

Л.6. Машиностроительные металлы и сплавы

6.1. Стали и чугуны

Стали являются наиболее распространенными материалами. Обладают хорошими технологическими свойствами. Изделия получают в результате обработки давлением и резанием. Достоинством является возможность, получать нужный комплекс свойств, изменяя состав и вид обработки. Стали, подразделяют на углеродистые и легированные.

Влияние углерода и примесей на свойства сталей

Углеродистые стали являются основными. Их свойства определяются количеством углерода и содержанием примесей, которые взаимодействуют с железом и углеродом.

Влияние углерода. Влияние углерода на свойства сталей показано на рис. 6.1.

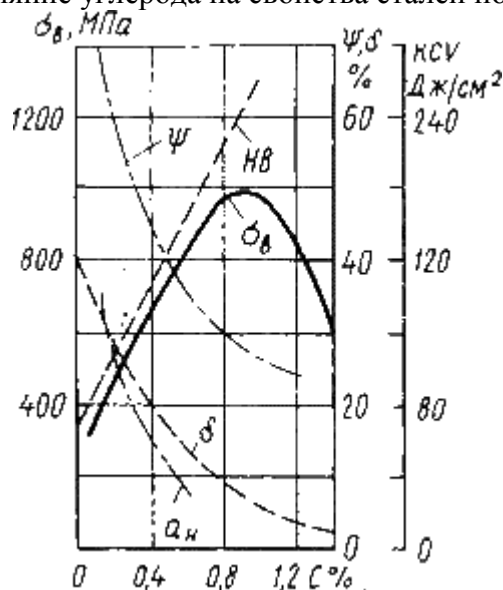


Рис. 6.1. Влияние углерода на свойства сталей

С ростом содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита, при одновременном снижении доли феррита. Изменение соотношения между составляющими приводит к уменьшению пластичности, а также к повышению прочности и твердости. Прочность повышается до содержания углерода около 1%, а затем она уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного. Углерод влияет на вязкие свойства. Увеличение содержания углерода повышает порог хладноломкости и снижает ударную вязкость. Повышаются электросопротивление и коэрцитивная сила, снижаются магнитная проницаемость и плотность магнитной индукции. Углерод оказывает влияние и на технологические свойства. Повышение содержания углерода ухудшает литейные свойства стали (используются стали с содержанием углерода до 0,4 %), обрабатываемость давлением и резанием, свариваемость. Следует учитывать, что стали с низким содержанием углерода также плохо обрабатываются резанием.

Влияние примесей. В сталях всегда присутствуют примеси, которые делятся на четыре группы.

1. Постоянные примеси: кремний, марганец, сера, фосфор. Марганец и кремний вводятся в процессе выплавки стали для раскисления, они являются технологическими примесями. Содержание марганца не превышает 0,5...0,8 %. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Он способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS , так как образует с серой соединение сульфид марганца MnS . Частицы сульфида марганца располагаются в виде отдельных включений, которые деформируются и оказываются вытянутыми вдоль направления прокатки. Содержание кремния не превышает 0,35...0,4 %. Кремний, дегазируя металл, повышает

плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести. Но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке. Содержание фосфора в стали 0,025...0,045 %. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладноломкость, уменьшает работу распространения трещин. Повышение содержания фосфора на каждую 0,01 % повышает порог хладноломкости на 20...25 °С. Фосфор обладает склонностью к ликвации, поэтому в центре слитка отдельные участки имеют резко пониженную вязкость. Для некоторых сталей возможно увеличение содержания фосфора до 0,10...0,15 %, для улучшения обрабатываемости резанием. Сера уменьшает пластичность, свариваемость и коррозионную стойкость. Содержание серы в сталях составляет 0,025...0,06 %. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS , которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988 °С. При нагреве под прокатку или ковку эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление красноломкости. Красноломкость – повышение хрупкости при высоких температурах. Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, а так же предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

2. Скрытые примеси – газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке. Азот и кислород находятся в стали в виде хрупких неметаллических включений: окислов (FeO , SiO_2 , Al_2O_3), нитридов (Fe_2N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах). Примеси внедрения (азот N , кислород O) повышают порог хладноломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению. Неметаллические включения (окислы, нитриды), являясь концентраторами напряжений, могут значительно понизить предел выносливости и вязкость. Очень вредным является растворенный в стали водород, который значительно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катанных заготовках и поковках флокенов. Флокены – тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Металл с флокенами нельзя использовать в промышленности, при сварке образуются холодные трещины в наплавленном и основном металле. Если водород находится в поверхностном слое, то он удаляется в результате нагрева до 150...180 °С. Для удаления скрытых примесей используют вакуумирование.

3. Специальные примеси – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали – легированные стали. Основным легирующим элементом является хром 0,8...1,2 %. Он повышает прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твердости стали. Порог хладноломкости хромистых сталей составляет от 0 до – 100 °С.

Дополнительные легирующие элементы.

Бор до 0,003 %. Увеличивает прокаливаемость, а также повышает порог хладноломкости + 20...– 60 °С.

Марганец – увеличивает прокаливаемость, однако содействует росту зерна, и повышает порог хладноломкости до +40...– 60 °С.

Титан (~0,1 %) вводят для измельчения зерна в хромомарганцевой стали.

Введение молибдена (0,15...0,46 %) в хромистые стали увеличивает прокаливаемость, снижает порог хладноломкости до – 20...–120 °С. Молибден увеличивает статическую, динамическую и усталостную прочность стали, устраняет склонность к внутреннему окислению. Кроме того, молибден снижает склонность к отпускной хрупкости сталей, содержащих никель.

Ванадий в количестве (0,1...0,3) % в хромистых сталях измельчает зерно и повышает прочность и вязкость.

Введение в хромистые стали никеля, значительно повышает прочность и прокаливае-

мость, понижает порог хладноломкости, но при этом повышает склонность к отпускной хрупкости (этот недостаток компенсируется введением в сталь молибдена). Хромоникелевые стали, обладают наилучшим комплексом свойств. Однако никель является дефицитным, и применение таких сталей ограничено.

Значительное количество никеля можно заменить медью, это не приводит к снижению вязкости.

При легировании хромомарганцевых сталей кремнием получают, стали – хромансиль (20ХГС, 30ХГСА). Стали обладают хорошим сочетанием прочности и вязкости, хорошо свариваются, штампуются и обрабатываются резанием. Кремний повышает ударную вязкость и температурный запас вязкости.

Добавка свинца, кальция – улучшает обрабатываемость резанием. Применение упрочнения термической обработки улучшает комплекс механических свойств.

Легирующие элементы растворяются в основных фазах железоуглеродистых сплавов (феррит, аустенит, цементит), или образуют специальные карбиды. Все карбиды обладают высокой твердостью и температурой плавления.

4. Случайные примеси.

Классификация чугунов

Чугун отличается от стали: по составу – более высокое содержание углерода и примесей; по технологическим свойствам – более высокие литейные свойства, малая способность к пластической деформации, почти не используется в сварных конструкциях.

В результате превращения углерод может не только химически взаимодействовать с железом, но и выделяться в элементарном состоянии в форме графита. Жидкая фаза, аустенит и феррит могут находиться в равновесии и с графитом. Диаграмма состояния железо – графит показана штриховыми линиями на рис. 6.2. Линии диаграммы находятся выше линий диаграммы железо – цементит. Температуры эвтектического и эвтектоидного превращений, соответственно, 1153 °С и 738 °С. Точки С, Е, S – сдвинуты влево, и находятся при концентрации углерода 4,24; 2,11 и 0,7 %, соответственно.

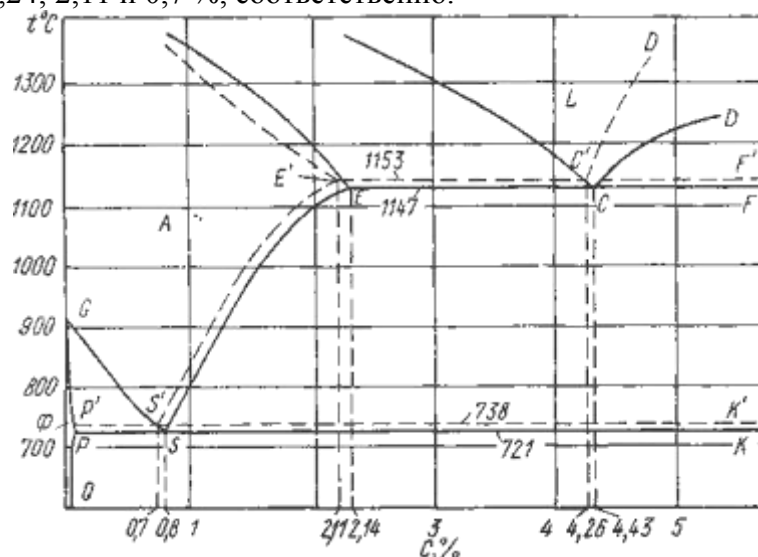


Рис. 6.2. Диаграмма состояния железо – углерод:
сплошные линии – цементитная система; пунктирные – графитная

При высоких температурах цементит разлагается с выделением графита, поэтому диаграмма состояния железо – цементит является метастабильной, а диаграмма железо – графит – стабильной. Процесс образования графита в сплавах железа с углеродом называется графитизацией.

Графит – это полиморфная модификация углерода. Так как графит содержит 100 % углерода, а цементит – 6,67 %, то жидкая фаза и аустенит по составу более близки к цементиту, чем к графиту. Следовательно, образование цементита из жидкой фазы и аустенита должно

протекать легче, чем графита. С другой стороны, при нагреве цементит разлагается на железо и углерод. Следовательно, графит является более стабильной фазой, чем цементит.

Возможны два пути образования графита в чугунах. При благоприятных условиях (наличие в жидкой фазе готовых центров кристаллизации графита и очень медленное охлаждение) происходит непосредственное образование графита из жидкой фазы. При разложении ранее образовавшегося цементита. При температурах выше 738°C цементит разлагается на смесь аустенита и графита по схеме: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe}_\gamma(\text{C}) + \text{C}$ (графит). При температурах ниже 738°C разложение цементита осуществляется по схеме: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe}_\alpha(\text{C}) + \text{C}$ (графит). При малых скоростях охлаждения степень разложения цементита больше.

Графитизацию из жидкой фазы, а также от распада цементита первичного и цементита, входящего в состав эвтектики, называют первичной стадией графитизации. Выделение вторичного графита из аустенита называют промежуточной стадией графитизации. Образование эвтектоидного графита, а также графита, образовавшегося в результате распада цементита, входящего в состав перлита, называют вторичной стадией графитизации.

Структура чугунов зависит от степени графитизации, т.е. от того, сколько углерода находится в связанном состоянии.

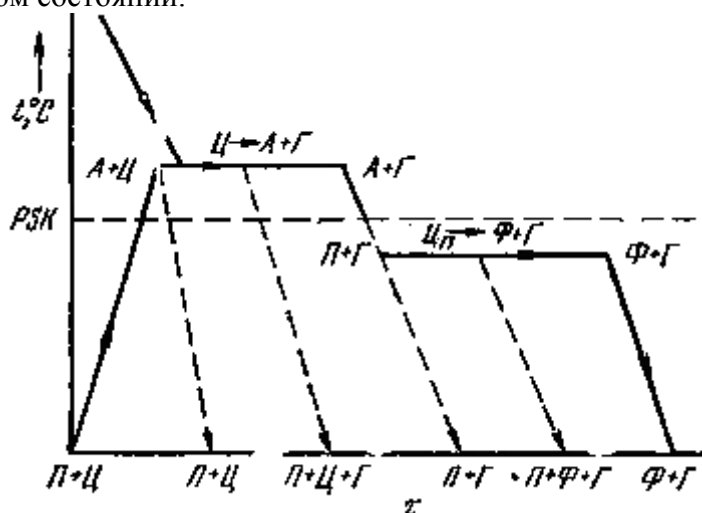


Рис. 6.3. Схема образования структур при графитизации

Выдержка при температуре больше 738°C приводит к графитизации избыточного не-растворившегося цементита. Если процесс завершить полностью, то при высокой температуре структура будет состоять из аустенита и графита, а после охлаждения — из перлита и графита. При незавершенности процесса первичной графитизации, выше температуры 738°C структура состоит из аустенита, графита и цементита, а ниже этой температуры — из перлита, графита и цементита.

При переходе через критическую точку превращения аустенита в перлит, и выдержке при температуре ниже критической приведет к распаду цементита, входящего в состав перлита (вторичная графитизация). Если процесс завершен полностью, то структура состоит из феррита и графита, при незавершенности процесса — из перлита, феррита и графита.

Из рассмотрения структур чугунов можно заключить, что их металлическая основа похожа на структуру эвтектоидной или доэвтектоидной стали или технического железа. Отличаются от стали только наличием графитовых включений, определяющих специальные свойства чугунов.

Наиболее широкое распространение получили чугуны с содержанием углерода 2,4...3,8 %. Чем выше содержание углерода, тем больше образуется графита и тем ниже его механические свойства, следовательно, количество углерода не должно превышать 3,8 %. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) углерода должно быть не менее 2,4 %.

Влияние состава чугуна на процесс графитизации.

Углерод и кремний способствуют графитизации, марганец затрудняет графитизацию и способствует отбеливанию чугуна. Сера способствует отбеливанию чугуна и ухудшает литейные свойства, ее содержание ограничено – 0,08...0,12 %. Фосфор на процесс графитизации не влияет, но улучшает жидкотекучесть, Фосфор является в чугунах полезной примесью, его содержание – 0,3...0,8 %.

Влияние графита на механические свойства отливок.

Графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты в структуре чугуна. Около таких дефектов при нагружении концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект. Отсюда следует, что графитовые включения пластинчатой формы в максимальной мере разупрочняют металл. Более благоприятна хлопьевидная форма, а оптимальной является шаровидная форма графита. Пластичность зависит от формы таким же образом. Относительное удлинение для серых чугунов составляет 0,5 %, для ковких – до 10 %, для высокопрочных – до 15%.

Наличие графита наиболее резко снижает сопротивление при жестких способах нагружения: удар, разрыв. Сопротивление сжатию снижается мало.

Графит улучшает обрабатываемость резанием, так как образуется ломкая стружка. Чугун имеет лучшие антифрикционные свойства, по сравнению со сталью, так как наличие графита обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения. Из-за микропустот, заполненных графитом, чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость. Детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточки, отверстия, переходы в сечениях). Чугун значительно дешевле стали. Производство изделий из чугуна литьем дешевле изготовления изделий из стальных заготовок обработкой резанием, а также литьем и обработкой давлением с последующей механической обработкой.

Структура серого чугуна не оказывает влияние на пластичность, она остается чрезвычайно низкой. Но оказывает влияние на твердость. Механическая прочность в основном определяется количеством, формой и размерами включений графита. Мелкие, завитой формы чешуйки графита меньше снижают прочность. Такая форма достигается путем модифицирования. В качестве модификаторов применяют алюминий, силикокальций, ферросилиций. Серый чугун широко применяется в машиностроении, так как легко обрабатывается и обладает хорошими свойствами. В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 10 марок (ГОСТ 1412). Серые чугуны при малом сопротивлении растяжению имеют достаточно высокое сопротивление сжатию. Серые чугуны содержат углерода – 3,2...3,5 %; кремния – 1,9...2,5 %; марганца – 0,5...0,8 %; фосфора – 0,1...0,3 %; серы – < 0,12 %.

Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293) могут иметь ферритную (ВЧ 35), феррито-перлитную (ВЧ45) и перлитную (ВЧ 80) металлическую основу. Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03...0,07 % от массы отливки). По сравнению с серыми чугунами, механические свойства повышаются, это вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита. Высокопрочные чугуны содержат: углерода – 3,2...3,8 %, кремния – 1,9...2,6 %, марганца – 0,6...0,8 %, фосфора – до 0,12 %, серы – до 0,3 %. Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные отливки (поршневые кольца), шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

Ковкие чугуны получают отжигом белого доэвтектического чугуна. Хорошие свойства у отливок обеспечиваются, если в процессе кристаллизации и охлаждения отливок в форме не происходит процесс графитизации. Чтобы предотвратить графитизацию, чугуны должны иметь пониженное содержание углерода и кремния. Ковкие чугуны содержат: углерода – 2,4...3,0 %, кремния – 0,8...1,4 %, марганца – 0,3...1,0 %, фосфора – до 0,2 %, серы – до 0,1 %. Формирование окончательной структуры и свойств отливок происходит в процессе отжига, схема которого представлена на рис. 6.4.

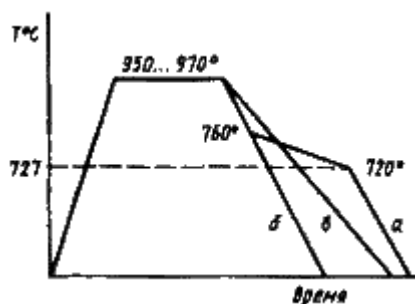


Рис. 6.4. Отжиг ковкого чугуна

Отбеленные чугуны – отливки, поверхность которых состоит из белого чугуна, а внутри серый или высокопрочный чугун. В составе чугуна 2,8...3,6 % углерода, и пониженное содержание кремния – 0,5...0,8 %. Имеют высокую поверхностную твердость (950...1000 НВ) и очень высокую износостойкость. Используются для изготовления прокатных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, шаров для шаровых мельниц.

Для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа, используются белые чугуны, легированные хромом, хромом и марганцем, хромом и никелем. Отливки из такого чугуна отличаются высокой твердостью и износостойкостью.

Для деталей, работающих в условиях износа при высоких температурах, используют высокохромистые и хромоникелевые чугуны. Жаростойкость достигается легированием чугунов кремнием (5...6 %) и алюминием (1...2 %). Коррозионная стойкость увеличивается легированием хромом, никелем, кремнием.

Для чугунов можно применять термическую обработку.

Л.6.2. Машиностроительные стали и сплавы (самостоятельное изучение)

Машиностроительные стали предназначены для изготовления различных деталей машин и механизмов.

Углеродистые стали. Низкоуглеродистые стали 05 кп, 08, 10, 10 пс обладают малой прочностью высокой пластичностью. Применяются без термической обработки для изготовления малонагруженных деталей – шайб, прокладок и т.п.

Среднеуглеродистые стали 35, 40, 45 применяются после нормализации, термического улучшения, поверхностной закали.

Высокоуглеродистые стали 60, 65, 70, 75 используются как рессорно-пружинные после среднего отпуска. В нормализованном состоянии – для прокатных валков, шпинделей станков.

Цементуемые стали. Используются для изготовления деталей, работающих на износ и подвергающихся действию переменных и ударных нагрузок. Детали должны сочетать высокую поверхностную прочность и твердость, а также достаточную вязкость сердцевин. Цементации подвергаются низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,25%, что

позволяет получить вязкую сердцевину. Для деталей, работающих с большими нагрузками, применяются стали с повышенным содержанием углерода (до 0,35 %). С повышением содержания углерода прочность сердцевины увеличивается, а вязкость снижается. Детали подвергаются цианированию и нитроцементации. Цементуемые углеродистые стали 15, 20, 25 используются для изготовления деталей небольшого размера, работающих в условиях изнашивания при малых нагрузках (втулки, валики, оси, шпильки и др.). Твердость на поверхности составляет 60...64 HRC, сердцевина остается мягкой.

Цементуемые легированные стали применяют для более крупных и тяжело нагруженных деталей, в которых необходимо иметь, кроме высокой твердости поверхности, достаточно прочную сердцевину (кулачковые муфты, поршни, пальцы, втулки). Хромистые стали 15X, 20X используются для изготовления небольших изделий простой формы, цементуемых на глубину $h = 1 \dots 1,5$ мм. При закалке с охлаждением в масле, выполняемой после цементации, сердцевина имеет бейнитное строение. Вследствие этого хромистые стали обладают более высокими прочностными свойствами при несколько меньшей пластичности в сердцевине и большей прочностью в цементованном слое. Дополнительное легирование хромистых сталей ванадием (сталь 15XF), способствует получению более мелкого зерна, что улучшает пластичность и вязкость. Никель увеличивает глубину цементованного слоя, препятствует росту зерна и образованию грубой цементитной сетки, оказывает положительное влияние на свойства сердцевины. Хромоникелевые стали 20XH, 12XH3A применяют для изготовления деталей средних и больших размеров, работающих на износ при больших нагрузках (зубчатые колеса, шлицевые валы). Одновременное легирование хромом и никелем, который растворяется в феррите, увеличивает прочность, пластичность и вязкость сердцевины и цементованного слоя. Стали мало чувствительны к перегреву. Большая устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращений обеспечивает высокую прокаливаемость хромоникелевых сталей и позволяет проводить закалку крупных деталей с охлаждением в масле и на воздухе. Стали, дополнительно легированные вольфрамом или молибденом (18X2H4BA, 18X2H4MA), применяют для изготовления крупных тяжело нагруженных деталей. Эти стали являются лучшими конструкционными сталями, но дефицитность никеля ограничивает их применение. Хромомарганцевые стали применяют вместо дорогих хромоникелевых, однако эти стали менее устойчивы к перегреву и имеют меньшую вязкость. Введение небольшого количества титана (0,06...0,12 %) уменьшает склонность стали к перегреву (стали 18XГТ, 30XГТ).

