigma_B = 1300\text{--}1500$ МПа, $\sigma_{упр} = 600\text{--}740$ МПа. Кроме того, бериллиевые бронзы обладают высокой электропроводимостью, поэтому их применяют в виде пружин в электроаппаратуре, в качестве упругих контактов и т. д. Но высокая стоимость не позволяет широко применять эту бронзу. Заменяют её более дешёвой – титановой или титановохромистой бронзой. После термической обработки она имеет почти такие же прочностные свойства, но более пластична и имеет высокую релаксационную стойкость при температуре до 400 °С. Поэтому упругие элементы из такой бронзы могут работать при более высокой температуре, чем из бериллиевой.

Состав и механические характеристики некоторых литейных и деформируемых бронз приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Химический состав и механические свойства бронз

Бронза	Содержание элементов, %				В	02	, %	НВ
	Sn	Pb	Zn	Прочие	МПа			
Деформируемые бронзы								
БрОЦС4-4-2,5	3–5	1,5–3,5	3–5	–	350	130	40	60
БрОФ6,5-0,4	6–7	–	–	0,26–0,4 Р 0,1–0,2 Ni	400	250	60–70	80
БрАЖН10-4-4 (закалка и старение)	–	–	–	9,5–11 Al 3,5–5,5 Fe 3,5–5,5 Ni	750–830	–	9–15	180–220
БрБНТ1,9 (закалка и старение)	–	–	–	1,85–2,1 Be 0,2–0,4 Ni 0,1–0,25 Ti	1200	–	4	370
Литейные бронзы								
БрО5Ц5С5	4–6	4–6	4–6	–	180	100	4	60
БрС30	–	27–31	–	–	60	–	4	25

Антифрикционные сплавы

Антифрикционные материалы предназначены для изготовления подшипников (опор) скольжения, которые широко применяют в современных машинах и приборах из-за их устойчивости к вибрациям, бесшумности работы, небольших габаритов. *Антифрикционность* – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряжённой детали – стального или чугунного вала.

Хороший антифрикционный материал должен иметь высокую теплопроводность, хорошо смачиваться смазкой, образовывать на поверхности защитные плёнки мягкого металла, хорошо прирабатываться, иметь высокое сопротивление усталости.

Подшипниковый материал оценивают по коэффициенту трения и по допустимым значениям давления на опору p и скорости скольжения v . Параметр pv определяет удельную мощность трения.

Металлические подшипниковые материалы предназначены для работы в режиме жидкостного трения, сочетающемся в условиях эксплуатации с режимом граничной смазки.

Из-за перегрева возможно разрушение граничной масляной плёнки, в этом случае важно, как материал сопротивляется схватыванию. Поэтому в структуре сплава должна быть мягкая составляющая.

По структуре подшипниковые материалы подразделяются на два типа: 1) сплавы с мягкой матрицей и твёрдыми включениями; 2) сплавы с твёрдой матрицей и мягкими включениями.

Сплавы первого типа – это баббиты, а также медные сплавы, в основном, бронзы. Мягкая матрица в этих сплавах обеспечивает хорошую прирабатываемость и особый микрорельеф поверхности, улучшающий распределение смазки и теплоотвод. Твёрдые включения, на которые опирается вал, обеспечивают высокую износостойкость.

Баббиты – мягкие (30 HB) антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе. В соответствии с ГОСТ 1320–74 к сплавам на оловянной основе относятся баббиты Б83 (83 % Sn, 11 % Sb, 6 % Cu) и Б88, на свинцовой основе – Б16 (16 % Sn, 16 % Sb, 2 % Cu), БС6 и БН. Особую группу образуют более дешёвые свинцово-кальциевые баббиты: БКА и БК2 (ГОСТ 1209-90).

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят все остальные сплавы, но значительно уступают им по сопротивлению усталости.