Улучшаемые стали. Стали, подвергаемые термическому улучшению, широко применяют для изготовления различных деталей, работающих в сложных напряженных условиях (при действии разнообразных нагрузок, в том числе переменных и динамических). Стали приобретают структуру сорбита, хорошо воспринимающую ударные нагрузки. Важное значение имеет сопротивление хрупкому разрушению. Улучшению подвергаются среднеуглеродистые стали с содержанием углерода 0,30...0,50 %. Улучшаемые углеродистые стали 35, 40, 45 дешевы, из них изготавливают детали, испытывающие небольшие напряжения (сталь 35), и детали, требующие повышенной прочности (стали 40, 45). Но термическое улучшение этих сталей обеспечивает высокий комплекс механических свойств только в деталях небольшого сечения, так как стали обладают низкой прокаливаемостью. Стали этой группы можно использовать и в нормализованном состоянии. Детали, требующие высокой поверхностной твердости при вязкой сердцевине (зубчатые колеса, валы, оси, втулки), подвергаются поверхностной закалке токами высокой частоты. Для снятия напряжений проводят низкий отпуск.

Улучшаемые легированные стали применяют для более крупных и более нагруженных ответственных деталей. Стали обладают лучшим комплексом механических свойств: выше прочность при сохранении достаточной вязкости и пластичности, ниже порог хладноломкости. Хромистые стали 30X, 40X, 50X используются для изготовления небольших средненагруженных деталей. Эти стали склонны к отпускной хрупкости, поэтому после высокого отпуска охлаждение должно быть быстрым. Повышение прокаливаемости достигается микролегированием бором (35XP). Введение в сталь ванадия значительно увеличивает вязкость

(40ХФА). Хромокремнистые (33ХС) и хромокремниймарганцевые (хромансил) (25ХГСА) стали обладают высокой прочностью и умеренной вязкостью. Стали – хромансилы обладают высокой свариваемостью, из них изготавливают стыковочные сварные узлы, кронштейны, крепежные и другие детали. Широко применяются в автомобилестроении и авиации. Хромо-никелевые стали 45ХН, 30ХН3А отличаются хорошей прокаливаемостью, прочностью и вязкостью, но чувствительны к обратимой отпускной хрупкости. Для уменьшения чувствительности вводят молибден или вольфрам. Ванадий способствует измельчению зерна. Стали 36Х2Н2МФА, 38ХН3ВА др. обладают лучшими свойствами, относятся к мартенситному классу, слабо разупрочняются при нагреве до 300...400 °С. из них изготавливаются валы и роторы турбин, тяжело нагруженные детали редукторов и компрессоров.

Высокопрочные стали. Высокопрочными называют стали, имеющие предел прочности более 1500 МПа, который достигается подбором химического состава и оптимальной термической обработки. Такой уровень прочности можно получить в среднеуглеродистых легированных сталях, (30ХГСН2А, 40ХН2МА), применяя закалку с низким отпуском (при температуре 200...250 °С) или изотермическую закалку с получением структуры нижнего бейнита. После изотермической закалки среднеуглеродистые легированные стали имеют несколько меньшую прочность, но большую пластичность и вязкость. Поэтому они более надежны в работе, чем закаленные и низкоотпущенные. При высоком уровне прочности закаленные и низкоотпущенные среднеуглеродистые стали обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжения, склонностью к хрупкому разрушению, поэтому их рекомендуется использовать для работы в условиях плавного нагружения. Легирование вольфрамом, молибденом, ванадием затрудняет разупрочняющие процессы при температуре 200...300 °С, способствует получению мелкого зерна, понижает порог хладноломкости, повышает сопротивление хрупкому разрушению. Высокая прочность может быть получена и за счет термомеханической обработки. Стали 30ХГСА, 38ХН3МА после низкотемпературной термомеханической обработки имеют предел прочности 2800 МПа, относительное удлинение и ударная вязкость увеличиваются в два раза по сравнению с обычной термической обработкой. Это связано с тем, что частичное выделение углерода из аустенита при деформации облегчает подвижность дислокаций внутри кристаллов мартенсита, что способствует увеличению пластичности.

Мартенситно-стареющие стали (03Н18К9М5Т, 04Х11Н9М2Д2ТЮ) превосходят по конструкционной прочности и технологичности среднеуглеродистые легированные стали. Они обладают малой чувствительностью к надрезам, высоким сопротивлением хрупкому разрушению и низким порогом хладноломкости при прочности около 2000 МПа. Мартенситно-стареющие стали представляют собой безуглеродистые сплавы железа с никелем (8...25 %), дополнительно легированные кобальтом, молибденом, титаном, алюминием, хромом и другими элементами. Благодаря высокому содержанию никеля, кобальта и малой концентрации углерода в результате закалки в воде или на воздухе фиксируется высокопластичный, но низкопрочный железоникелевый мартенсит, пересыщенный легирующими элементами. Основное упрочнение происходит в процессе старения при температуре 450...550 °С за счет выделения из мартенситной матрицы когерентно с ней связанных мелкодисперсных фаз. Мартенситно-стареющие стали обладают высокой конструкционной прочностью в интервале температур от криогенных до 500 °С и рекомендуются для изготовления корпусов ракетных двигателей, стволов артиллерийского и стрелкового оружия, корпусов подводных лодок, батискафов, высоконагруженных дисков турбомашин, зубчатых колес, шпинделей, червяков и т.д.

Пружинные стали. Пружины, рессоры и другие упругие элементы являются важнейшими деталями различных машин и механизмов. В работе они испытывают многократные переменные нагрузки. Под действием нагрузки пружины и рессоры упруго деформируются, а после прекращения действия нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму и размеры. Особенностью работы является то, что при значительных статических и ударных нагрузках они должны испытывать только упругую деформацию, остаточная деформация не допускается. Основные требования к пружинным сталям – обеспечение высоких значений

пределов упругости, текучести, выносливости, а также необходимой пластичности и сопротивления хрупкому разрушению, стойкости к релаксации напряжений. Пружины изготавливаются из углеродистых (65, 70) и легированных (60С2, 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР) конструкционных сталей. Для упрочнения пружинных углеродистых сталей применяют холодную пластическую деформацию посредством дробеструйной и гидроабразивной обработок, в процессе которых в поверхностном слое деталей наводятся остаточные напряжения сжатия. Повышенные значения предела упругости получают после закалки со средним отпуском при температуре 400...480 °С. Для сталей, используемых для пружин, необходимо обеспечить сквозную прокаливаемость, чтобы получить структуру троостита по всему сечению. Упругие и прочностные свойства пружинных сталей достигаются при изотермической закалке. Пружинные стали легируют элементами, которые повышают предел упругости – кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом, ванадием, бором. Пружины и другие элементы специального назначения изготавливают из высокохромистых мартенситных (30Х13), мартенситно-старееющих (03Х12Н10Д2Т), аустенитных нержавеющей (12Х18Н10Т), аустенитно-мартенситных (09Х15Н8Ю), быстрорежущих (Р18) и других сталей и сплавов.

Шарикоподшипниковые стали. Подвергаются воздействию высоких нагрузок переменного характера. Основными требованиями являются высокая прочность и износостойкость, высокий предел выносливости, отсутствие концентраторов напряжений, неметаллических включений, полостей, ликваций. Шарикоподшипниковые стали характеризуются высоким содержанием углерода (около 1 %) и наличием хрома (ШХ9, ШХ15). Высокое содержание углерода и хрома после закалки обеспечивает структуру мартенсит плюс карбиды, высокой твердости, износостойкости, необходимой прокаливаемости. Дальнейшее увеличение прокаливаемости достигается дополнительным легированием марганцем, кремнием (ШХ15СГ). Термическая обработка включает отжиг, закалку и отпуск. Отжиг проводят послековки для снижения твердости и подготовки структуры к закалке. Температура закалки составляет 790...880 °С в зависимости от массивности деталей. Охлаждение – в масле (кольца, ролики), в водном растворе соды или соли (шарики). Отпуск стали проводят при температуре 150...170 °С в течение 1...2 часов. Обеспечивается твердость 62...66 HRC. Детали подшипников качения, испытывающие большие динамические нагрузки (подшипники прокатных станов), изготавливают из сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ с последующей глубокой цементацией на глубину 5...10 мм. Для деталей подшипников, работающих в азотной кислоте и других агрессивных средах, используется сталь 95Х18.

Стали для изделий, работающих при низких температурах. Для изделий, работающих при низких температурах, необходимо применять стали с пониженным порогом хладноломкости. Особенно сильно понижены температурные пороги хладноломкости в никельсодержащих сталях. Эффективными материалами являются низколегированные малоуглеродистые стали, которые обладают хорошей свариваемостью. В строительных металлоконструкциях наибольший эффект достигается при использовании термомеханически упрочненного проката. Для обеспечения высокого комплекса механических свойств деталей машин используются малоуглеродистые стали, легированные элементами, способствующими дисперсионному упрочнению и образованию мелкозернистой структуры после термической обработки 10ХСНД, 15Г2СФ, 12ГН2МФАЮ. Для работы при сверх низких температурах применяют криогенные стали и сплавы для изготовления емкостей для хранения и перевозки сжиженных газов, имеющих очень низкую температуру кипения (кислород – –183 °С, водород – –253 °С). Основными материалами для работы в подобных условиях являются аустенитные стали с повышенным содержанием никеля 10Х14Г14Н4Т, 10Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6.

Износостойкие стали. Для работы в условиях изнашивания, сопровождаемого большими удельными нагрузками, используется высокомарганцевая сталь 110Г13Л, имеющая в своем составе 1...1,4 % углерода, 12...14 % марганца. Сталь имеет аустенитную структуру и относительно низкую твердость (200...250 НВ). В процессе работы, когда на деталь действуют высокие нагрузки, которые вызывают в материале напряжения, превосходящие предел текучести, происходит интенсивное наклепывание стали и рост ее твердости и износостойкости. При этом сталь сохраняет высокую вязкость. Благодаря этим свойствам сталь широко ис-

пользуется для изготовления корпусов шаровых мельниц, щек камнедробилок, крестовин рельсов, гусеничных траков, козырьков землечерпалок и т.д. Склонность к интенсивному наклепу является характерной особенностью сталей аустенитного класса.

Автоматные стали. Автоматными называют стали, обладающие повышенной обрабатываемостью резанием. Эффективным металлургическим приемом повышения обрабатываемости резанием является введение в сталь серы, селена, теллура, кальция, которые изменяют состав неметаллических включений, а также свинца, который образует собственные включения. Автоматные стали А12, А20 с повышенным содержанием серы и фосфора используются для изготовления малонагруженных деталей на станках автоматах (болты, винты, гайки, мелкие детали швейных, текстильных, счетных и других машин). Эти стали обладают улучшенной обрабатываемостью резанием, поверхность деталей получается чистой и ровной. Износостойкость может быть повышена цементацией и закалкой. Стали А30 и А40Г предназначены для деталей, испытывающих более высокие нагрузки. У автоматных сталей, содержащих свинец, (АС11, АС40), повышается стойкость инструмента в 1...3 раза и скорость резания на 25...50 %. Легированные хромистые и хромоникелевые стали с присадкой свинца и кальция (АЦ45Г2, АСЦ30ХМ, АС20ХГНМ) используются для изготовления нагруженных деталей в автомобильной и тракторной промышленности. Автоматные стали подвергают диффузионному отжигу при температуре 1100...1150 °С, для устранения ликвации серы.

Стали для режущего инструмента. Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью (для инструментов ударного действия). Режущие кромки могут нагреваться до температуры 500...900 °С, поэтому важным свойством является теплостойкость, т. е. способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве (красностойкость).

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435). Содержат 0,65...1,35 % углерода. Стали У7...У13А – обладают высокой твердостью, хорошо шлифуются, дешевы и недефицитны. Из сталей марок У7, У8А изготавливают инструмент для работы по дереву и инструмент ударного действия, когда требуется повышенная вязкость – пуансоны, зубила, штампы, молотки. Стали марок У9...У12 обладают более высокой твердостью и износостойкостью – используются для изготовления сверл, метчиков, фрез. Сталь У13 обладает максимальной твердостью, используется для изготовления напильников, граверного инструмента. Для снижения твердости и создания благоприятной структуры, все инструментальные стали до изготовления инструмента подвергают отжигу. Для заэвтектоидных сталей проводят сфероидизирующий отжиг, в результате которого цементит вторичный приобретает зернистую форму. Регулируя скорость охлаждения можно получить любой размер зерен. Окончательная термическая обработка – закалка с последующим отпуском. Закалку для доэвтектоидных сталей проводят полную, а для заэвтектоидных – неполную. Структура закаленных сталей или мартенсит, или мартенсит и карбиды. Температура отпуска выбирается в зависимости от твердости, необходимой для инструмента. Для инструментов ударного действия, требующих повышенной вязкости, из сталей У7, У8 отпуск проводят при температуре 280...300 °С, что обеспечивает твердость HRC 56...58. Для напильников, метчиков, плашек отпуск проводят при температуре 150...200 °С, при этом обеспечивается получение максимальной твердости – HRC 62...64. Основными недостатками углеродистых инструментальных сталей является их невысокая прокаливаемость (5...10 мм), низкая теплостойкость (до 200 °С), то есть инструменты могут работать только при невысоких скоростях резания.

Легированные инструментальные стали. Содержат 0,9...1,4 % углерода. В качестве легирующих элементов содержат хром, вольфрам, ванадий, марганец, кремний и другие. Общее содержание легирующих элементов до 5%. Высокая твердость и износостойкость в основном определяются высоким содержанием углерода. Легирование используется для повышения закаливаемости и прокаливаемости, сохранения мелкого зерна, повышения прочности и вязкости. Термическая обработка включает закалку и отпуск. Проводят закалку с температуры 800...850 °С в масло или ступенчатую закалку, что уменьшает возможность коробления и образования закалочных трещин. Отпуск проводят низкотемпературный, при температуре 150...200 °С, что обеспечивает твердость HRC 61...66. Иногда, для увеличения

вязкости, температуру отпуска увеличивают до 300 °С, но при этом наблюдается снижение твердости HRC 55...60. Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 6ХС и 9ХФ рекомендуется изотермическая закалка, значительно улучшающая вязкость. Повышенное содержание кремния (сталь 9ХС) способствует увеличению прокаливаемости до 40 мм и повышению устойчивости мартенсита при отпуске. Недостатками сталей, содержащих кремний, являются чувствительность их к обезуглероживанию при термообработке, плохая обрабатываемость резанием и деформированием из-за упрочнения феррита кремнием. Повышенное содержание марганца (стали ХВГ, 9ХВСГ) способствует увеличению количества остаточного аустенита, что уменьшает деформацию инструмента при закалке. Это особенно важно для инструмента, имеющего большую длину при малом диаметре, например, протяжек. Хром увеличивает прокаливаемость и твердость после закалки. Стали используются для изготовления инструмента и ударного, и режущего. «Алмазная» сталь ХВ5 содержит 5% вольфрама. Благодаря присутствию вольфрама, в термически обработанном состоянии имеет избыточную мелкодисперсную карбидную фазу. Твердость составляет HRC 65...67. Сталь используется для изготовления инструмента, сохраняющего длительное время острую режущую кромку и высокую размерную точность (развертки, фасонные резцы, граверный инструмент).

Быстрорежущие стали. Стали получили свое название за свойства. Вследствии высокой теплостойкости (550...650 °С), изготовленные из них инструменты могут работать с достаточно высокими скоростями резания. Стали содержат 0,7...1,5 % углерода, до 18 % основного легирующего элемента – вольфрама, до 5 % хрома и молибдена, до 10 % кобальта. Добавление ванадия повышает износостойкость инструмента, но ухудшает шлифуемость. Кобальт повышает теплостойкость до 650 °С и вторичную твердость HRC 67...70. Микроструктура быстрорежущей стали в литом состоянии имеет эвтектическую структурную составляющую. Для получения оптимальных свойств инструментов из быстрорежущей стали необходимо по возможности устранить структурную неоднородность стали – карбидную ликвацию. Для этого слитки из быстрорежущей стали подвергаются интенсивной пластической деформации (ковке). При этом происходит дробление карбидов эвтектики и достигается более однородное распределение карбидов по сечению заготовки. Затем проводят отжиг стали при температуре 860...900 °С. Структура отожженной быстрорежущей стали – мелкозернистый (сорбитообразный) перлит и карбиды, мелкие эвтектоидные и более крупные первичные. Количество карбидов около 25 %. Сталь с такой структурой хорошо обрабатывается резанием. Подавляющее количество легирующих элементов находятся в карбидной фазе. Для получения оптимальных свойств стали в готовом инструменте необходимо при термической обработке обеспечить максимальное насыщение мартенсита легирующими элементами. При закалке быстрорежущие стали требуют нагрева до очень высоких температур, около 1280 °С. Нагрев осуществляют в хорошо раскисленных соляных ваннах BaCl_2 , что улучшает равномерность прогрева и снижает возможность обезуглероживания поверхности. Для снижения термических фазовых напряжений нагрев осуществляют ступенчато: замедляют нагрев при температурах 600...650 °С и при 850...900 °С. Охлаждение от закалочной температуры производится в масле. Структура стали после закалки состоит из легированного, очень тонкодисперсного мартенсита, значительного количества (30...40 %) остаточного аустенита и карбидов вольфрама. Твердость составляет 60...62 HRC. Наличие аустенита остаточного в структуре закаленной стали ухудшает режущие свойства. Для максимального удаления аустенита остаточного проводят трехкратный отпуск при температуре 560 °С. При нагреве под отпуск выше 400 °С наблюдается увеличение твердости. Это объясняется тем, что из легированного остаточного аустенита выделяются легированные карбиды. Аустенит при охлаждении от температуры отпуска превращается в мартенсит отпуска, что вызывает прирост твердости. Увеличению твердости содействуют и выделившиеся при температуре отпуска мелкодисперсные карбиды легирующих элементов. Максимальная твердость достигается при температуре отпуска 560 °С. После однократного отпуска количество аустенита остаточного снижается до 10%. Чтобы уменьшить его количество до минимума, необходим трехкратный отпуск. Твердость стали после отпуска составляет 64...65 HRC. Структура стали

после термообработки состоит из мартенсита отпуска и карбидов. При термической обработке быстрорежущих сталей применяют обработку холодом. После закалки сталь охлаждают до температуры $-80...-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, после этого проводят однократный отпуск при температуре $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ для снятия напряжений. Иногда для повышения износостойкости быстрорежущих сталей применяют низкотемпературное цианирование. Основными видами режущих инструментов из быстрорежущей стали являются резцы, сверла, долбяки, протяжки, метчики машинные, ножи для резки бумаги. Часто из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента.

Стали для измерительных инструментов. Основными требованиями, предъявляемыми к сталям, из которых изготавливаются измерительные инструменты, являются высокая твердость и изнosoустойчивость, стабильность в размерах в течение длительного времени. Последнее требование обеспечивается минимальным температурным коэффициентом линейного расширения и сведением к минимуму структурных превращений во времени. Для изготовления измерительных инструментов применяются:

- высокоуглеродистые инструментальные стали, легированные и углеродистые (стали У12, Х, Х9, ХГ), после закалки и стабилизирующего низкотемпературного ($120...170\text{ }^{\circ}\text{C}$) отпуска в течение $10...30\text{ ч}$. До отпуска желательно провести обработку холодом. Получают твердость $62...67\text{ HRC}$;
- малоуглеродистые стали (сталь 15, 20) после цементации и закалки с низким отпуском;
- нитралои (сталь 38ХМЮА) после азотирования на высокую твердость.

Штамповые стали. Инструмент, применяемый для обработки металлов давлением (штампы, пуансоны, матрицы) изготавливают из штамповых сталей. Различают стали для штампов холодного и горячего деформирования.

Стали для штампов холодного деформирования. Стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, вязкостью (чтобы воспринимать ударные нагрузки), сопротивлением пластическим деформациям. Для штампов небольших размеров (до 25 мм) используют углеродистые инструментальные стали У10, У11, У12 после закалки и низкого отпуска на твердость $57...59\text{ HRC}$. Это позволяет получить хорошую износостойкость и ударную вязкость. Для более крупных изделий применяют легированные стали Х, Х9, Х6ВФ. Для повышения износостойкости инструмента после термической обработки проводят цианирование или хромирование рабочих поверхностей. Для уменьшения брака при закалке необходимо медленное охлаждение в области температур мартенситного превращения (например, закалка из воды в масло для углеродистых сталей, ступенчатая закалка для легированных сталей). Если штамповый инструмент испытывает ударные нагрузки, то используют стали, обладающие большей вязкостью (стали 4ХС4, 5ХНМ). Это достигается снижением содержания углерода, введением легирующих элементов и соответствующей термической обработкой. После закалки проводят высокий отпуск при температуре $480...580\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает твердость $38...45\text{ HRC}$.

Стали для штампов горячего деформирования. Дополнительно к общим требованиям, от сталей этой группы требуется устойчивость против образования трещин при многократном нагреве и охлаждении, окалиностойкость, высокая теплопроводность для отвода теплоты от рабочих поверхностей штампа, высокая прокаливаемость для обеспечения высокой прочности по всему сечению инструмента. Для изготовления молотовых штампов применяют хромоникелевые среднеуглеродистые стали 5ХНМ, 5ХНВ, 4ХСМФ. Вольфрам и молибден добавляют для снижения склонности к отпускной хрупкости. После термической обработки, включающей закалку с температуры $760...820\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отпуск при $460...540\text{ }^{\circ}\text{C}$, сталь имеет структуру – сорбит или троостит и сорбит отпуска. Твердость $40...45\text{ HRC}$. Штампы горячего прессования работают в более тяжелых условиях. Для их изготовления применяют стали повышенной теплостойкости. Сталь 3Х2В8Ф сохраняет теплостойкость до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, но наличие карбидов вольфрама снижает вязкость. Сталь 4Х5В2ФС имеет высокую вязкость. Повышенное содержание хрома и кремния значительно увеличивает окалиностойкость стали.

Твердые сплавы. В качестве материалов для инструментов используются твердые спла-

вы, которые состоят из твердых карбидов и связующей фазы. Они изготавливаются методами порошковой металлургии. Характерной особенностью твердых сплавов является очень высокая твердость 87...92 HRC при достаточно высокой прочности. Твердость и прочность зависят от количества связующей фазы (кобальта) и величины зерен карбидов. Чем крупнее зерна карбидов, тем выше прочность. Твердые сплавы отличаются большой износостойкостью и теплостойкостью. Основными твердыми сплавами являются группы ВК (WC + Co), ТК (WC + TiC + Co), ТТК (WC + TiC + TaC + Co). Наиболее распространенными сплавами группы ВК являются сплавы марок ВК3, ВК6, ВК8, ВК20, где число показывает содержание кобальта в процентах, остальное – карбиды вольфрама WC. Сплавы группы ТК марок Т30К6, Т14К8 – первое число показывает содержание карбидов титана в процентах, второе – содержание кобальта в процентах. Сплавы этой группы лучше противостоят изнашиванию, обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью. Используются на средних и высоких скоростях резания. Сплавы с малым количеством кобальта обладают повышенной твердостью и износостойкостью, но минимальной прочностью, Поэтому их используют для чистового точения (ВК3, Т30К4). Сплавы с повышенным содержанием кобальта используют для чернового точения (ВК8, Т14К8). Сплав ВК20 начинают использовать для армирования штампов, что повышает их износостойкость. Износостойкость инструментов из твердых сплавов превышает износостойкость инструментов из быстрорежущих сталей в 10...20 раз и сохраняется до температур 800...1000 °С.

Коррозионно-стойкие стали и сплавы.

Хромистые стали. Содержание хрома должно быть не менее 13% (13...18%). Коррозионная стойкость объясняется образованием на поверхности защитной пленки оксида хрома. Углерод в нержавеющей сталях является нежелательным, так как он обедняет раствор хромом, связывая его в карбиды, и способствует получению двухфазного состояния. Чем ниже содержание углерода, тем выше коррозионная стойкость нержавеющей сталей.

Различают стали ферритного класса 08Х13, 12Х17, 08Х25Т, 15Х28. Стали с повышенным содержанием хрома не имеют фазовых превращений в твердом состоянии и поэтому не могут быть подвергнуты закалке. Значительным недостатком ферритных хромистых сталей является повышенная хрупкость из-за крупнокристаллической структуры. Эти стали склонны к межкристаллитной коррозии (по границам зерен) из-за обеднения хромом границ зерен. Для избежания этого вводят небольшое количество титана. Межкристаллитная коррозия обусловлена тем, что часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом и образует карбиды. Концентрация хрома в твердом растворе у границ становится меньше 13 % и сталь приобретает отрицательный потенциал. Из-за склонности к росту зерна ферритные стали требуют строгих режимов сварки и интенсивного охлаждения зоны сварного шва. Недостатком является и склонность к охрупчиванию при нагреве в интервале температур 450...500 °С. Из ферритных сталей изготавливают оборудование азотно-кислотных заводов (емкости, трубы). Для повышения механических свойств ферритных хромистых сталей в них добавляют 2...3 % никеля. Стали 10Х13Н3, 12Х17Н2 используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах. После закалки от температуры 1000 °С и отпуска при 700...750 °С предел текучести сталей составляет 1000 МПа. Термическую обработку для ферритных сталей проводят для получения структуры более однородного твердого раствора, что увеличивает коррозионную стойкость. Стали мартенситного класса 20Х13, 30Х13, 40Х13. После закалки и отпуска при 180...250 °С стали 30Х13, 40Х13 имеют твердость 50...60 HRC и используются для изготовления режущего инструмента (хирургического), пружин для работы при температуре 400...450 °С, предметов домашнего обихода.

Стали аустенитного класса – высоколегированные хромоникелевые стали. Никель – аустенитообразующий элемент, сильно понижающий критические точки $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. После охлаждения на воздухе до комнатной температуры имеет структуру аустенита. Нержавеющие стали аустенитного класса 04Х18Н10, 12Х18Н9Т имеют более высокую коррозионную стойкость, лучшие технологические свойства по сравнению с хромистыми нержа-

веющими сталями, лучше свариваются. Они сохраняют прочность до более высоких температур, менее склонны к росту зерна при нагреве и не теряют пластичности при низких температурах. Хромоникелевые стали коррозионно-стойки в окислительных средах. Основным элементом является хром, никель только повышает коррозионную стойкость. Для большей гомогенности хромоникелевые стали подвергают закалке с температуры 1050...1100 °С в воде. При нагреве происходит растворение карбидов хрома в аустените. Выделение их из аустенита при закалке исключено, так как скорость охлаждения велика. Упрочняют аустенитные стали холодной пластической деформацией, что вызывает эффект наклепа. Предел текучести при этом может достигнуть значений 1000...1200 МПа, а предел прочности – 1200...1400 МПа. Для уменьшения дефицитного никеля часть его заменяют марганцем (сталь 40Х14Г14НЗТ) или азотом (сталь 10Х20Н4АГ11).

Аустенитно-ферритные стали 12Х21Н5Т, 08Х22Н6Т являются заменителями хромоникелевых сталей с целью экономии никеля. Свойства сталей зависят от соотношения ферритной и аустенитной фаз (оптимальные свойства получают при соотношении – (Ф:А=1:1). Термическая обработка сталей включает закалку от температуры 1100...1150 °С и отпуск-старение при температуре 500...750 °С. Аустенитно-ферритные стали не подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением: трещины могут возникать только на аустенитных участках, но ферритные участки задерживают их развитие. При комнатных температурах аустенитно-ферритные стали имеют твердость и прочность выше, а пластичность и ударную вязкость ниже, чем стали аустенитного класса.

Кроме нержавеющей сталей в промышленности применяют коррозионно-стойкие сплавы – это сплавы на никелевой основе. Сплавы типа хастеллой содержат до 80 % никеля, другим элементом является молибден в количестве до 15...30 %. Сплавы являются коррозионно-стойкими в особо агрессивных средах (кипящая фосфорная или соляная кислота), обладают высокими механическими свойствами. После термической обработки – закалки и старения при температуре 800 °С – сплавы имеют предел прочности 1200 МПа и твердость НВ 360. Недостатком является склонность к межкристаллической коррозии, поэтому содержание углерода в этих сплавах должно быть минимальным.

Жаростойкие стали и сплавы. Для повышения жаростойкости в состав стали вводят элементы, которые образуют с кислородом оксиды с плотным строением кристаллической решетки (хром, кремний, алюминий). Степень легированности стали, для предотвращения окисления, зависит от температуры. Чем выше содержание хрома, тем более окалиностойки стали (например, сталь 15Х25Т является окалиностойкой до температуры 1100...1150 °С). Высокой жаростойкостью обладают силхромы, сплавы на основе никеля – нихромы, стали 08Х17Т, 36Х18Н25С2, 15Х6СЮ.

Жаропрочные стали и сплавы. В качестве современных жаропрочных материалов можно отметить перлитные, мартенситные и аустенитные жаропрочные стали, никелевые и кобальтовые жаропрочные сплавы, тугоплавкие металлы. При температурах до 300 °С обычные конструкционные стали имеют высокую прочность, нет необходимости использовать высоколегированные стали. Для работы в интервале температур 350...500 °С применяют легированные стали перлитного, ферритного и мартенситного классов.

Перлитные жаропрочные стали. К этой группе относятся котельные стали и силхромы. Эти стали применяются для изготовления деталей котельных агрегатов, паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания. Стали содержат относительно мало углерода. Легирование сталей хромом, молибденом и ванадием производится для повышения температуры рекристаллизации (марки 12Х1МФ, 20Х3МФ). Используются в закаленном и высокоотпущенном состоянии. Иногда закалку заменяют нормализацией. В результате этого образуются пластинчатые продукты превращения аустенита, которые обеспечивают более высокую жаропрочность. Предел ползучести этих сталей должен обеспечить остаточную деформацию в пределах 1 % за время 10000...100000 ч работы. Перлитные стали обладают удовлетворительной свариваемостью, поэтому используются для сварных конструкций (например, трубы пароперегревателей). Для деталей газовых турбин применяют сложнолегированные стали мартенситного класса 12Х2МФСР, 12Х2МФБ, 15Х12ВНМФ. Увеличение содержания хрома

повышает жаростойкость сталей. Хром, вольфрам, молибден и ванадий повышают температуру рекристаллизации, образуются карбиды, повышающие прочность после термической обработки. Термическая обработка состоит из закалки от температур выше 1000°C в масле или на воздухе и высокого отпуска при температурах выше температуры эксплуатации. Для изготовления жаропрочных деталей, не требующих сварки (клапаны двигателей внутреннего сгорания), применяются хромокремнистые стали – силхромы: 40X10C2M, 40X9C2, X6C. Жаропрочные свойства растут с увеличением степени легированности. Силхромы подвергаются закалке от температуры около 1000°C и отпуску при температуре $720\ldots 780^{\circ}\text{C}$.

При рабочих температурах $500\ldots 700^{\circ}\text{C}$ применяются стали аустенитного класса. Из этих сталей изготавливают клапаны двигателей, лопатки газовых турбин, сопловые аппараты реактивных двигателей и т.д. Основными жаропрочными аустенитными сталями являются хромоникелевые стали, дополнительно легированные вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Стали содержат $15\ldots 20\%$ хрома и $10\ldots 20\%$ никеля. Обладают жаропрочностью и жаростойкостью, пластичны, хорошо свариваются, но затруднена обработка резанием и давлением, охрупчиваются в интервале температур около 600°C , из-за выделения по границам различных фаз. По структуре стали подразделяются на две группы:

1. Аустенитные стали с гомогенной структурой 17X18H9, 09X14H19B2BP1, 12X18H12T. Содержание углерода в этих сталях минимальное. Для создания большей однородности аустенита стали подвергаются закалке с $1050\ldots 1100^{\circ}\text{C}$ в воде, затем для стабилизации структуры – отпуску при 750°C .

2. Аустенитные стали с гетерогенной структурой 37X12H8Г8МФБ, 10X11H20ТЗР. Термическая обработка сталей включает закалку с $1050\ldots 1100^{\circ}\text{C}$. После закалки старение при температуре выше эксплуатационной ($600\ldots 750^{\circ}\text{C}$). В процессе выдержки при этих температурах в дисперсном виде выделяются карбиды, карбонитриды, вследствие чего прочность стали повышается.

Детали, работающие при температурах $700\ldots 900^{\circ}\text{C}$, изготавливают из сплавов на основе никеля и кобальта (например, турбины реактивных двигателей). Никелевые сплавы преимущественно применяют в деформированном виде. Они содержат более 55% никеля и минимальное количество углерода ($0,06\ldots 0,12\%$). По жаропрочным свойствам превосходят лучшие жаропрочные стали. По структуре никелевые сплавы разделяют на гомогенные (нихромы) и гетерогенные (нимоники).

Нихромы. Основой этих сплавов является никель, а основным легирующим элементом – хром (ХН60Ю, ХН78Т). Нихромы не обладают высокой жаропрочностью, но они очень жаростойки. Их применяют для малонагруженных деталей, работающих в окислительных средах, в том числе и для нагревательных элементов.

Нимоники являются четвертными сплавами никель – хром (около 20%) – титан (около 2%) – алюминий (около 1%) (ХН77ТЮ, ХН70МВТЮБ, ХН55ВМТФКЮ). Используются только в термически обработанном состоянии. Термическая обработка состоит из закалки с $1050\ldots 1150^{\circ}\text{C}$ на воздухе и отпуска – старения при $600\ldots 800^{\circ}\text{C}$. Увеличение жаропрочности сложнолегированных никелевых сплавов достигается упрочнением твердого раствора введением кобальта, молибдена, вольфрама.

Основными материалами, которые могут работать при температурах выше 900°C (до 2500°C), являются сплавы на основе тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена, ниобия и других. Температуры плавления основных тугоплавких металлов: вольфрам – 3400°C , тантал – 3000°C , молибден – 2640°C , ниобий – 2415°C , хром – 1900°C . Высокая жаропрочность таких металлов обусловлена большими силами межатомных связей в кристаллической решетке и высокими температурами рекристаллизации. Наиболее часто применяют сплавы на основе молибдена. В качестве легирующих добавок в сплавы вводят титан, цирконий, ниобий. С целью защиты от окисления проводят силицирование, на поверхности сплавов образуется слой MoSi_2 толщиной $0,03\ldots 0,04$ мм. При температуре 1700°C силицированные детали могут работать 30 часов. Вольфрам – наиболее тугоплавкий металл. Его используют в качестве легирующего элемента в сталях и сплавах различного назначения, в электротехнике и электронике (нити накала, нагреватели в вакуумных приборах). В качестве легирующих эле-

ментов к вольфраму добавляют молибден, рений, тантал. Сплавы вольфрама с рением сохраняют пластичность до -196°C и имеют предел прочности 150 МПа при температуре 1800°C . Для сплавов на основе вольфрама характерна низкая жаростойкость, пленки образующихся оксидов превышают объем металла более, чем в три раза, поэтому они растрескиваются и отслаиваются (изготавливают изделия, работающие в вакууме).

Л.7. Виды термической обработки металлов. Основы теории термической обработки стали

Виды термической обработки металлов.

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства является термическая обработка. Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах, с целью изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств (представляется в виде графика в осях температура – время, см. рис. 7.1).

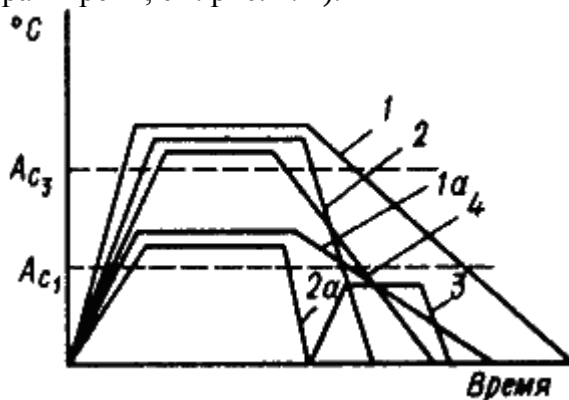


Рис. 7.1. Графики различных видов термообработки:
отжига (1, 1a), закалки (2, 2a), отпуска (3), нормализации (4)

Различают следующие виды термической обработки:

1. Отжиг I рода – возможен для любых металлов и сплавов. Его проведение не обусловлено фазовыми превращениями в твердом состоянии. Нагрев, при отжиге первого рода, повышая подвижность атомов, частично или полностью устраняет химическую неоднородность, уменьшает внутренние напряжения. Основное значение имеет температура нагрева и время выдержки. Характерным является медленное охлаждение.

Разновидностями отжига первого рода являются:

- диффузионный;
- рекристаллизационный;
- отжиг для снятия напряжения послековки, сварки, литья.

2. Отжиг II рода – отжиг металлов и сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении. Проводится для сплавов, в которых имеются полиморфные или эвтектичные превращения, а также переменная растворимость компонентов в твердом состоянии. Проводят отжиг второго рода с целью получения более равновесной структуры и подготовки ее к дальнейшей обработке. В результате отжига измельчается зерно, повышаются пластичность и вязкость, снижаются прочность и твердость, улучшается обрабатываемость резанием. Характеризуется нагревом до температур выше критических и очень медленным охлаждением, как правило, вместе с печью (рис. 7.1 (1, 1a)).

3. Закалка – проводится для сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом

состоянии при нагреве и охлаждении, с целью повышение твердости и прочности путем образования неравновесных структур (сорбит, троостит, мартенсит). Характеризуется нагревом до температур выше критических и высокими скоростями охлаждения (рис. 7.1 (2, 2а)).

4. Отпуск – проводится с целью снятия внутренних напряжений, снижения твердости и увеличения пластичности и вязкости закаленных сталей. Характеризуется нагревом до температуры ниже критической A_1 (рис. 7.1 (3)). Скорость охлаждения роли не играет. Происходят превращения, уменьшающие степень неравновесности структуры закаленной стали.

Термическую обработку подразделяют на предварительную и окончательную:

- предварительная – применяется для подготовки структуры и свойств материала для последующих технологических операций (для обработки давлением, улучшения обрабатываемости резанием);
- окончательная – формирует свойство готового изделия.

Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении.

Любая разновидность термической обработки состоит из комбинации четырех основных превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии (рис. 7.2).

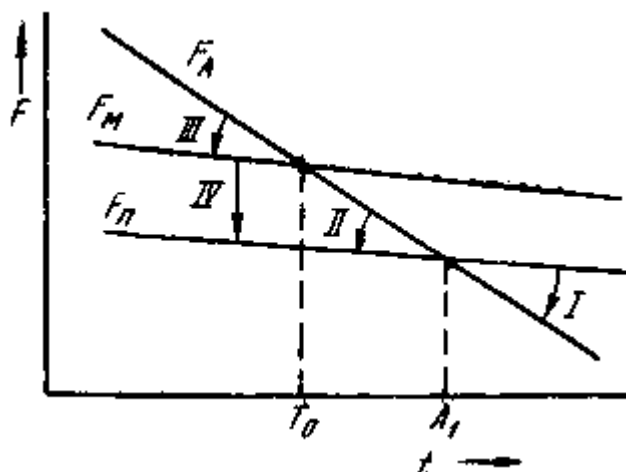
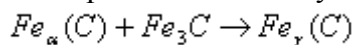
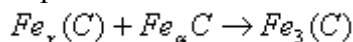


Рис. 7.2. Зависимость свободной энергии структурных составляющих сталей от температуры: аустенита (FA), мартенсита (FM), перлита (FP)

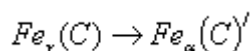
1. Превращение перлита в аустенит, происходит при нагреве выше критической температуры A_1 , минимальной свободной энергией обладает аустенит.