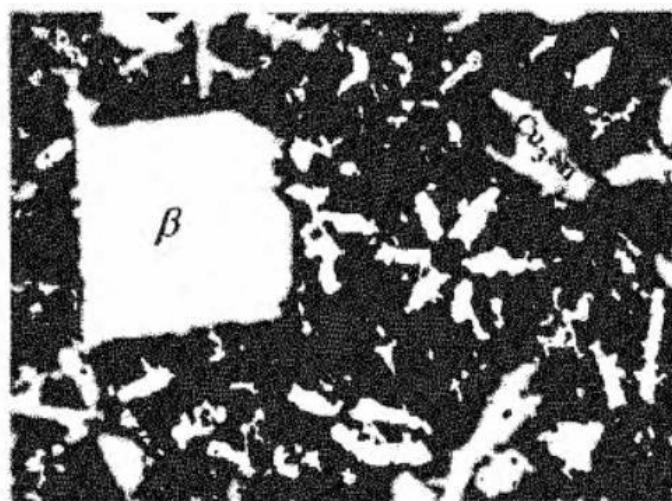
В связи с этим баббиты применяют только для тонкого (менее 1 мм) покрытия рабочей поверхности опоры скольжения. Наилучшими свойствами обладают оловянистые баббиты, у которых $pv = (500–700) \cdot 10^5$ Па·м/с. Из-за высокого содержания дорогого олова их используют для подшипников ответственного назначения (дизелей, паровых турбин и т. п.), работающих при больших скоростях и нагрузках (табл. 7.5). Их структура (см. рис. 7.5) состоит из твёрдого раствора сурьмы в олове (мягкая фаза, тёмный фон) и твёрдых включений β ? (SnSb) и Cu_3Sn .

Таблица 7.5

Характеристики антифрикционных материалов

Материал	НВ	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		Без смазочно- го материала	Со смазочным материалом	p , МПа	v , м/с	pv , МПа·м/с
Баббиты:						
Б83	30	0,07–0,12	0,004–0,006	15	50	75
Б16	30			10	30	3
БК2	32			15	15	6
Бронзы:						
БрО10Ф1	100	0,1–0,2	0,004–0,009	15	10	15
БрО5Ц5С5	60			8	3	12
БрС30	25			25	12	30
Латуни:						
ЛЦ16К4	100	0,15–0,24	0,009–0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	80			10,6	1	10
Алюминиевый сплав						
А09–2	31	0,1–0,15	0,008	25	20	100

Бронзы относятся к лучшим антифрикционным материалам. Особое место среди них занимают оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы. К первым относятся бронзы БрО10Ф1, БрО10Ц2, ко вторым — БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3 (ГОСТ 613–79). Бронзы применяют для монолитных подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров, работающих при значительных давлениях и средних скоростях скольжения (табл. 7.2).

Рис. 7.5. Микроструктура баббита Б83. $\times 400$

В последнее время бронзы широко используются как компоненты порошковых антифрикционных материалов или тонкостенных пористых покрытий, пропитанных твердыми смазочными материалами.

Латуни применяют в качестве заменителей бронз для опор трения. Однако по антифрикционным свойствам они уступают бронзам. Двухфазные латуни

ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и т.д. (ГОСТ 17711–92 применяют при малых скоростях скольжения (< 2 м/с) и невысоких нагрузках. Их часто используют для опор трения приборов.

К сплавам второго типа относятся свинцовистая бронза БрС30 с 30 % Pb (ГОСТ 493–79), и алюминиевые сплавы с оловом, например, сплав А09–2 (9 % Sn, 2 % Cu). Функцию мягкой составляющей в этих сплавах выполняют включения свинца или олова. При граничном трении на поверхность вала переносится тонкая плёнка этих мягких легкоплавких металлов, защищая шейку стального вала от повреждения.

Антифрикционные свойства сплавов достаточно высокие, особенно у алюминиевых сплавов. Из-за хорошей теплопроводности граничный слой смазочного материала на этих сплавах сохраняется при больших скоростях скольжения и высоком давлении (см. табл. 7.2).