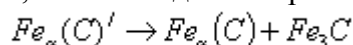
2. Превращение аустенита в перлит, происходит при охлаждении ниже A_1 , минимальной свободной энергией обладает перлит:



3. Превращение аустенита в мартенсит, происходит при быстром охлаждении ниже температуры неустойчивого равновесия



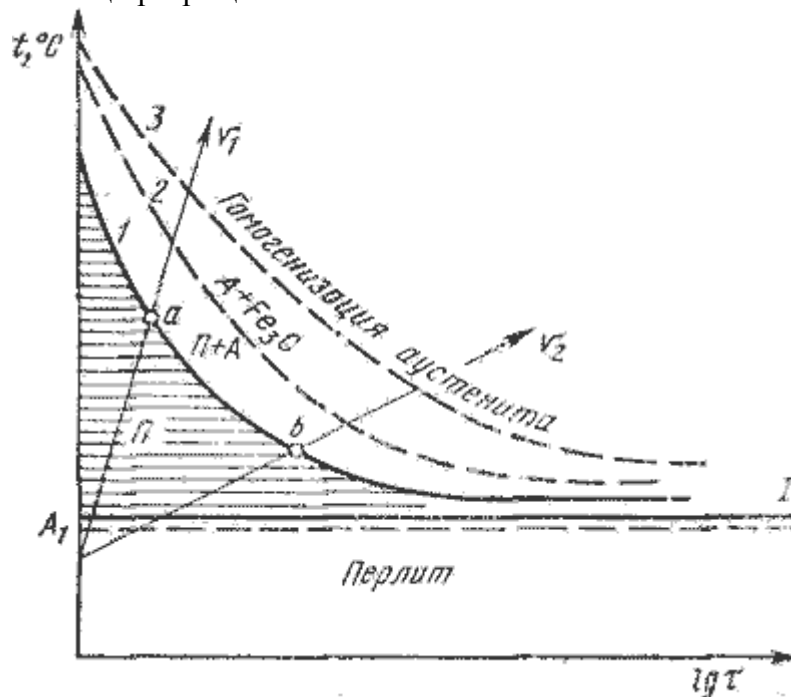
4. Превращение мартенсита в перлит – происходит при любых температурах, т.к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита.



Механизм основных превращений.

1. Превращение перлита в аустенит. Превращение основано на диффузии углерода, сопровождается полиморфным превращением $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$, а так же растворением цементита в аустените. Для исследования процессов строят диаграммы изотермического образования аустенита (рис. 7.3). Для этого образцы нагревают до температуры выше A_1 и выдерживают,

фиксируя начало и конец превращения.



1 - начало образования аустенита; 2 - конец преобразования перлита в аустенит; 3 - полное растворение цемента

Рис. 7.3. Диаграмма изотермического образования аустенита

С увеличением перегрева и скорости нагрева продолжительность превращения сокращается. Механизм превращения представлен на рис. 7.4.

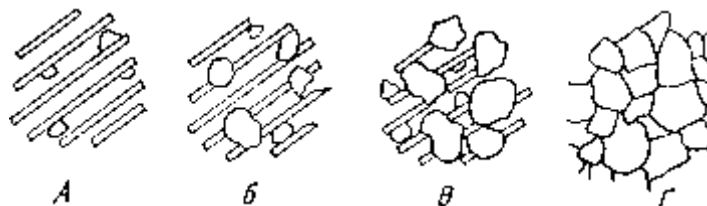


Рис. 7.4. Механизм превращения перлита в аустенит

Превращение начинается с зарождения центров аустенитных зерен на поверхности раздела: феррит – цементит, кристаллическая решетка Fe_α перестраивается в решетку Fe_γ . Время превращения зависит от температуры, так как с увеличением степени перегрева уменьшается размер критического зародыша аустенита, увеличиваются скорость возникновения зародышей и скорость их роста. Образующиеся зерна аустенита имеют вначале такую же концентрацию углерода, как и феррит. Затем в аустените начинает растворяться вторая фаза перлита – цементит, следовательно, концентрация углерода увеличивается. Превращение Fe_α в Fe_γ идет быстрее. После того, как весь цементит растворится, аустенит неоднороден по химическому составу: там, где находились пластинки цементита концентрация углерода более высокая. Для завершения процесса перераспределения углерода в аустените требуется дополнительный нагрев или выдержка.

Величина образовавшегося зерна аустенита оказывает влияние на свойства стали. Образующиеся зерна аустенита получаются мелкими (начальное зерно). При повышении температуры или выдержке происходит рост зерна аустенита. Движущей силой роста является разность свободных энергий мелкозернистой (большая энергия) и крупнозернистой (малая энергия) структуры аустенита. Стали различают по склонности к росту зерна аустенита. Если зерно аустенита начинает быстро расти даже при незначительном нагреве выше температуры A_1 , то сталь наследственно крупнозернистая. Если зерно растет только при большом перегреве, то сталь наследственно мелкозернистая. Склонность к росту аустенитного зерна является плавочной характеристикой. Стали одной марки, но разных плавов могут различаться,

так как содержат неодинаковое количество неметаллических включений, которые затрудняют рост аустенитного зерна. Ванадий, титан, молибден, вольфрам, алюминий – уменьшают склонность к росту зерна аустенита, а марганец и фосфор – увеличивают ее. Заэвтектоидные стали менее склонны к росту зерна.

При последующем охлаждении зерна аустенита не измельчаются. Это следует учитывать при назначении режимов термической обработки, так как от размера зерна зависят механические свойства. Крупное зерно снижает сопротивление отрыву, ударную вязкость, повышает порог хладноломкости.

Неправильный режим нагрева может привести либо к перегреву, либо к пережогу стали.

Перегрев. Нагрев доэвтектоидной стали значительно выше температуры A_3 приводит к интенсивному росту зерна аустенита. При охлаждении феррит выделяется в виде пластинчатых или игольчатых кристаллов. Такая структура называется видманштеттовой структурой и характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальных температур с последующим медленным охлаждением.

Пережог имеет место, когда температура нагрева приближается к температуре плавления. При этом наблюдается окисление границ зерен, что резко снижает прочность стали. Излом такой стали камневидный. Пережог – неисправимый брак.

2. Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении: $Fe_\gamma(C) \rightarrow Fe_\alpha(C) + Fe_3C$. Превращение связано с диффузией углерода, сопровождается полиморфным превращением $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$, выделением углерода из аустенита в виде цементита, разрастанием образовавшегося цементита. В зависимости от степени переохлаждения различают три области превращения. Вначале, с увеличением переохлаждения скорость превращения возрастает, а затем убывает. При температуре 727°C и ниже 200°C скорость равна нулю. При температуре 200°C равна нулю скорость диффузии углерода. Образцы нагревают до температуры, при которой структура состоит из однородного аустенита (770°C). Затем переносят в термостаты с заданной температурой (интервал $25\dots50^\circ\text{C}$). Превращение аустенита можно легко обнаружить с помощью наблюдений за изменением магнитных характеристик, так как аустенит парамагнитен, а феррит и цементит обладают магнитными свойствами. Получают серию кинетических кривых (рис. 7.5 а), которые показывают количество образовавшегося перлита в зависимости от времени, прошедшего с начала превращения. В начале наблюдается инкубационный подготовительный период, время, в течение которого сохраняется переохлажденный аустенит.

Превращение протекает с различной скоростью и достигает максимума при образовании 50 % продуктов распада. Затем скорость начинает уменьшаться и постепенно затухает. С увеличением степени переохлаждения устойчивость аустенита уменьшается, а затем увеличивается. Горизонтальная линия Мн показывает температуру начала бездиффузного мартенситного превращения. Такие диаграммы называются диаграммами изотермического превращения аустенита (рис. 7.5 б).

При малых степенях переохлаждения, в области температур $727\dots550^\circ\text{C}$, сущность превращения заключается в том, что в результате превращения аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита, состав которой отличается от состава исходного аустенита. Аустенит содержит 0,8 % углерода, а образующиеся фазы: феррит – 0,02 %, цементит – 6,67 % углерода.

Время устойчивости аустенита и скорость его превращения зависят от степени переохлаждения. Максимальная скорость превращения соответствует переохлаждению ниже температуры A_1 на $150\dots200^\circ\text{C}$, то есть соответствует минимальной устойчивости аустенита.

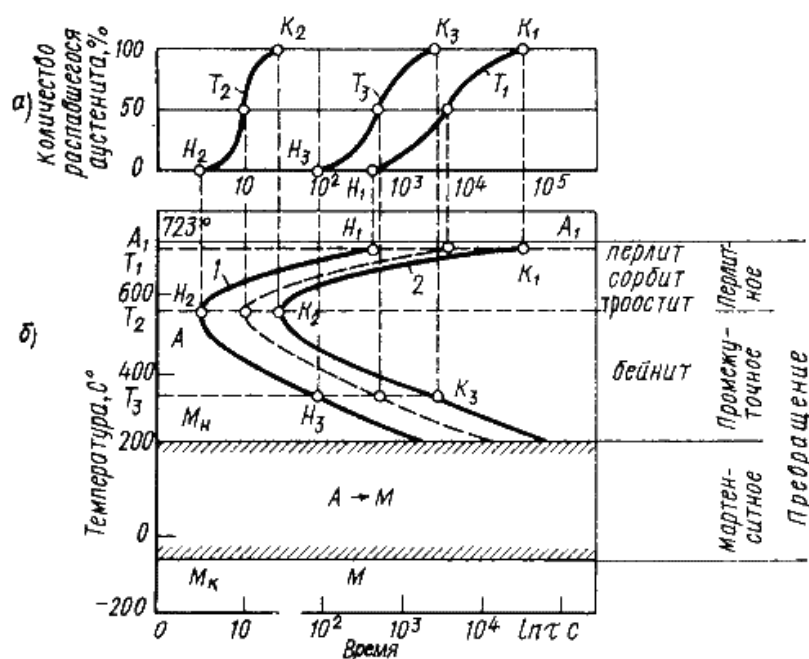


Рис. 7.5. Кинетические кривые превращения аустенита при охлаждении (а);
диаграмма изотермического превращения аустенита (б)

Механизм превращения представлен на рис. 7.6.

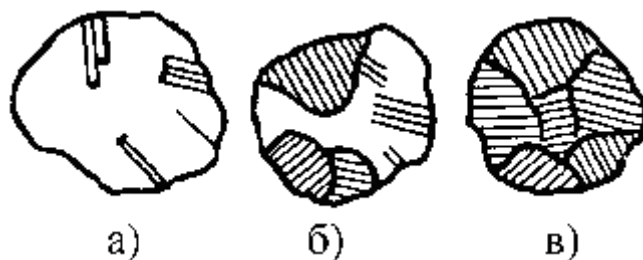


Рис. 7.6. Механизм превращения аустенита в перлит

При образовании перлита из аустенита ведущей фазой является цементит. Зарождение центров кристаллизации цементита облегчено на границе аустенитных зерен. Образовавшаяся пластинка цементита растет, удлиняется и обедняет соседние области углеродом. Рядом с ней образуются пластинки феррита. Эти пластинки растут как по толщине, так и по длине. Рост образовавшихся колоний перлита продолжается до столкновения с кристаллами перлита, растущими из других центров.

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит процесс его распада. Толщина соседних пластинок феррита и цементита определяет дисперсность структуры. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют различное название.

Скорость охлаждения 0/сек.	Получаемая структура	Примерный размер частичек цементита, мм	Твердость, НВ
<50	Перлит	$1 - 9 \cdot 10^{-3}$	<260
50-100	Сорбит	$1 - 9 \cdot 10^{-4}$	260-300
100-150	Троостит	$1 - 9 \cdot 10^{-5}$	350-400

При температуре ниже 550°C самодиффузия атомов железа практически не происходит, а атомы углерода обладают достаточной подвижностью. Механизм превращения состоит в том, что внутри аустенита происходит перераспределение атомов углерода и участки аустенита, обогащенные углеродом превращаются в цементит. Превращение обедненного

углеродом аустенита в феррит происходит по сдвиговому механизму, путем возникновения и роста зародышей феррита. Образующиеся при этом кристаллы имеют игольчатую форму. Такая структура, состоящая из цементита и феррита, называется бейнитом. Особенностью является повышенное содержание углерода в феррите (0.1...0.2 %).

3. Превращение аустенита в мартенсит при высоких скоростях охлаждения. Данное превращение имеет место при высоких скоростях охлаждения, когда диффузионные процессы подавляются. Сопровождается полиморфным превращением Fe_γ в Fe_α . При охлаждении стали со скоростью, большей критической ($V > V_k$), превращение начинается при температуре начала мартенситного превращения (M_n) и заканчивается при температуре окончания мартенситного превращения (M_k). В результате такого превращения аустенита образуется продукт закалки – мартенсит. Минимальная скорость охлаждения V_k , при которой весь аустенит переохлаждается до температуры M_n и превращается, называется критической скоростью закалки. Так как процесс диффузии не происходит, то весь углерод аустенита остается в решетке Fe_α и располагается либо в центрах тетраэдров, либо в середине длинных ребер (рис. 7.7).

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в Fe_α . При образовании мартенсита кубическая решетка Fe_α сильно искажается, превращаясь в тетрагональную (рис. 7.7 а). Искажение решетки характеризуется степенью тетрагональности: $c/a > 1$. Степень тетрагональности прямо пропорциональна содержанию углерода в стали (рис. 7.7 б).

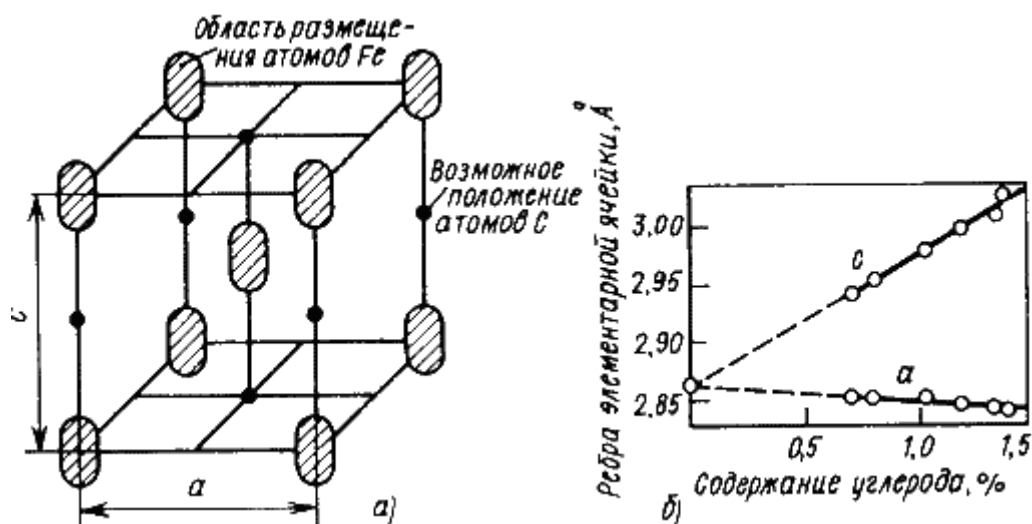


Рис. 7.7. Кристаллическая решетка мартенсита (а); влияние содержания углерода на параметры а и с решетки мартенсита (б)

Механизм мартенситного превращения имеет ряд особенностей.

1. Бездиффузионный характер. Превращение осуществляется по сдвиговому механизму. В начале превращения имеется непрерывный переход от решетки аустенита к решетке мартенсита (когерентная связь). При превращении гранецентрированную кубическую решетку аустенита превращают в объемно-центрированную кубическую, атомы железа смещаются на расстояния меньше межатомных, т.е. нет необходимости в самодиффузии атомов железа.

2. Ориентированность кристаллов мартенсита. Кристаллы имеют форму пластин, сужающихся к концу, под микроскопом такая структура выглядит как игольчатая. Образующиеся мгновенно пластины растут либо до границы зерна аустенита, либо до дефекта. Следующие пластины расположены к первым под углами 60° или 120° , их размеры ограничены участками между первыми пластинами (рис. 7.8).



Рис. 7.8. Ориентированность кристаллов мартенсита

Ориентированный (когерентный) рост кристаллов мартенсита обеспечивает минимальную поверхностную энергию. При когерентном росте, из-за различия объемов аустенита и мартенсита, возникают большие напряжения. При достижении определенной величины кристаллов мартенсита, эти напряжения становятся равными пределу текучести аустенита. В результате этого нарушается когерентность и происходит отрыв решетки мартенсита от решетки аустенита. Рост кристаллов прекращается.

3. Очень высокая скорость роста кристалла, до 1000 м/с.

4. Мартенситное превращение происходит только при непрерывном охлаждении. Для каждой стали начинается и заканчивается при определенной температуре, независимо от скорости охлаждения. Температуру начала мартенситного превращения называют мартенситной точкой МН, а температуру окончания превращения – МК. Температуры МН и МК зависят от содержания углерода и не зависят от скорости охлаждения. Для сталей с содержанием углерода выше 0,6 % МК уходит в область отрицательных температур (рис. 7.9)

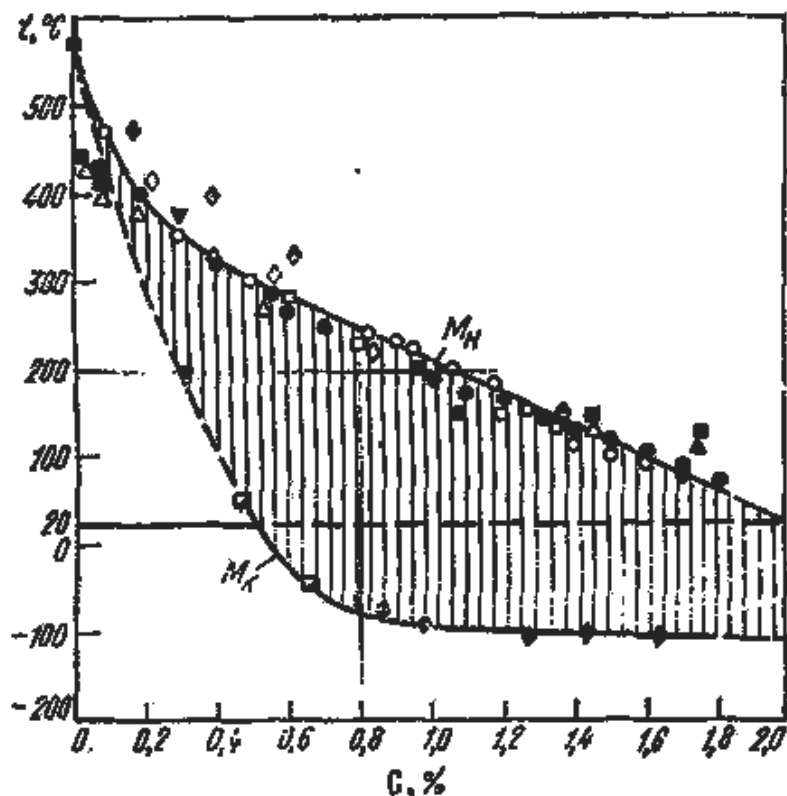


Рис. 7.9. Зависимость температур начала (МН) и конца (МК) мартенситного превращения от содержания углерода в стали

Мартенситное превращение чувствительно к напряжениям, и деформация аустенита может вызвать превращение даже при температурах выше МН. В сталях с МК ниже 20 °С присутствует аустенит остаточный, его количество тем больше, чем ниже МН и МК (при содержании углерода 0,6...1,0 % количество аустенита остаточного – 10 %, при содержании углерода 1,5 % – до 50 %). В микроструктуре наблюдается в виде светлых полей между иглами мартенсита.

5. Превращение необратимое. Получить аустенит из мартенсита невозможно. Свойства мартенсита обусловлены особенностями его образования. Он характеризуется высокой твердостью и низкой пластичностью, что обуславливает хрупкость. Твердость составляет до 65 HRC. Высокая твердость вызвана влиянием внедренных атомов углерода в решетку α -фазы, что вызывает ее искажение и возникновение напряжений. С повышением содержания углерода в стали возрастает склонность к хрупкому разрушению.

4. Превращение мартенсита в перлит. Имеет место при нагреве закаленных сталей. Превращение связано с диффузией углерода. Мартенсит закалки – неравновесная структура, сохраняющаяся при низких температурах. Для получения равновесной структуры изделия подвергают отпуску. При нагреве закаленной стали происходят следующие процессы.

При нагреве до 200 °C происходит перераспределение углерода в мартенсите. Образуются пластинки ε – карбидов толщиной несколько атомных диаметров. На образование карбидов углерод расходуется только из участков мартенсита, окружающих кристаллы выделившихся карбидов. Концентрация углерода на этих участках резко падает, тогда как удаленные участки сохраняют концентрацию углерода. В стали присутствуют карбиды и два α -твердых раствора мартенсита (с высокой и низкой концентрацией углерода). Такой тип распада мартенсита называется прерывистым. Скорость диффузии мала, карбиды не увеличиваются, распад мартенсита сопровождается зарождением новых карбидных частиц. Таким образом, имеем структуру с неравномерным распределением углерода – это мартенсит отпуска. При этом несколько снижается тетрагональность решетки.