Алюминиевый сплав А09–2 применяют для отливки монометаллических вкладышей, бронзу – для наплавки на стальную ленту. В настоящее время наибольшее распространение получили многослойные подшипники, в состав которых входят многие из рассмотренных выше сплавов. Сплавы или чистые металлы в них уложены слоями, каждый из которых имеет определённое назначение.

Строение четырёхслойного подшипника, применяемого в современном автомобильном двигателе, показано на рис. 7.6. Он состоит из стального основания, слоя (250 мкм) свинцовистой бронзы (БрС30), тонкого (≈ 10 мкм) слоя никеля или латуни и слоя свинцово-оловянного сплава толщиной 25 мкм. Стальная основа обеспечивает прочность и жёсткость подшипника; верхний мягкий слой улучшает прирабатываемость. Когда он изнашивается, рабочим слоем становится свинцовистая бронза.

Слой бронзы, имеющий невысокую твёрдость, также обеспечивает хорошее прилегание шейки вала, высокую теплопроводность и сопротивление усталости. Слой никеля служит барьером, не допускающим диффузию олова из верхнего слоя в свинец бронзы.

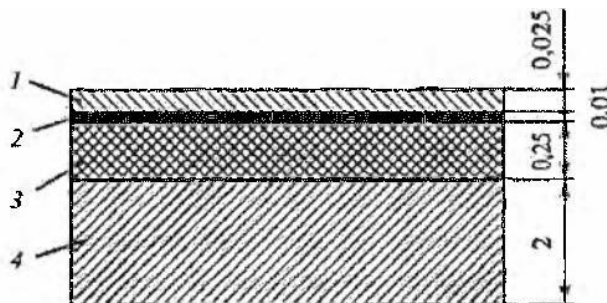


Рис. 7.6. Строение металлического подшипника скольжения:

1 – сплав свинца и олова; 2 – никель; 3 – свинцовистая бронза; 4 – сталь

Некоторые марки цветных сплавов и области их применения отражены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Марки и применение цветных металлов и сплавов

Вид материала	Условное обозначение	Область применения
Бронзы литейные оловянные: БрОЗЦ12С5, БрО5Ц5С5, БрО10Ф1	БрОЗЦ12С5 ГОСТ 613-79	Венцы червячных колёс, втулки подшипников, корпуса насосов
Бронзы литейные безоловянные: БрА9ЖЗЛ, БрА10Мц2Л, БрА10ЖЗМц2	БрА9ЖЗЛ ГОСТ 493-79 БрА10Мц2Л ГОСТ 493-79	Фасонное литьё, трубы, корпуса Венцы небольших червячных колёс
Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением: БрАЖ9-4, БрБ2, БрКМц3-1, БрМц5	БрАЖ9-4 ГОСТ 18175-78	Детали с антифрикционными свойствами: гайки ходовых винтов, втулки, шайбы
Латуни литейные: ЛЦ40С, ЛЦ30А3, ЛЦ40Мц1,5	ЛЦ40Мц1,5 ГОСТ 17711-93	Корпуса кранов, тройники, втулки
Латуни, обрабатываемые давлением: Л68, Л63, ЛМц58-2	Л68 ГОСТ 15527-70	Шпиндели, втулки кранов, гайки, коррозионно-стойкие детали
Медь: М0, М1, М2	М4 ГОСТ 859-78	Детали, обладающие высокой теплопроводностью: гайки, болты, контакты
Сплавы алюминиевые литейные: АК7, АМ5	АК7 ГОСТ 1583-93 АМ5 ГОСТ 1583-93	Корпуса приборов, детали карбюраторов, арматура двигателей Высоконагруженные детали, воспринимающие вибрационные нагрузки
Сплавы алюминиевые, обрабатываемые давлением: АК4, АМг6	АК4 ГОСТ 4784-74 АМг6 ГОСТ 4784-74	Лопатки компрессоров, крыльчатки, детали двигателей Трубопроводы, ёмкости для жидкости
Сплавы титановые: ВТ5, ВТ6, ВТ9	ВТ6 ГОСТ 19807-74	Детали, обладающие антикоррозионной стойкостью Детали, работающие в широком температурном диапазоне Детали, применяемые в авиастроении и кос-
		мической технике
Сплавы магниевые литейные: МЛ5, МЛ9, МЛ15	МЛ5 ГОСТ 2856-79	Несилловые детали: корпуса, крышки
		Детали, подвергаю-