При нагреве до 300 °C идет рост образовавшихся карбидов. Карбиды выделяются из мартенсита и он обедняется углеродом. Диффузия углерода увеличивается и карбиды растут в результате притока углерода из областей твердого раствора с высокой его концентрацией. Кристаллическая решетка карбидов когерентно связана с решеткой мартенсита. В высокоуглеродистых сталях аустенит остаточный превращается в мартенсит отпуска. Наблюдается снижение тетрагональности решетки и внутренних напряжений. Структура – мартенсит отпуска.

При нагреве до 400 °C весь избыточный углерод выделяется из Fe_α . Карбидные частицы полностью обособляются, приобретают строение цементита, и начинают расти. Форма карбидных частиц приближается к сферической. Высокодисперсная смесь феррита и цементита называется троостит отпуска.

При нагреве выше 400 °C изменение фазового состава не происходит, изменяется только микроструктура. Имеет место рост и сфероидизация цементита. Наблюдается растворение мелких и рост крупных карбидных частиц.

При температуре 550...600 °C имеем сорбит отпуска. Карбиды имеют зернистое строение. Улучшаются свойства стали.

При температуре 650...700 °C получают более грубую ферритно-цементитную смесь – перлит отпуска (зернистый перлит).

Технологические возможности и особенности отжига, нормализации, закалки и отпуска

При разработке технологии необходимо установить:

- режим нагрева деталей (температуру и время нагрева);
- характер среды, где осуществляется нагрев и ее влияние на материал стали;
- условия охлаждения.

Режимы термической обработки назначают в соответствии с диаграммами состояния и диаграммой изотермического распада аустенита. Нагрев может осуществляться в нагревательных печах, топливных или электрических, в соляных ваннах или в ваннах с расплавленным металлом, пропусканием через изделие электрического тока или в результате индукционного нагрева. С точки зрения производительности, нагрев с максимальной скоростью уменьшает окалинообразование, обезуглероживание и рост аустенитного зерна. Однако необходимо учитывать перепад температур по сечению, что ведет к возникновению термических напряжений. Если растягивающие напряжения превысят предел прочности или пре-

дел текучести, то возможно коробление или образование трещин.

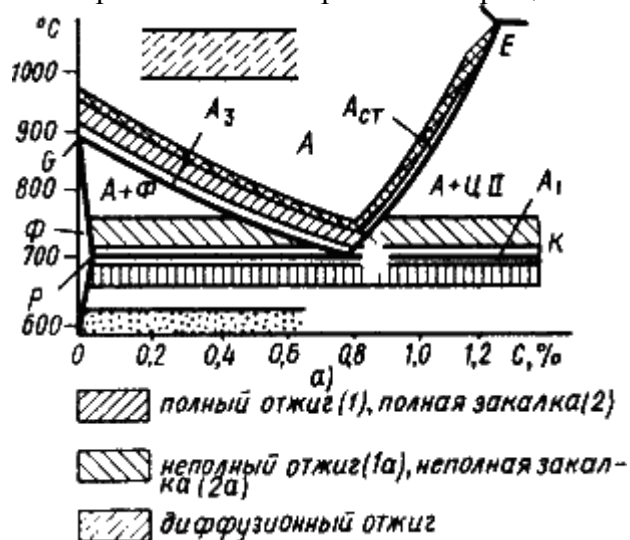


Рис. 7.10. Левый угол диаграммы состояния железо – цементит и температурные области нагрева при термической обработке сталей

Скорость нагрева тем выше, чем менее легирована сталь, однороднее ее структура, проще конфигурация. Скорость нагрева принимается 0,8...1 мин на 1 мм сечения. Время выдержки принимается около 20 % от времени нагрева.

На рис. 7.10 показаны температурные области нагрева при термической обработке сталей.

Отжиг. Отжиг, снижая твердость и повышая пластичность и вязкость за счет получения равновесной мелкозернистой структуры, позволяет:

- улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием;
- исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литье стали;
- подготовить структуру к последующей термической обработке.

Характерно медленное охлаждение со скоростью 30...100 °С/ч.

Отжиг первого рода. 1. Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг. Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава. В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей. Температура нагрева зависит от температуры плавления, $T_H = 0,8 T_{пл}$. Продолжительность выдержки: 8...20 часов.

2. Рекристаллизационный отжиг проводится для снятия напряжений после холодной пластической деформации. Температура нагрева связана с температурой плавления: $T_H = 0,4 T_{пл}$. Продолжительность зависит от габаритов изделия.

3. Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров). Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне: $T_H = 160...700$ °С. Продолжительность зависит от габаритов изделия.

Отжиг второго рода предназначен для изменения фазового состава. Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения. Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат. Отжиг снижает твердость и прочность, улучшает обрабатываемость резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерно, снижая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность, способствует повышению пластичности и вязкости.

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:

1. Полный, с температурой нагрева на 30...50 °С выше критической температуры A_3 . Проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры. При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелко-

зернистую структуру.

2. Неполный, с температурой нагрева на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше критической температуры A_1 . Применяется для заэвтектоидных сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация). Получению зернистого цемента способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой дробится цементитная сетка. Структура с зернистым цементитом лучше обрабатывается и имеет лучшую структуру после закалки. Неполный отжиг является обязательным для инструментальных сталей. Иногда неполный отжиг применяют для доэвтектоидных сталей, если не требуется исправление структуры (сталь мелкозернистая), а необходимо только понизить твердость для улучшения обрабатываемости резанием.

3. Циклический или маятниковый отжиг применяют, если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым. В этом случае после нагрева выше температуры A_1 следует охлаждение до 680°C , затем снова нагрев до температуры $750...760^{\circ}\text{C}$ и охлаждение. В результате получают зернистый цементит.

4. Изотермический отжиг – после нагрева до требуемой температуры, изделие быстро охлаждают до температуры на $50...100^{\circ}\text{C}$ ниже критической температуры A_1 и выдерживают до полного превращения аустенита в перлит, затем охлаждают на спокойном воздухе (рис. 7.11). Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости аустенита. В результате получают более однородную структуру, так как превращение происходит при одинаковой степени переохлаждения. Значительно сокращается длительность процесса. Применяют для легированных сталей.

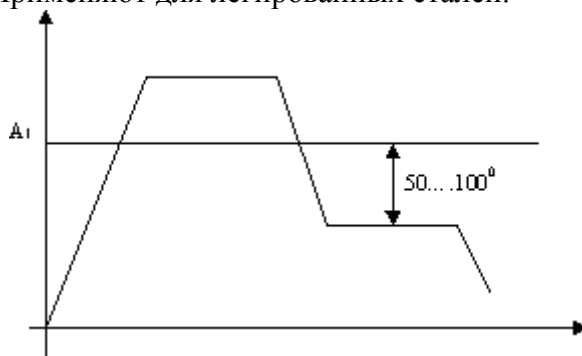


Рис. 7.11. Режимы изотермического отжига

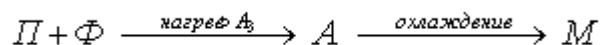
5. Нормализация – разновидность отжига. Термическая обработка, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния, на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше A_3 или $A_{ст}$ с последующим охлаждением на воздухе. В результате нормализации получают более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит), уменьшаются внутренние напряжения, устраняются пороки, полученные в процессе предшествующей обработки. Твердость и прочность несколько выше, чем после отжига. В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цемента. Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру. Иногда проводят как окончательную обработку, например, при изготовлении сортового проката. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки с высоким отпуском. В этом случае механические свойства несколько ниже, но изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины.

Закалка. Конструкционные стали подвергают закалке и отпуску для повышения прочности и твердости, получения высокой пластичности, вязкости и высокой износостойкости, а инструментальные – для повышения твердости и износостойкости. Верхний предел температур нагрева для заэвтектоидных сталей ограничивается, так как приводит к росту зерна, что снижает прочность и сопротивление хрупкому разрушению. Основными параметрами являются температура нагрева и скорость охлаждения. Продолжительность нагрева зависит от нагревательного устройства, по опытным данным на 1 мм сечения затрачивается: в электрической печи – $1,5...2$ мин; в пламенной печи – 1 мин; в соляной ванне – $0,5$ мин; в свинцовой

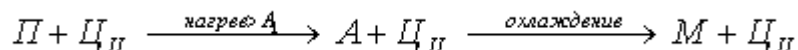
ванне – 0,1...0,15 мин.

По температуре нагрева различают виды закалки:

– полная, с температурой нагрева на 30...50 °С выше критической температуры A_3 . Применяют ее для доэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



– неполная с температурой нагрева на 30...50 °С выше критической температуры A_1 . Применяется для заэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



После охлаждения в структуре остается вторичный цементит, который повышает твердость и износостойкость режущего инструмента.

После полной закалки заэвтектоидных сталей получают дефектную структуру грубо-игольчатого мартенсита.

Заэвтектоидные стали перед закалкой обязательно подвергают отжигу – сфероидизации, чтобы цементит имел зернистую форму.

Для получения требуемой структуры изделия охлаждают с различной скоростью, которая в большой степени определяется охлаждающей средой, формой изделия и теплопроводностью стали. Режим охлаждения должен исключить возникновение больших закалочных напряжений. При высоких скоростях охлаждения при закалке возникают внутренние напряжения, которые могут привести к короблению и растрескиванию. Режим охлаждения должен также обеспечить необходимую глубину закаленного слоя. В качестве охлаждающих сред при закалке используют воду при различных температурах, технические масла, растворы солей и щелочей, расплавленные металлы.

При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать закаливаемость и прокаливаемость стали. Закаливаемость – способность стали приобретать высокую твердость при закалке.

Закаливаемость определяется содержанием углерода. Стали с содержанием углерода менее 0,20 % не закаливаются.

Прокаливаемость – способность получать закаленный слой с мартенситной и троостомартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину. За глубину закаленной зоны принимают расстояние от поверхности до середины слоя, где в структуре одинаковые объемы мартенсита и троостита. Чем меньше критическая скорость закалки, тем выше прокаливаемость. Укрупнение зерен повышает прокаливаемость. Если скорость охлаждения в сердцевине изделия превышает критическую то сталь имеет сквозную прокаливаемость.

Нерастворимые частицы и неоднородность аустенита уменьшают прокаливаемость.

Способы закалки

В зависимости от формы изделия, марки стали и нужного комплекса свойств применяют различные способы охлаждения (рис. 7.12)

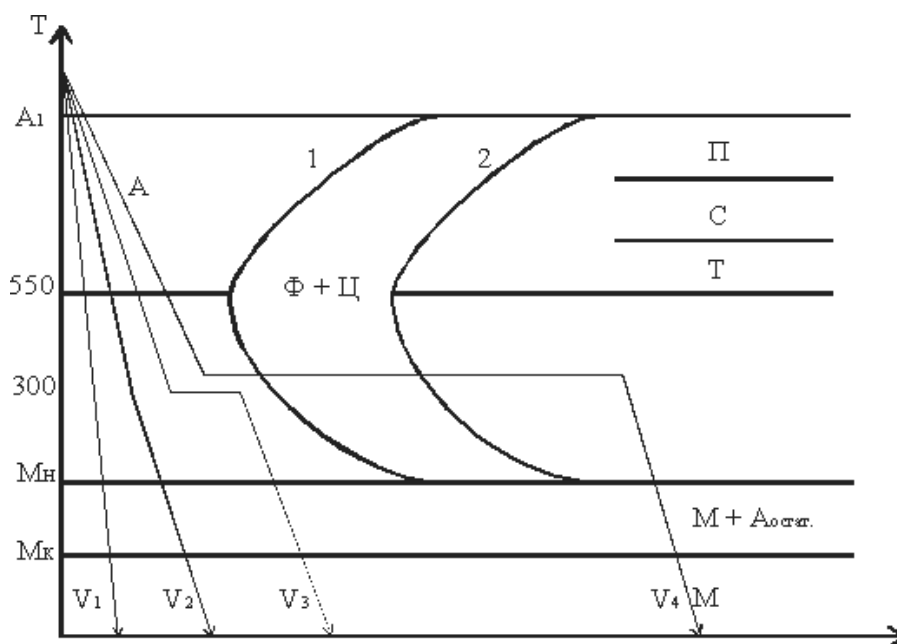


Рис. 7.12. Режимы закалки

1. Закалка в одном охладителе (V_1). Нагретую до нужной температуры деталь переносят в охладитель и полностью охлаждают. В качестве охлаждающей среды используют:

- воду – для крупных изделий из углеродистых сталей;
- масло – для небольших деталей простой формы из углеродистых сталей и изделий из легированных сталей.

Основной недостаток – значительные закалочные напряжения.

2. Закалка в двух сферах или прерывистая (V_2). Нагретое изделие предварительно охлаждают в более резком охладителе (вода) до температуры $\sim 300^\circ\text{C}$ и затем переносят в более мягкий охладитель (масло). Прерывистая закалка обеспечивает максимальное приближение к оптимальному режиму охлаждения. Применяется в основном для закалки инструментов.

Недостаток: сложность определения момента переноса изделия из одной среды в другую.

3. Ступенчатая закалка (V_3). Нагретое до требуемой температуры изделие помещают в охлаждающую среду, температура которой на $30\ldots 50^\circ\text{C}$ выше точки M_N и выдерживают в течение времени, необходимого для выравнивания температуры по всему сечению. Время изотермической выдержки не превышает периода устойчивости аустенита при заданной температуре.

В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли или металлы. После изотермической выдержки деталь охлаждают с невысокой скоростью.

Способ используется для мелких и средних изделий.

4. Изотермическая закалка (V_4). Отличается от ступенчатой закалки продолжительностью выдержки при температуре выше M_N , в области промежуточного превращения. Изотермическая выдержка обеспечивает полное превращение переохлажденного аустенита в бейнит. При промежуточном превращении легированных сталей кроме бейнита в структуре сохраняется аустенит остаточный. Образовавшаяся структура характеризуется сочетанием высокой прочности, пластичности и вязкости. Вместе с этим снижается деформация из-за закалочных напряжений, уменьшаются и фазовые напряжения. В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли и щелочи. Применяются для легированных сталей.

5. Закалка с самоотпуском. Нагретые изделия помещают в охлаждающую среду и выдерживают до неполного охлаждения. После извлечения изделия, его поверхностные слои повторно нагреваются за счет внутренней теплоты до требуемой температуры, то есть осуществляется самоотпуск. Применяется для изделий, которые должны сочетать высокую твердость на поверхности и высокую вязкость в сердцевине (инструменты ударного действия: молотки, зубила).

Отпуск. Отпуск является окончательной термической обработкой. Целью отпуска является повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних напряжений закаленных сталей. С повышением температуры нагрева прочность обычно снижается, а пластичность и вязкость растут. Температуру отпуска выбирают, исходя из требуемой прочности конкретной детали.

Различают три вида отпуска:

1. Низкий отпуск с температурой нагрева $T_n = 150 \dots 300 \text{ } ^\circ\text{C}$. В результате его проведения частично снимаются закалочные напряжения. Получают структуру – мартенсит отпуска. Проводят для инструментальных сталей, после закалки токами высокой частоты, после цементации.
2. Средний отпуск с температурой нагрева $T_n = 300 \dots 450 \text{ } ^\circ\text{C}$. Получают структуру – троостит отпуска, сочетающую высокую твердость $40 \dots 45\text{HRC}$ с хорошей упругостью и вязкостью. Используется для изделий типа пружин, рессор.
3. Высокий отпуск с температурой нагрева $T_n = 450 \dots 650 \text{ } ^\circ\text{C}$. Получают структуру, сочетающую достаточно высокую твердость и повышенную ударную вязкость (оптимальное сочетание свойств) – сорбит отпуска. Используется для деталей машин, испытывающих ударные нагрузки.

Комплекс термической обработки, включающий закалку и высокий отпуск, называется улучшением.

Л.8. Химико-термическая обработка стали. Методы упрочнения деталей.

Химико-термическая обработка стали

Химико-термическая обработка (ХТО) – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали. Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев. В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура.

Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки. В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы диссоциации, адсорбции, диффузии.

Диссоциация – получение насыщающего элемента в активированном атомарном состоянии в результате химических реакций, а также испарения.

Адсорбция – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента. Адсорбция – всегда экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.

Диффузия – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия.

Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения деталей. Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

- цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом);
- нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- диффузионная металлизация (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

Цементация – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры $900 \dots 950 \text{ } ^\circ\text{C}$ с последующей объемной закалкой и низким отпуском. Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до 0,25 %).

Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод (древесный уголь, бензин, керосин и т.п.). Подобрав режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины. Скорость цементации – 0,1 мм/час. Глубина цементации (h) – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ($h = 1 \dots 2$ мм). Степень цементации – среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более 1,2 %). Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного, сообщающего слою повышенную хрупкость. На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде). Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

На поверхности изделия после науглероживания образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита. По мере удаления от поверхности, содержание углерода снижается и следующая зона состоит только из перлита. Затем появляются зерна феррита, их количество, по мере удаления от поверхности увеличивается. И, наконец, структура становится отвечающей исходному составу.

В результате цементации достигается только выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая термообработка. Все изделия подвергают объемной закалке с низким отпуском. После закалки цементованное изделие приобретает высокую твердость и износостойкость, повышается предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе, при сохранении вязкой сердцевины. Комплекс термической обработки зависит от материала и назначения изделия. Графики различных комплексов термической обработки представлены на рис. 8.1.

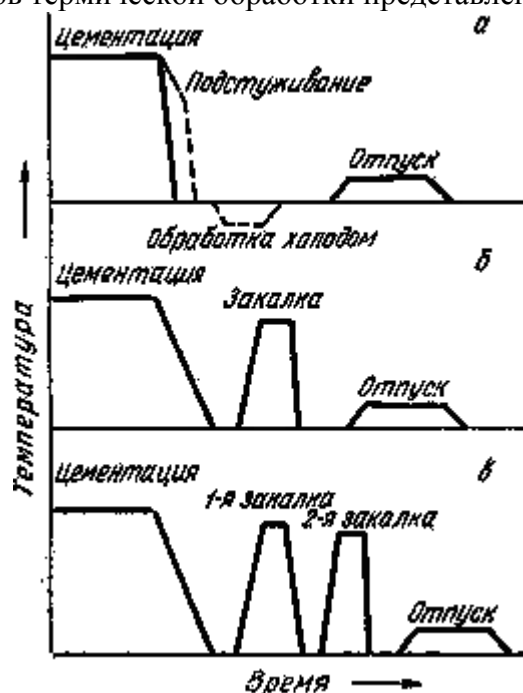


Рис. 8.1. Режимы термической обработки цементованных изделий

Если сталь наследственно мелкозернистая или изделия неответственного назначения, то проводят однократную закалку с температуры 820...850 °С (рис. 8.1 б). При этом обеспечивается получение высокоуглеродистого мартенсита в цементованном слое, а также частичная перекристаллизация и измельчение зерна сердцевины.

При газовой цементации изделия по окончании процесса подстуживают до этих температур, а затем проводят закалку (не требуется повторный нагрев под закалку) (рис. 8.1 а).

Для удовлетворения особо высоких требований, предъявляемых к механическим свойствам цементованных деталей, применяют двойную закалку (рис. 8.1 в). Первая закалка (или нормализация) проводится с температуры 880...900 °С для исправления структуры сердцевины. Вторая закалка проводится с температуры 760...780 °С для получения мелкоигольча-

того мартенсита в поверхностном слое.

Завершающей операцией термической обработки всегда является низкий отпуск, проводимый при температуре 150...180 °С. В результате отпуска в поверхностном слое получают структуру мартенсита отпуска, частично снимаются напряжения. Цементации подвергаются зубчатые колеса, поршневые кольца, червяки, оси, ролики.

Азотирование – химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои насыщаются азотом. При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость. При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак с определенной скоростью. При нагреве аммиак распадается на азот и водород. Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия. Фазы, получающиеся в азотированном слое углеродистых сталей, не обеспечивают высокой твердости, и образующийся слой – хрупкий. Для азотирования используют стали, содержащие алюминий, молибден, хром, титан. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью. Типовые азотируемые стали: 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ. Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от ряда факторов, из которых основные: температура азотирования, продолжительность азотирования и состав азотируемой стали.

В зависимости от условий работы деталей различают азотирование:

- для повышения поверхностной твердости и износостойкости;
- для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

В первом случае процесс проводят при температуре 500...560 °С в течение 24...90 часов, так как скорость азотирования составляет 0,01 мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет 10...12 %, толщина слоя (h) – 0,3...0,6 мм. На поверхности получают твердость около 1000 HV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака. Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом (контейнерной установкой) возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотосодержащего газа, и ионы бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения. Катодное распыление осуществляется в течение 5...60 мин при напряжении 1100...1400 В и давлении 0,1...0,2 мм. рт. ст., рабочее напряжение 400...1100 В, продолжительность процесса до 24 часов.

Антикоррозионное азотирование проводят и для легированных, и для углеродистых сталей. Температура проведения азотирования – 650...700 °С, продолжительность процесса – 10 часов. На поверхности образуется слой ϵ -фазы толщиной 0,01...0,03 мм, который обладает высокой стойкостью против коррозии (ϵ -фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_3N , имеющий гексагональную решетку).

Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпуском). После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.

Цианирование – химико-термическая обработка, при которой поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом. Осуществляется в ваннах с расплавленными цианистыми солями, например $NaCN$ с добавками солей $NaCl$, $BaCl$ и др. При окислении цианистого натрия образуется атомарный азот и окись углерода. Глубина слоя и концентрация в нем углерода и азота зависят от температуры процесса и его продолжительности. Цианированный слой обладает высокой твердостью 58...62 HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость. Продолжительности процесса 0,5...2 часа.

Высокотемпературное цианирование – проводится при температуре 800...950 °С, сопровождается преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6...1,2 % (жидкостная цементация). Содержание азота в цианированном слое 0,2...0,6 %, толщина слоя 0,15...2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску. Окончательная структура цианированного слоя состоит из тонкого слоя карбонитридов $Fe_2(C, N)$, а затем азотистый мартенсит. По сравнению с цементацией высокотемпературное цианирование

происходит с большей скоростью, приводит к меньшей деформации деталей, обеспечивает большую твердость и сопротивление износу.

Низкотемпературное цианирование – проводится при температуре 540...600 °С, сопровождается преимущественным насыщением стали азотом. Проводится для инструментов из быстрорежущих, высокохромистых сталей. Является окончательной обработкой.

Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей.

Нитроцементация – газовое цианирование, осуществляется в газовых смесях из цементующего газа и диссоциированного аммиака. Состав газа, температура процесса определяют соотношение углерода и азота в цианированном слое. Глубина слоя зависит от температуры и продолжительности выдержки.

Высокотемпературная нитроцементация проводится при температуре 830...950 °С, для машиностроительных деталей из углеродистых и малолегированных сталей при повышенном содержании аммиака. Завершающей термической обработкой является закалка с низким отпуском. Твердость достигает 56...62 HRC.

Низкотемпературной нитроцементации подвергают инструмент из быстрорежущей стали после термической обработки (закалки и отпуска). Процесс проводят при температуре 530...570 °С, в течение 1,5...3 часов. Образуется поверхностный слой толщиной 0,02...0,004 мм с твердостью 900...1200 HV.

Нитроцементация характеризуется безопасностью в работе, низкой стоимостью.

Диффузионная металлизация – химико-термическая обработка, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др. При насыщении хромом процесс называют хромированием, алюминием – алитированием, кремнием – силицированием, бором – борированием. Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

При твердой диффузионной металлизации металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl). В результате реакции металлизатора с HCl или Cl_2 образуется соединение хлора с металлом ($AlCl_3$, $CrCl_2$, $SiCl_4$), которые при контакте с поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

Жидкая диффузионная металлизация проводится погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

Газовая диффузионная металлизация проводится в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

Диффузия металлов протекает очень медленно, так как образуются растворы замещения, поэтому при одинаковых температурах диффузионные слои в десятки и сотни раз тоньше, чем при цементации.

Диффузионная металлизация – процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах (1000...1200 °С) в течение длительного времени. Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих температур 1000...1200 °С изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием или силицированием. Исключительно высокой твердостью (2000 HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа (FeB , FeB_2) характеризуются борированные слои, но эти слои очень хрупкие.

Методы упрочнения металла

Термомеханическая обработка стали. Термомеханическая обработка (ТМО) относится к комбинированным способам изменения строения и свойств материалов. При термомеханической обработке совмещаются пластическая деформация и термическая обработка (закалка предварительно деформированной стали в аустенитном состоянии). Преимуществом термомеханической обработки является то, что при существенном увеличении прочности характеристики пластичности снижаются незначительно, а ударная вязкость выше в 1,5...2 раза по сравнению с ударной вязкостью для той же стали после закалки с низким отпуском.

В зависимости от температуры, при которой проводят деформацию, различают высоко-

температурную термомеханическую обработку (ВТМО) и низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО).

Сущность высокотемпературной термомеханической обработки заключается в нагреве стали до температуры аустенитного состояния (выше A_3). При этой температуре осуществляют деформацию стали, что ведет к наклепу аустенита. Сталь с таким состоянием аустенита подвергают закалке (рис. 8.2 а). Высокотемпературная термомеханическая обработка практически устраняет развитие отпускной хрупкости в опасном интервале температур, ослабляет необратимую отпускную хрупкость и резко повышает ударную вязкость при комнатной температуре. Понижается температурный порог хладноломкости. Высокотемпературная термомеханическая обработка повышает сопротивление хрупкому разрушению, уменьшает чувствительность к трещинообразованию при термической обработке. Высокотемпературную термомеханическую обработку эффективно использовать для углеродистых, легированных, конструкционных, пружинных и инструментальных сталей. Последующий отпуск при температуре $100...200^\circ\text{C}$ проводится для сохранения высоких значений прочности.



Рис. 8.2. Схема режимов термомеханической обработки стали

Низкотемпературная термомеханическая обработка (аусформинг). Сталь нагревают до аустенитного состояния. Затем выдерживают при высокой температуре, производят охлаждение до температуры, выше температуры начала мартенситного превращения ($400...600^\circ\text{C}$), но ниже температуры рекристаллизации, и при этой температуре осуществляют обработку давлением и закалку (рис. 8.2 б). Низкотемпературная термомеханическая обработка, хотя и дает более высокое упрочнение, но не снижает склонности стали к отпускной хрупкости. Кроме того, она требует высоких степеней деформации ($75...95\%$), поэтому требуется мощное оборудование. Низкотемпературную термомеханическую обработку применяют к среднеуглеродистым легированным сталям, закаливаемым на мартенсит, которые имеют вторичную стабильность аустенита.

Повышение прочности при термомеханической обработке объясняют тем, что в результате деформации аустенита происходит дробление его зерен (блоков). Размеры блоков уменьшаются в два – четыре раза по сравнению с обычной закалкой. Также увеличивается плотность дислокаций. При последующей закалке такого аустенита образуются более мелкие пластинки мартенсита, снижаются напряжения. Термомеханическую обработку применяют и для других сплавов.

Закалка токами высокой частоты (ТВЧ). Метод разработан советским ученым Вологдиным В.П. Основан на том, что если в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, поместить металлическую деталь, то в ней будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой. Обычно используются машинные генераторы с частотой $50...15000$ Гц и ламповые генераторы с частотой больше 106 Гц. Глубина закаленного слоя – до 2 мм. Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря чему

они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом необходимо постоянство зазора между индуктором и поверхностью изделия.

Схема технологического процесса закалки ТВЧ представлена на рис. 8.3.

После нагрева в течение 3...5 с индуктора 2 деталь 1 быстро перемещается в специальное охлаждающее устройство – спрейер 3, через отверстия которого на нагретую поверхность разбрызгивается закалочная жидкость. Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур. Температура закалки при нагреве токами высокой частоты должна быть выше, чем при обычном нагреве. При правильных режимах нагрева после охлаждения получается структура мелкоигольчатого мартенсита. Твердость повышается на 2...4 HRC по сравнению с обычной закалкой, возрастает износостойкость и предел выносливости.

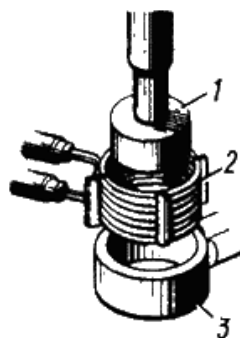


Рис. 8.3. Схема технологического процесса закалки ТВЧ

Перед закалкой ТВЧ изделие подвергают нормализации, а после закалки низкому отпуску при температуре 150...200 °С (самоотпуск). Наиболее целесообразно использовать этот метод для изделий из сталей с содержанием углерода более 0,4 %.

Газопламенная закалка. Нагрев осуществляется ацетиленокислородным, газокислородным или керосинокислородным пламенем с температурой 3000...3200 °С. Структура поверхностного слоя после закалки состоит из мартенсита, мартенсита и феррита. Толщина закаленного слоя 2...4 мм, твердость 50...56 HRC. Метод применяется для закалки крупных изделий, имеющих сложную поверхность (косозубые шестерни, червяки), для закалки стальных и чугунных прокатных валков. Используется в массовом и индивидуальном производстве, а также при ремонтных работах. При нагреве крупных изделий горелки и охлаждающие устройства перемещаются вдоль изделия, или – наоборот.

Старение. Отпуск применяется к сплавам, которые подвергнуты закалке с полиморфным превращением. К материалам, подвергнутым закалке без полиморфного превращения, применяется старение.

Закалка без полиморфного превращения – термическая обработка, фиксирующая при более низкой температуре состояние, свойственное сплаву при более высоких температурах (пересыщенный твердый раствор). Старение – термическая обработка, при которой главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора.

В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твердость, и уменьшается пластичность. Старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсионных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

В стареющих сплавах выделения из твердых растворов встречаются в следующих основных формах:

- тонкопластинчатой (дискообразной);
- равноосной (сферической или кубической);
- игольчатой.

Форма выделений определяется конкурирующими факторами: поверхностной энергией и энергией упругой деформации, стремящимися к минимуму. Поверхностная энергия минимальна для равноосных выделений. Энергия упругих искажений минимальна для выделений

в виде тонких пластин. Основное назначение старения – повышение прочности и стабилизация свойств.

Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации. Естественным старением называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре. Нагрев сплава увеличивает подвижность атомов, что ускоряет процесс. Повышение прочности в процессе выдержки при повышенных температурах называется искусственным старением. Предел прочности, предел текучести и твердость сплава с увеличением продолжительности старения возрастают, достигают максимума и затем снижаются (явление перестаривания). При естественном старении перестаривания не происходит. С повышением температуры стадия перестаривания достигается раньше. Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то также ускоряются процессы, протекающие при старении – это деформационное старение.

Старение охватывает все процессы, происходящие в пересыщенном твердом растворе: процессы, подготавливающие выделение, и сами процессы выделения. Для практики большое значение имеет инкубационный период – время, в течение которого в закаленном сплаве совершаются подготовительные процессы, когда сохраняется высокая пластичность. Это позволяет проводить холодную деформацию после закалки. Если при старении происходят только процессы выделения, то явление называется дисперсионным твердением.

После старения повышается прочность и снижается пластичность низкоуглеродистых сталей в результате дисперсных выделений в феррите цементита третичного и нитридов.

Старение является основным способом упрочнения алюминиевых и медных сплавов, а также многих жаропрочных сплавов.

Обработка стали холодом. Высокоуглеродистые и многие легированные стали имеют температуру конца мартенситного превращения (M_k) ниже 0°C . Поэтому в структуре стали после закалки наблюдается значительное количество остаточного аустенита, который снижает твердость изделия, а также ухудшает магнитные характеристики. Для устранения аустенита остаточного проводят дополнительное охлаждение детали в области отрицательных температур, до температуры ниже t_{Mk} (-80°C). Обычно для этого используют сухой лед. Такая обработка называется обработкой стали холодом. Обработку холодом необходимо проводить сразу после закалки, чтобы не допустить стабилизации аустенита. Увеличение твердости после обработки холодом обычно составляет 1...4 HRC. После обработки холодом сталь подвергают низкому отпуску, так как обработка холодом не снижает внутренних напряжений. Обработке холодом подвергают детали шарикоподшипников, точных механизмов, измерительные инструменты.

Упрочнение методом пластической деформации. Основное назначение методов механического упрочнения поверхности – повышение усталостной прочности. Методы механического упрочнения – наклепывание поверхностного слоя на глубину 0,2...0,4 мм. Разновидностями являются дробеструйная обработка и обработка роликами.

Дробеструйная обработка – обработка дробью поверхности готовых деталей. Осуществляется с помощью специальных дробеструйных установок, выбрасывающих стальную или чугунную дробь на поверхность обрабатываемых деталей. Диаметр дроби – 0,2...4 мм. Удары дроби вызывают пластическую деформацию на глубину 0,2...0,4 мм. Применяют для упрочнения деталей в канавках, на выступах. Подвергают изделия типа пружин, рессор, звенья цепей, гусениц, гильзы, поршни, зубчатые колеса.

При обработке роликами деформация осуществляется давлением ролика из твердого металла на поверхность обрабатываемого изделия. При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит наклеп на нужную глубину. Обработка улучшает микрогеометрию. Создание остаточных напряжений сжатия повышает предел усталости и долговечность изделия. Обкатка роликами применяется при обработке шеек валов, проволоки, при калибровке труб, прутков. Не требуется специальное оборудование, можно использовать токарные или строгальные станки.

Л.9. Композиционные материалы.
Материалы порошковой металлургии: пористые, конструкционные и др.
Неметаллические материалы

Композиционные материалы

Композиционные материалы – искусственно созданные материалы, которые состоят из двух или более компонентов, различающихся по составу и разделенных выраженной границей, и которые имеют новые свойства, запроектированные заранее. Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, непрерывный во всем объеме композиционного материала, называется матрицей. Компонент прерывистый, разделенный в объеме композиционного материала, называется арматурой. Матрица придает требуемую форму изделию, влияет на создание свойств композиционного материала, защищает арматуру от механических повреждений и других воздействий среды.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные свойства: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Вместо термина армирующий компонент можно использовать термин наполнитель.

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице, а также природе компонентов.

По геометрии наполнителя композиционные материалы подразделяются на три группы:

- с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- с одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превышает два других;
- с двумерными наполнителями, два размера которых значительно превышают третий.

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

- с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;
- с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его расположении.

По природе компонентов композиционные материалы разделяются на четыре группы:

- композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений эпоксидных, полиэфирных, фенольных и др.

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними. Максимальная прочность достигается, если между матрицей и арматурой происходит образование твердых растворов или химических соединений.

В композиционных материалах с нуль-мерным наполнителем наибольшее распространение получила металлическая матрица. Композиции на металлической основе упрочняются

равномерно распределенными дисперсными частицами различной дисперсности. Такие материалы отличаются изотропностью свойств. В таких материалах матрица воспринимает всю нагрузку, а дисперсные частицы наполнителя препятствуют развитию пластической деформации. Эффективное упрочнение достигается при содержании 5...10 % частиц наполнителя. Армирующими наполнителями служат частицы тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов.

Дисперсионно упрочненные композиционные материалы получают методами порошковой металлургии или вводят частицы армирующего порошка в жидкий расплав металла или сплава. Промышленное применение нашли композиционные материалы на основе алюминия, упрочненные частицами оксида алюминия (Al_2O_3). Их получают прессованием алюминиевой пудры с последующим спеканием (САП). Преимущества САП проявляются при температурах выше 300 °С, когда алюминиевые сплавы разупрочняются. Дисперсионно упрочненные сплавы сохраняют эффект упрочнения до температуры 0,8 Тпл.

Сплавы САП удовлетворительно деформируются, легко обрабатываются резанием, свариваются аргонодуговой и контактной сваркой. Из САП выпускают полуфабрикаты в виде листов, профилей, труб, фольги. Из них изготавливают лопатки компрессоров, вентиляторов и турбин, поршневые штоки.

В композиционных материалах с одномерными наполнителями упрочнителями являются одномерные элементы в форме нитевидных кристаллов, волокон, проволоки, которые скрепляются матрицей в единый монолит. Важно, чтобы прочные волокна были равномерно распределены в пластичной матрице. Для армирования композиционных материалов используют непрерывные дискретные волокна с размерами в поперечном сечении от долей до сотен микрометров.

Материалы, армированные нитевидными монокристаллами, были созданы в начале семидесятых годов для авиационных и космических конструкций. Основным способом выращивания нитевидных кристаллов является выращивание их из перенасыщенного пара (ПК-процесс). Для производства особо высокопрочных нитевидных кристаллов оксидов и других соединений осуществляется рост по П-Ж-К – механизму: направленный рост кристаллов происходит из парообразного состояния через промежуточную жидкую фазу.

Осуществляется создание нитевидных кристаллов вытягиванием жидкости через фильеры. Прочность кристаллов зависит от сечения и гладкости поверхности. Композиционные материалы этого типа перспективны как высокожаропрочные материалы. Для увеличения к.п.д. тепловых машин лопатки газовых турбин изготавливают из никелевых сплавов, армированных нитями сапфира (Al_2O_3), это позволяет значительно повысить температуру на входе в турбину (предел прочности сапфировых кристаллов при температуре 1680 °С выше 700 МПа). Армирование сопел ракет из порошков вольфрама и молибдена производят кристаллами сапфира как в виде войлока, так и отдельных волокон, в результате этого удалось удвоить прочность материала при температуре 1650 °С. Армирование пропиточного полимера стеклотекстолитов нитевидными волокнами увеличивает их прочность. Армирование литого металла снижает его хрупкость в конструкциях. Перспективно упрочнение стекла неориентированными нитевидными кристаллами.

Для армирования композиционных материалов применяют металлическую проволоку из разных металлов: стали разного состава, вольфрама, ниобия, титана, магния – в зависимости от условий работы. Стальная проволока перерабатывается в тканые сетки, которые используются для получения композиционных материалов с ориентацией арматуры в двух направлениях.

Для армирования легких металлов применяются волокна бора, карбида кремния. Особенно ценными свойствами обладают углеродистые волокна, их применяют для армирования металлических, керамических и полимерных композиционных материалов.

Эвтектические композиционные материалы – сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой выступают ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. В отличие от обычных композиционных материалов, эвтектические получают за одну операцию. Направленная

ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Форма образующихся кристаллов может быть в виде волокон или пластин. Способами направленной кристаллизации получают композиционные материалы на основе алюминия, магния, меди, кобальта, титана, ниобия и других элементов, поэтому они используются в широком интервале температур.

Полимерные композиционные материалы. Особенностью является то, что матрицу образуют различные полимеры, служащие связующими для арматуры, которая может быть в виде волокон, ткани, пленок, стеклотекстолита. Формирование полимерных композиционных материалов осуществляется прессованием, литьем под давлением, экструзией, напылением. Широкое применение находят смешанные полимерные композиционные материалы, куда входят металлические и полимерные составляющие, которые дополняют друг друга по свойствам. Например, подшипники, работающие в условиях сухого трения, изготавливают из комбинации фторопласта и бронзы, что обеспечивает самосмазываемость и отсутствие ползучести. Созданы материалы на основе полиэтилена, полистирола с наполнителями в виде асбеста и других волокон, обладающие высокими прочностью и жесткостью.

Материалы порошковой металлургии

Порошковая металлургия – область техники, охватывающая процессы получения порошков металлов и металлоподобных соединений и процессы изготовления изделий из них без расплавления. Характерной особенностью порошковой металлургии является применение исходного материала в виде порошков, из которых прессованием формуется изделия заданной формы и размеров. Полученные заготовки подвергаются спеканию при температуре ниже температуры плавления основного компонента. Основными достоинствами технологии производства изделий методом порошковой металлургии являются:

- возможность изготовления деталей из тугоплавких металлов и соединений, когда другие методы использовать невозможно;
- значительная экономия металла за счет получения изделий высокой точности, в минимальной степени нуждающихся в последующей механической обработке (отходы составляют не более 1...3 %);
- возможность получения материалов максимальной чистоты;
- простота технологии порошковой металлургии.

Методом порошковой металлургии изготавливают твердые сплавы; пористые материалы: антифрикционные и фрикционные; фильтры; электропроводники; конструкционные детали, в том числе работающие при высоких температурах и в агрессивных средах.

Пористые порошковые материалы. Отличительной особенностью является наличие равномерной объемной пористости, которая позволяет получать требуемые эксплуатационные свойства. Антифрикционные материалы (пористость 15...30 %), широко применяющиеся для изготовления подшипников скольжения, представляют собой пористую основу, пропитанную маслом. Масло поступает из пор на поверхность, и подшипник становится самосмазывающимся, не требуется подводить смазку извне. Это существенно для чистых производств (пищевая, фармацевтическая отрасли). Такие подшипники почти не изнашивают поверхность вала, шум в 3...4 раза меньше, чем от шариковых подшипников. Подшипники работают при скоростях трения до 6 м/с при нагрузках до 600 МПа. При меньших нагрузках скорости скольжения могут достигать 20...30 м/с. Коэффициент трения подшипников – 0,04...0,06. Для изготовления используются бронзовые или железные порошки с добавлением графита (1...3 %). Разработаны подшипниковые спеченные материалы на основе тугоплавких соединений (боридов, карбидов и др.), содержащие в качестве твердой смазки сульфиды, селениды и гексагональный нитрид бора. Подшипники могут работать в условиях вакуума и при температурах до 500 °С. Применяют металлопластмассовые антифрикционные материалы: спеченные бронзографиты, титан, нержавеющие стали пропитывают фторопластом. Получаются коррозионно-стойкие и износостойкие изделия. Срок службы металлопластмассовых материалов вдвое больше, чем материалов других типов.