Сплавы магниевые деформируемые: МА1, МА2, МА5	МА1 ГОСТ 14957-76	щиеся высоким центробежным нагрузкам при умеренных температурах
--	-------------------	---

Задания для практической работы

- 1) Какой термической обработке подвергается сплав дуралюмин? Для обоснования ответа приведите диаграмму состояния алюминий – медь. Каков механизм упрочнения дуралюмина?
- 2) Какой материал используют для часовых и приборных пружин? Опишите его состав и структуру, приведите механические характеристики.
- 3) Назначьте марку латуни, устойчивой к коррозии в морской воде. Расшифруйте её состав и опишите структуру, используя диаграмму состояния медь – цинк. Укажите способ упрочнения и основные свойства латуни.
- 4) Из чего изготавливают вкладыши подшипников скольжения? Опишите состав и структуру сплавов, назовите марки.
- 5) Для изготовления ответственных деталей (втулки, клапаны, зубчатые колёса) выбран сплав БрАЖН10-4-4. Расшифруйте состав, укажите режим термической обработки, механические свойства и опишите структуру, используя диаграмму состояния медь – алюминий.
- 6) Для изготовления мембран и других упругих элементов применяют бронзу БрБНТ1,9. Укажите состав, режим термической обработки и механические свойства материала. Какие процессы происходят при термической обработке? Объясните природу упрочнения в связи с диаграммой состояния медь – бериллий.
- 7) Приведите марки и опишите структуру литейных алюминиевых сплавов. Каким образом повышают их эксплуатационные свойства? Укажите области применения отливок из алюминиевых сплавов.
- 8) Для изготовления деталей в авиастроении применяется сплав Д18. Расшифруйте состав сплава, укажите способ изготовления деталей из него и приведите характеристики механических свойств.
- 9) Для изготовления некоторых деталей в авиастроении применяется сплав АК6. Расшифруйте состав сплава, укажите способ изготовления деталей из него и приведите характеристики механических свойств. Какой упрочняющей термообработке подвергают этот сплав?
- 10) Для деталей уплотнения используют бронзу БрОФ6,5-0,4. Расшифруйте состав сплава, опишите структуру и термическую обработку бронзы, приведите характеристики механических свойств.
- 11) Для деталей пароводяной арматуры выбрана бронза БрО5Ц5С5. Расшифруйте состав сплава, опишите структуру и объясните назначение

легирующих элементов. Приведите характеристики механических свойств.

12) Для изготовления деталей способом глубокой вытяжки применяют латунь Л68. Укажите состав и опишите структуру сплава. Назначьте режим термической обработки, применяемой между отдельными операциями вытяжки, и обоснуйте его выбор. Приведите характеристики механических свойств этого сплава.

13) Образец из сплава Д16 медленно охладили от 550 °С до комнатной температуры. Твёрдость составила 65 *НВ*. Второй образец закалили с той же температуры в воде, а затем подвергли нагреву на 150 °С в течение 100 ч. Твёрдость сплава оказалась равна 120 *НВ*. Объясните разницу значений твёрдости.

14) Образцы закалённого сплава Д16 нагревали на 150 °С в течение различного времени. Измерения твёрдости дали следующие результаты:

Время отжига, ч	0	10	100	200	1000
Твердость, <i>НВ</i>	65	95	120	115	100

Постройте графическую зависимость твёрдости от времени отжига. Объясните такое поведение сплава.

15) Какой сплав следует выбрать для изготовления подшипников скольжения турбины? Поясните структуру сплава и её влияние на антифрикционные свойства.

16) Предложите сплав с высокой удельной прочностью для изготовления высоконагруженных деталей самолётов (обшивки, шпангоуты, лонжероны). Опишите его структуру и способ упрочнения.