Фрикционные материалы (пористость 10...13 %) предназначены для работы в муфтах сцепления и тормозах. Условия работы могут быть очень тяжелыми: трущиеся поверхности мгновенно нагреваются до 1200 °С, а материал в объеме – до 500...600 °С. Применяют спеченные многокомпонентные материалы, которые могут работать при скоростях трения до 50 м/с на нагрузках 350...400 МПа. Коэффициент трения при работе в масле – 0,08...0,15, при сухом трении – до 0,7. По назначению компоненты фрикционных материалов разделяют на группы:

а) основа – медь и ее сплавы – для рабочих температур 500...600 °С, железо, никель и сплавы на их основе – для работы при сухом трении и температурах 1000...1200 °С;

б) твердые смазки – предотвращают микросхватывание при торможении и предохраняют фрикционный материал от износа; используют свинец, олово, висмут, графит, сульфиты бора и железа, нитрид бора;

в) материалы, обеспечивающие высокий коэффициент трения – асбест, кварцевый песок, карбиды бора, кремния, хрома, титана, оксиды алюминия и хрома и др.

Примерный состав сплава: медь – 60...70 %, олово – 7 %, свинец – 5 %, цинк – 5...10 %, железо – 5...10 %, кремнезем или карбид кремния – 2...3 %, графит – 1...2 %.

Из фрикционных материалов изготавливают тормозные накладки и диски. Так как прочность этих материалов мала, то их прикрепляют к стальной основе в процессе изготовления (припекают к основе) или после (приклепывают, приклеивают и т.д.).

Фильтры (пористость 25...50 %) из спеченных металлических порошков по своим эксплуатационным характеристикам превосходят другие фильтрующие материалы, особенно когда требуется тонкая фильтрация. Они могут работать при температурах от –273 °С до 900 °С, быть коррозионно-стойкими и жаропрочными (можно очищать горячие газы). Спекание позволяет получать фильтрующие материалы с относительно прямыми тонкими порами одинакового размера. Изготавливают фильтры из порошков коррозионно-стойких материалов: бронзы, нержавеющей стали, никеля, серебра, латуни и др. Для удовлетворения запросов металлургической промышленности разработаны материалы на основе никелевых сплавов, титана, вольфрама, молибдена и тугоплавких соединений. Такие фильтры работают тысячи часов и поддаются регенерации в процессе работы. Их можно продуть, протравить, прожечь. Фильтрующие материалы выпускают в виде чашечек, цилиндров, втулок, дисков, плит. Размеры колеблются от дисков диаметром 1,5 мм до плит размерами 450×1000 мм. Наиболее эффективно применение фильтров из нескольких слоев с различной пористостью и диаметром пор.

Прочие пористые изделия. «Потеющие сплавы» – материалы, через стенки которых к рабочей наружной поверхности детали поступает жидкость или газ. Благодаря испарению жидкости температура поверхности понижается (лопатки газовых турбин). Сплавы выпускаются на основе порошка нихрома с порами диаметром до 10...12 мкм при пористости 30 %. Сплавы этого типа используются и для решения обратной задачи: крылья самолетов покрывают пористым медно-никелевым слоем и подают через него на поверхность антифриз, препятствующий обледенению.

Пеноматериалы – материалы с очень высокой пористостью, 95...98 %. Например, плотность вольфрама 19,3 г/см³, а пеновольфрама – всего 3 г/см³. Такие материалы используют в качестве легких заполнителей и теплоизоляции в авиационной технике.

Конструкционные порошковые материалы.

Спеченные стали. Типовыми порошковыми деталями являются кулачки, корпуса подшипников, ролики, звездочки распределительных валов, детали пишущих и вычислительных машин и другие. В основном это слабонагруженные детали, их изготавливают из порошка железа и графита. Средненагруженные детали изготавливают или двукратным прессованием – спеканием, или пропиткой спеченной детали медью или латунью. Детали сложной конфигурации (например, две шестерни на трубчатой оси) получают из отдельных заготовок, которые насаживают одну на другую с натягом и производят спекание. Для изготовления этой группы деталей используют смеси железо – медь – графит, железо – чугун, железо – графит – легирующие элементы. Особое место занимают шестерни и поршневые кольца. Шестерни в

зависимости от условий работы изготавливают из железо – графита или из железо – графита с медью или легирующими элементами. Снижение стоимости шестерни при переходе с нарезки зубьев на спекание порошка составляет 30...80 %. Пропитка маслом позволяет обеспечить самосмазываемость шестерни, уменьшить износ и снизить шум при работе. Спеченные поршневые кольца изготавливают из смеси железного порошка с графитом, медью и сульфидом цинка (твердая смазка). Для повышения износостойкости делают двухслойные кольца: во внешний слой вводят хром и увеличивают содержание графита. Применение таких колец увеличивает пробег автомобильного двигателя, уменьшает его износ и сокращает расход масла. Высоколегированные порошковые стали, содержащие 20 % хрома и 15 % никеля, используют для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах.

Спеченные цветные металлы. Спеченный титан и его сплавы используют в виде полуфабрикатов (лист, трубы, прутки). Титановый каркас пропитывают магнием. Такие материалы хорошо обрабатываются давлением. Широко используются материалы на основе меди, например, изготавливают бронзу – графитные шестерни. Свойства спеченных латуней выше, чем литых, из-за большей однородности химического состава и отсутствия посторонних включений. Спеченные алюминиевые сплавы используют для изготовления поршней тяжело нагруженных двигателей внутреннего сгорания и других изделий, длительное время работающих при повышенных температурах, благодаря их повышенной жаропрочности и коррозионной стойкости.

Керамикометаллические материалы (керметы) содержат более 50 % керамической фазы. В качестве керамической фазы используют тугоплавкие бориды, карбиды, оксиды и нитриды, в качестве металлической фазы – кобальт, никель, тугоплавкие металлы, стали. Керметы отличаются высокими жаростойкостью, износостойкостью, твердостью, прочностью. Они используются для изготовления деталей конструкций, работающих в агрессивных средах при высоких температурах (например, лопаток турбин, чехлов термопар). Частным случаем керметов являются твердые сплавы.

Неметаллические материалы

К неметаллическим материалам относятся полимерные материалы органические и неорганические: различные виды пластических масс, композиционные материалы на неметаллической основе, каучуки и резины, клеи, герметики, лакокрасочные покрытия, а также графит, стекло, керамика.

Такие их свойства, как достаточная прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, светопрозрачность, химическая стойкость, диэлектрические свойства, делают эти материалы часто незаменимыми. Они находят все большее применение в различных отраслях машиностроения.

Пластические массы. Пластмассами называют искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. Обязательным компонентом пластмассы является связующее вещество. В качестве связующих для большинства пластмасс используют синтетические смолы, реже применяют эфиры целлюлозы. Другим важным компонентом пластмасс является наполнитель (порошкообразные, волокнистые и другие вещества). Наполнители повышают механические свойства, снижают усадку при прессовании и придают материалу те или иные специфические свойства. Свойства пластмасс зависят от состава отдельных компонентов, их сочетания и количественного отношения, что позволяет изменять характеристики пластиков в достаточно широких пределах.

Термопластичные пластмассы. В основе термопластичных пластмасс лежат полимеры линейной или разветвленной структуры, иногда в состав полимеров вводят пластификаторы.

Неполярные термопластичные пластмассы. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол и фторопласт-4.

Полиэтилен – продукт полимеризации бесцветного газа этилена, относящийся к кристаллизующимся полимерам. Чем выше плотность и кристалличность полиэтилена, тем выше прочность и теплостойкость материала. Он химически стоек и при нормальной темпера-

туре нерастворим ни в одном из известных растворителей. Недостаток его подверженность старению. Применяют для изготовления труб, пленок, литых и прессованных несиловых деталей.

Полипропилен является производной этилена. Это жесткий нетоксичный материал с высокими физико-механическими свойствами. Нестабильный полипропилен подвержен быстрому старению. Недостаток полипропилена его невысокая морозостойкость – 10... – 20 °С.

Полистирол – твердый, жесткий, прозрачный, аморфный полимер. Удобен для механической обработки, хорошо окрашивается, растворим в бензине. Недостаток его невысокая теплостойкость, склонность к старению и образованию трещин. Из полистирола изготавливают детали для радиотехники, телевидения и приборов, сосуды для воды и многое другое.

Фторопласт-4 является аморфно-кристаллическим полимером. Разрушение материала происходит при температуре выше 415 °С. Он стоек к воздействию растворителей, кислот, щелочей и растворителей, не смачивается водой. Недостатки – хладотекучесть. Применяют для изготовления труб, вентилях, кранов, насосов, мембран, уплотнительных прокладок, манжет и др.

Полярные термопластичные пластмассы.

Фторопласт-3 – полимер трифторхлорилена. Его используют как низкочастотный диэлектрик. Кроме того, из него изготавливают трубы, шланги, клапаны, насосы, защитные покрытия металлов и др.

Органическое стекло – это прозрачный аморфный термопласт на основе сложный эфиров акриловой и метакриловой кислот. Материал более чем в 2 раза легче минеральных стекол, отличается высокой атмосферостойкостью, оптически прозрачен. Недостатки невысокая поверхностная твердость. Применяют для изготовления штампов, литейных моделей и абразивного инструмента.

Поливинилхлорид является аморфным полимером. Изготавливают трубы, детали вентиляционных установок, теплообменников, строительные облицовочные плитки.

Полиамиды – это группа пластмасс с известными названиями капрон, нейлон, анид и др. Они продолжительное время могут работать на истирание, ударопрочны, способны поглощать вибрацию. Стойки к щелочам, бензину, спирту, устойчивы в тропических условиях. Из них изготавливают шестерни, подшипники, болты, гайки, шкивы и др.

Полиуретаны в зависимости от исходных веществ, применяемых при получении, могут обладать различными свойствами, быть твердыми, эластичными и даже термореактивными.

Полиэтилентерефталат – сложный полиэфир, в России выпускается под названием лавсан, за рубежом – майлар, терилен. Из лавсана изготавливают шестерни, кронштейны, канаты, ремни, ткани, пленки и др.

Термостойкие пластики.

Ароматический полиамид – фенилон. Из фенилона изготавливают подшипники, зубчатые колеса, детали электрорадиопередатчиков.

Полибензимидазолы являются ароматическими гетероциклическими полимерами. Обладают высокой термостойкостью, хорошими прочностными показателями. Применяют в виде пленок, волокон, тканей специальных костюмов.

Термореактивные пластмассы.

Пластмассы с порошковым наполнителями (волокниты, асбоволокниты, стекловолокниты). Волокниты представляют собой композиции из волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка, пропитанного фенолоформальдегидными связующими. Применяют для изготовления деталей работающих на изгиб и кручение. Асбоволокниты содержат наполнителем асбест, связующее фенолоформальдегидная смола. Из него получают кислотоупорные аппараты, ванны и трубы.

Слоистые пластмассы (гетинакс, текстолит, древеснослоистые пластики, асботесолит) являются силовыми конструкционными и поделочными материалами. Листовые наполнители придают пластику анизотропность. Материалы выпускают в виде листов, плит, труб, заготовок, из которых механической обработкой получают различные детали.

Газонаполненные пластмассы. Представляют собой гетерогенные дисперсные системы, состоящие из твердой и газообразной фаз.

Пенопласты – материалы с ячеистой структурой, в которых газообразные наполнители изолированы друг от друга и от окружающей среды тонкими слоями полимерного связующего. Обладают хорошей плавучестью и высокими теплоизоляционными свойствами. Применяют для теплоизоляционных кабин, контейнеров, приборов, холодильников, рефрижераторов, труб и т.п. Мягкие и эластичные пенопласты применяют для амортизаторов, мягких сидений, губок.

Сотопласты изготавливают из тонких листовых материалов. Для них характерны достаточно высокие теплоизоляционные, электроизоляционные свойства и радиопрозрачность. Применяют в виде заполнителей многослойных панелей в авиа- и судостроении для несущих конструкций.

Резиновые материалы. Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) каучука и серы с различными добавками. Резина отличается от других материалов высокими эластическими свойствами, которые присущи каучуку – главному исходному материалу резины. Для резиновых материалов характерна высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность.

Различают резины общего назначения (вулканизаторы неполярных каучуков (вулканизируют серой) – НК, СКБ, СКС, СКИ), а также резины специального назначения (маслобензостойкие, теплостойкие, морозостойкими).

Клеящиеся материалы и герметики. Клеи и герметики относятся к пленкообразующим материалам и имеют много общего с ними. Эти растворы или расплавы полимеров, а также неорганические вещества, которые наносятся на какую-либо поверхность. После высыхания образуют прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам.

Конструкционные смоляные и резиновые клеи.

Смоляные клеи. В качестве пленкообразующих веществ этой группы клеев применяют терморезактивные смолы, которые отверждаются в присутствии катализаторов и отвердителей при нормальной или повышенной температуре.

Клеи на основе модифицированных фенолоформальдегидных смол. Эти клеи применяют преимущественно для склеивания металлических силовых элементов, конструкций из стеклопластика.

Фенолкаучуковые композиции являются эластичными теплостойкими пленками с высокой адгезией к металлам (ВК-32-200, ВК-3, ВК-4, ВК-13 и др.) .

Полиуретановые клеи. Композиции могут быть холодного и горячего отверждения. Клеи обладают универсальной адгезией, хорошей вибростойкостью и прочностью при неравномерном отрыве, стойкостью к нефтяным топливам и маслам. Помимо этих видов клеев существует множество других.

Неорганические клеи. Эти клеи являются высокотемпературными.

Керамические клеи являются тонкими суспензиями оксидов щелочных металлов в воде. Такие клеи наносятся на склеиваемые поверхности, подсушиваются, а затем при небольшом давлении нагреваются до температуры плавления компонентов и выдерживаются в течение 15...20 мин.

Силикатные клеи. Жидкое стекло обладает клеящей способностью, им можно склеивать стекло, керамику, стекло с металлом.

Герметики. Герметики применяют для уплотнения и герметизации клепанных, сварных и болтовых соединений, топливных отсеков и баков, различных металлических конструкций, приборов, агрегатов. Тиоколовые герметики применяют в авиационной и автомобильной промышленности, в судостроении, для строительной техники. У них высокая адгезия к металлам, древесине, бетону. Они стойки к топливу и маслам. Эпоксидные герметики могут быть холодного и горячего отверждения; работают в условиях тропической влажности, при вибрационных и ударных нагрузках; применяются для герметизации металлических и стеклопластиковых изделий.

Неорганические материалы.

Графит является одной из аллотропических разновидностей углерода. Это полимерный материал кристаллического пластинчатого строения. Графит не плавится при атмосферном давлении. Графит встречается в природе, а также получается искусственным путем. Пиролитический графит получается из газообразного сырья. Его наносят в виде покрытия на различные материалы с целью защиты их от воздействия высоких температур. Пирографит — объемная масса $1950 \dots 2200 \text{ кг/м}^3$, пористость 1,5%, модуль упругости 112/70 ГПа.

Неорганическое стекло следует рассматривать как особого вида затвердевший раствор — сложной расплав высокой вязкости кислотных и основных оксидов. Механические свойства стекла характеризуются высоким сопротивлением сжатию (500...2000 МПа), низким пределом прочности при растяжении (30...90 МПа) и изгибе (50...150 МПа). Более высокие механические характеристики имеют стекла бесщелочного состава и кварцевые.

Керамические материалы. Керамика неорганический материал, получаемый отформованных масс в процессе высокотемпературного обжига. Керамика на основе чистых оксидов. Оксидная керамика обладает высокой прочностью при сжатии по сравнению с прочностью при растяжении или изгибе; более прочными являются мелкокристаллические структуры. С повышением температуры прочность керамики понижается. Керамика из чистых оксидов, как правило, не подвержена процессу окисления.

Бескислородная керамика. Материалы обладают высокой хрупкостью. Сопротивление окислению при высоких температурах карбидов и боридов составляет $900 \dots 1000^\circ\text{C}$, несколько ниже оно у нитридов. Силициды могут выдерживать температуру $1300 \dots 1700^\circ\text{C}$ (на поверхности образуется пленка кремнезема).

Л.10. Основы металлургического производства. Производство чугуна, стали и цветных металлов

Современное металлургическое производство представляет собой комплекс различных производств, базирующихся на месторождениях руд и коксующихся углей, энергетических комплексах. Оно включает:

- шахты и карьеры по добыче руд и каменных углей;
- горно-обогатительные комбинаты, где обогащают руды, подготавливая их к плавке;
- коксохимические заводы (подготовка углей, их коксование и извлечение из них полезных химических продуктов);
- энергетические цехи для получения сжатого воздуха (для дутья доменных печей), кислорода, очистки металлургических газов;
- доменные цехи для выплавки чугуна и ферросплавов или цехи для производства железорудных металлизированных окатышей;
- заводы для производства ферросплавов;
- сталеплавильные цехи (конвертерные, мартеновские, электросталеплавильные);
- прокатные цехи (слиток в сортовой прокат).

Основная продукция черной металлургии:

- чугуны: переплавный, используемый для передела на сталь, и литейный, для производства фасонных отливок;
- железорудные металлизированные окатыши для выплавки стали;
- ферросплавы (сплавы железа с повышенным содержанием марганца, кремния, ванадия, титана и т.д.) для легированных сталей;
- стальные слитки для производства проката,
- стальные слитки для изготовления крупных кованых валов, дисков (кузнечные слитки).

Основная продукция цветной металлургии:

- слитки цветных металлов для производства проката;
- слитки для изготовления отливок на машиностроительных заводах;

- лигатуры – сплавы цветных металлов с легирующими элементами для производства сложных легированных сплавов;
- слитки чистых и особо чистых металлов для приборостроения и электротехники.

Для производства чугуна, стали и цветных металлов используют руду, флюсы, топливо, огнеупорные материалы.

Промышленная руда – горная порода, из которой целесообразно извлекать металлы и их соединения (содержание металла в руде должно быть не менее 30...60 % для железа, 3...5% для меди, 0,005...0,02 % для молибдена). В зависимости от содержания добываемого элемента различают руды богатые и бедные. Бедные руды обогащают – удаляют часть пустой породы.

Флюсы – материалы, загружаемые в плавильную печь для образования легкоплавкого соединения с пустой породой руды или концентратом и золой топлива. Такое соединение называется шлаком. Обычно шлак имеет меньшую плотность, чем металл, поэтому он располагается над металлом и может быть удален в процессе плавки. Шлак защищает металл от печных газов и воздуха. Он бывает кислым и основным.

Топливо – в металлургических печах используется кокс, природный газ, мазут, доменный (колошниковый) газ. Кокс получают сухой перегонкой при температуре 1000 °С (без доступа воздуха) каменного угля коксующихся сортов. В коксе содержится 80...88 % углерода, 8...12 % золы, 2...5 % влаги. Куски кокса должны иметь размеры 25...60 мм. Это прочное неспекающееся топливо, служит не только горючим для нагрева, но и химическим реагентом для восстановления железа из руды.

Огнеупорные материалы применяют для изготовления внутреннего облицовочного слоя (футеровки) металлургических печей и ковшей для расплавленного металла. По химическим свойствам огнеупорные материалы разделяют на группы: кислые (кварцевый песок, диносовый кирпич), основные (магнезитовый кирпич, магнезитохромитовый кирпич), нейтральные (шамотный кирпич).

Производство чугуна

Для выплавки чугуна в доменных печах используют железные руды, топливо, флюсы.

К железным рудам относятся:

- магнитный железняк (Fe_3O_4) с содержанием железа 55...60 %, месторождения – Соколовское, Курская магнитная аномалия (КМА);
- красный железняк (Fe_2O_3) с содержанием железа 55...60 %, месторождения – Кривой Рог, КМА;
- бурый железняк (гидраты оксидов железа $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$) с содержанием железа 37...55 % – Керчь;
- марганцевые руды применяются для выплавки сплава железа с марганцем – ферромарганца (10...82 % Mn), а также передельных чугунов, содержащих до 1% марганца. Марганец в рудах содержится в виде окислов и карбонатов: MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , MnCO_3 и др.);
- хромовые руды применяются для производства феррохрома, металлического хрома и огнеупорных материалов – хромомagneзитов.

Топливом для доменной плавки служит кокс, возможна частичная замена газом, мазутом.

Флюсом является известняк CaCO_3 или доломитизированный известняк, содержащий CaCO_3 и MgCO_3 , так как в шлак должны входить основные оксиды (CaO , MgO), которые необходимы для удаления серы из металла.

Подготовка руд к доменной плавке осуществляется для повышения производительности доменной печи, снижения расхода кокса и улучшения качества чугуна. Метод подготовки зависит от качества руды.

Выплавка чугуна

Чугун выплавляют в печах шахтного типа – доменных печах. Сущность процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении оксидов железа, входящих в состав руды оксидом углерода, водородом и твердым углеродом, выделяющимся при сгорании топлива.

При выплавке чугуна решаются задачи:

- восстановление железа из окислов руды, науглероживание его и удаление в виде жидкого чугуна определенного химического состава;
- оплавление пустой породы руды, образование шлака, растворение в нем золы кокса и удаление его из печи.

Доменная печь (рис. 10.1) имеет стальной кожух, выложенный огнеупорным шамотным кирпичом. Рабочее пространство печи включает колошник 6, шахту 5, распар 4, заплечики 3, горн 1, лещадь 15. В верхней части колошника находится засыпной аппарат 8, через который в печь загружают шихту. Шихту подают в вагонетки 9 подъемника, которые передвигаются по мосту 12 к засыпному аппарату и, опрокидываясь, высыпая шихту в приемную воронку 7 распределителя шихты. При опускании малого конуса 10 шихта попадает в чашу 11, а при опускании большого конуса 13 – в доменную печь, что предотвращает выход газов из доменной печи в атмосферу. При работе печи шихтовые материалы, проплавляясь, опускаются, а через загрузочное устройство подают новые порции шихты, чтобы весь полезный объем был заполнен.

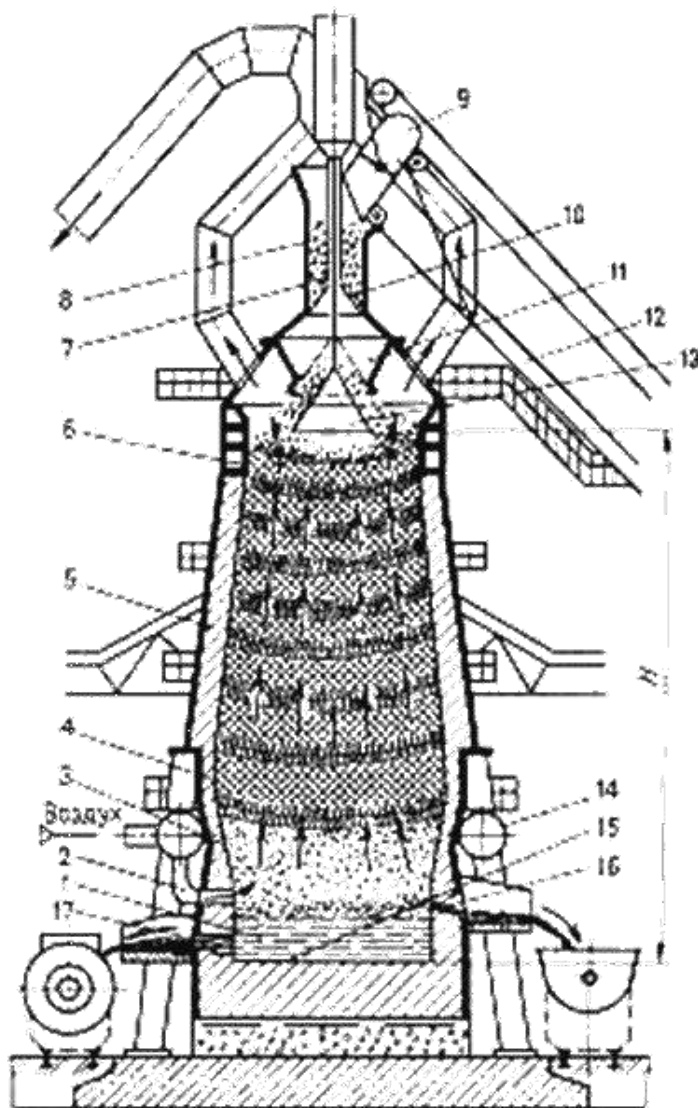


Рис. 10.1. Устройство доменной печи

Полезный объем печи – объем, занимаемый шихтой от лещади до нижней кромки большого конуса засыпного аппарата при его опускании. Полезная высота доменной печи

(Н) достигает 35 м, а полезный объем – 2000...5000 м³.

В верхней части горна находятся фурменные устройства 14, через которые в печь поступает нагретый воздух, необходимый для горения топлива. Воздух поступает из воздухонагревателя, внутри которого имеются камера сгорания и насадка из огнеупорного кирпича, в которой имеются вертикальные каналы. В камеру сгорания к горелке подается очищенный доменный газ, который, сгорая, образует горячие газы. Проходя через насадку, газы нагревают ее и удаляются через дымовую трубу. Через насадку пропускается воздух, он нагревается до температуры 1000...1200 °С и поступает к фурменному устройству, а оттуда через фурмы 2 – в рабочее пространство печи. После охлаждения насадок нагреватели переключаются.

Вблизи фурм природный газ и углерод кокса, взаимодействуя с кислородом воздуха, сгорают. В результате горения выделяется большое количество теплоты, в печи выше уровня фурм развивается температура выше 2000 °С. Продукты сгорания взаимодействуют с раскаленным коксом. Образуется смесь восстановительных газов, в которой окись углерода СО является главным восстановителем железа из его оксидов. Для увеличения производительности подаваемый в доменную печь воздух увлажняется, что приводит к увеличению содержания восстановителя.

Горячие газы, поднимаясь, отдают теплоту шихтовым материалам и нагревают их, охлаждаясь до 300...400 °С у колошника. Шихта (агломерат, кокс) опускается навстречу потоку газов, и при температуре около 570 °С начинается восстановление оксидов железа.

Восстановление железа в доменной печи. За счет СО и Н₂ восстанавливаются все высшие оксиды железа до низшего и 40...60 % металлического железа. При температуре 1000...1100 °С восстановленное из руды твердое железо, взаимодействуя с оксидом углерода, коксом и сажистым углеродом, интенсивно растворяет углерод. При насыщении углеродом температура плавления понижается и на уровне распара и заплечиков железо расплавляется (при температуре около 1300 °С). Капли железоуглеродистого сплава, протекая по кускам кокса, дополнительно насыщаются углеродом (до 4%), марганцем, кремнием, фосфором, которые при температуре 1200 °С восстанавливаются из руды, и серой, содержащейся в коксе. В нижней части доменной печи образуется шлак в результате сплавления окислов пустой породы руды, флюсов и золы топлива. Шлак образуется постепенно, его состав меняется по мере стекания в горн, где он скапливается на поверхности жидкого чугуна, благодаря меньшей плотности. Состав шлака зависит от состава применяемых шихтовых материалов и выплавляемого чугуна. Чугун выпускают из печи каждые 3...4 часа через чугунную летку 16, а шлак – каждые 1...1,5 часа через шлаковую летку 17 (летка – отверстие в кладке, расположенное выше лещади). Летку открывают бурильной машиной, затем закрывают огнеупорной массой. Сливают чугун и шлак в чугуновозные ковши и шлаковозные чаши. Чугун поступает в кислородно-конвертерные или мартеновские цехи, или разливается в изложницы разливочной машиной, где он затвердевает в виде чушек – слитков массой 45 кг.

Основным продуктом доменной плавки является чугун. Переплавный чугун предназначен для дальнейшего передела в сталь. На его долю приходится 90 % общего производства чугуна. Обычно такой чугун содержит 3,8...4,4 % углерода, 0,3...1,2 % кремния, 0,2...1 % марганца, 0,15...0,20 % фосфора, 0,03...0,07 % серы. Литейный чугун применяется после переплава на машиностроительных заводах для получения фасонных отливок. Кроме чугуна в доменных печах выплавляют ферросплавы – сплавы железа с кремнием, марганцем и другими элементами. Их применяют для раскисления и легирования стали. Побочными продуктами доменной плавки являются шлак и доменный газ. Из шлака изготавливают шлаковату, цемент, удобрения (стараясь получить гранулированный шлак, для этого его выливают на струю воды). Доменный газ после очистки используется как топливо для нагрева воздуха, вдуваемого в печь.

Технико-экономические показатели работы доменных печей:

1. Коэффициент использования полезного объема доменной печи (КИПО) – это отношение полезного объема печи V (м³) к ее среднесуточной производительности P (т) выплавленного чугуна. Чем ниже КИПО, тем выше производительность печи. Для большинства доменных

печей КИПО = 0,5...0,7 (для передовых – 0,45)

2. Удельный расход кокса, K – это отношение расхода кокса за сутки A (т) к количеству чугуна, выплавленного за это же время P (т). Удельный расход кокса в доменных печах составляет 0,5...0,7 (для передовых – 0,36...0,4). K – важный показатель, так как стоимость кокса составляет более 50% стоимости чугуна.

Процессы прямого получения железа из руд. Производство стали

Процессы прямого получения железа из руд. Под процессами прямого получения железа понимают такие химические, электрохимические или химико-термические процессы, которые дают возможность получать непосредственно из руды, минуя доменную печь, металлическое железо в виде губки, крицы или жидкого металла. Такие процессы ведутся, не расходуя металлургический кокс, флюсы, электроэнергию (на подготовку сжатого воздуха), а также позволяют получить очень чистый металл. Методы прямого получения железа известны давно. Опробовано более 70 различных способов, но лишь немногие осуществлены и притом в небольшом промышленном масштабе. В последние годы интерес к этой проблеме вырос, что связано, помимо замены кокса другим топливом, с развитием способов глубокого обогащения руд, обеспечивающих не только высокого содержания железа в концентратах (70...72%), но и почти полное освобождение его от серы и фосфора.

Получение губчатого железа в шахтных печах. Схема процесса представлена на рис. 10.2.

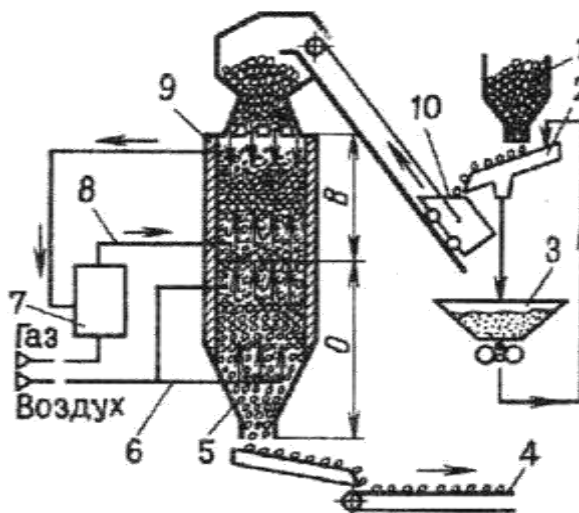


Рис. 10.2. Схема установки для прямого восстановления железа из руд и получения металлизированных окатышей

При получении губчатого железа добытую руду обогащают и получают окатыши. Окатыши из бункера 1 по грохоту 2 поступают в короб 10 шихтозавалочной машины и оттуда в шахтную печь 9, работающую по принципу противотока. Просыпь от окатышей попадает в бункер 3 с брикетировочным прессом и в виде окатышей вновь поступает на грохот 2. Для восстановления железа из окатышей в печь по трубопроводу 8 подают смесь природного и доменного газов, подвергнутую в установке 7 конверсии, в результате которой смесь разлагается на водород и оксид углерода. В восстановительной зоне печи B создается температура 1000...1100 °С, при которой водород и оксид углерода восстанавливают железную руду в окатышах до твердого губчатого железа. Содержание железа в окатышах достигает 90...95 %. Для охлаждения железных окатышей по трубопроводу 6 в зону охлаждения O печи подают воздух. Охлажденные окатыши 5 выдаются на конвейер 4 и поступают на выплавку стали в электропечах.

Восстановление железа в кипящем слое. Мелкозернистую руду или концентрат поме-

щают на решётку, через которую подают водород или другой восстановительный газ под давлением 1,5 МПа. Под давлением водорода частицы руды находятся во взвешенном состоянии, совершая непрерывное движение и образуя «кипящий», «псевдосжиженный» слой. В кипящем слое обеспечивается хороший контакт газа-восстановителя с частицами оксидов железа. На одну тонну восстановленного порошка расход водорода составляет 600...650 м³.

Получение губчатого железа в капсулах-тиглях. Используют карбидокремниевые капсулы диаметром 500 мм и высотой 1500 мм. Шихта загружается концентрическими слоями. Внутренняя часть капсулы заполнена восстановителем – измельченным твердым топливом и известняком (10...15%) для удаления серы. Второй слой – восстанавливаемая измельченная руда или концентрат, окалина, затем еще один концентрический слой – восстановителя и известняка. Установленные на вагонетки капсулы медленно перемещаются в туннельной печи длиной до 140 м, где происходит нагрев, выдержка при 1200 °С и охлаждение в течение 100 часов. Восстановленное железо получают в виде толстостенных труб, их чистят, дробят и измельчают, получая железный порошок с содержанием железа до 99 %, углерода – 0,1...0,2%.

Производство стали. Основными исходными материалами для производства стали являются передельный чугун и стальной лом (скрап). Содержание углерода и примесей в стали значительно ниже, чем в чугуне. Поэтому сущность любого металлургического передела чугуна в сталь – снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки. Железо окисляется в первую очередь при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильных печах. Одновременно с железом окисляются кремний, фосфор, марганец и углерод. Образующийся оксид железа при высоких температурах отдает свой кислород более активным примесям в чугуне, окисляя их.

Процессы выплавки стали осуществляют в три этапа:

Первый этап – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. Температура металла сравнительно невысокая, интенсивно происходит окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей: кремния, марганца и фосфора. Наиболее важная задача этапа – удаление фосфора. Для этого желательно проведение плавки в основной печи. Для удаления фосфора необходимы невысокие температура ванны металла и шлака.

Второй этап – кипение металлической ванны – начинается по мере прогрева до более высоких температур. При повышении температуры более интенсивно протекает реакция окисления углерода, происходящая с поглощением теплоты. Для окисления углерода в металл вводят незначительное количество руды, окалины или вдувают кислород. При реакции оксида железа с углеродом, пузырьки оксида углерода выделяются из жидкого металла, вызывая «кипение ванны». При «кипении» уменьшается содержание углерода в металле до требуемого, выравнивается температура по объему ванны, частично удаляются неметаллические включения, прилипающие к всплывающим пузырькам, а также газы, проникающие в пузырьки. Все это способствует повышению качества металла. Следовательно, этот этап основной в процессе выплавки стали. Также создаются условия для удаления серы. Сера в стали находится в виде сульфида, который растворяется также в основном шлаке. Чем выше температура, тем большее количество сульфида железа растворяется в шлаке и взаимодействует с оксидом кальция.

Третий этап – раскисление стали заключается в восстановлении оксида железа, растворенного в жидком металле. При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей, но в готовой стали кислород – вредная примесь, так как понижает механические свойства стали, особенно при высоких температурах. Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим и диффузионным. Осаждающее раскисление осуществляется введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, алюминия), содержащих элементы, которые обладают большим сродством к кислороду, чем железо. Диффузионное раскисление осуществляется раскислением шлака. Ферромарганец, ферросилиций и алюминий в измельченном виде загружают на поверхность шлака. Раскислители, восстанавливая оксид железа, уменьшают его содержание в шлаке. Следовательно оксид железа, растворенный в стали, переходит в шлак. Образующиеся при этом процессе

оксиды остаются в шлаке, а восстановленное железо переходит в сталь, при этом в стали снижается содержание неметаллических включений и повышается ее качество.

Способы выплавки стали. Чугун переделывается в сталь в различных по принципу действия металлургических агрегатах: мартеновских печах, кислородных конвертерах, электрических печах.

Производство стали в мартеновских печах. Мартеновский процесс (1864-1865, Франция). В период до семидесятых годов являлся основным способом производства стали. Способ характеризуется сравнительно небольшой производительностью, возможностью использования вторичного металла – стального скрапа. Вместимость печи составляет 200...900 т. Способ позволяет получать качественную сталь. Мартеновская печь (рис. 10.3) по устройству и принципу работы является пламенной отражательной регенеративной печью. В плавильном пространстве сжигается газообразное топливо или мазут. Высокая температура для получения стали в расплавленном состоянии обеспечивается регенерацией тепла печных газов. Современная мартеновская печь представляет собой вытянутую в горизонтальном направлении камеру, сложенную из огнеупорного кирпича. Рабочее плавильное пространство ограничено снизу подиной 12, сверху сводом 11, а с боков передней 5 и задней 10 стенками. Подина имеет форму ванны с откосами по направлению к стенкам печи. В передней стенке имеются загрузочные окна 4 для подачи шихты и флюса, а в задней – отверстие 9 для выпуска готовой стали.

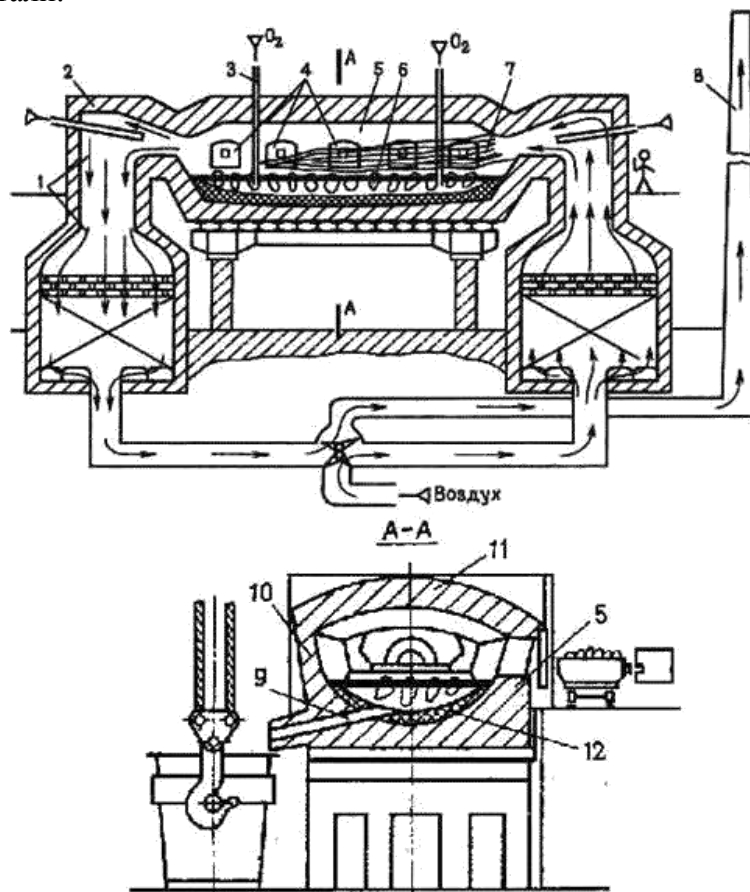


Рис. 10.3. Схема мартеновской печи

Характеристикой рабочего пространства является площадь пода печи, которую подсчитывают на уровне порогов загрузочных окон. С обоих торцов плавильного пространства расположены головки печи 2, которые служат для смешивания топлива с воздухом и подачи этой смеси в плавильное пространство. В качестве топлива используют природный газ, мазут. Для подогрева воздуха и газа при работе на низкокалорийном газе печь имеет два регенератора 1. Регенератор – камера, в которой размещена насадка – огнеупорный кирпич, выложенный в клетку, предназначен для нагрева воздуха и газов. Отходящие от печи газы имеют температуру 1500...1600 °С. Попадая в регенератор, газы нагревают насадку до тем-

пературы 1250°C . Через один из регенераторов подают воздух, который, проходя через насадку нагревается до 1200°C и поступает в головку печи, где смешивается с топливом, на выходе из головки образуется факел 7, направленный на шихту 6. Отходящие газы проходят через противоположную головку (левую), очистные устройства (шлаковики), служащие для отделения от газа частиц шлака и пыли и направляются во второй регенератор. Охлажденные газы покидают печь через дымовую трубу 8. После охлаждения насадки правого регенератора переключают клапаны, и поток газов в печи изменяет направление. Температура факела пламени достигает 1800°C . Факел нагревает рабочее пространство печи и шихту. Факел способствует окислению примесей шихты при плавке. Продолжительность плавки составляет 3...6 часов, для крупных печей – до 12 часов. Готовую плавку выпускают через отверстие, расположенное в задней стенке на нижнем уровне пода. Отверстие плотно забивают малоплакающимися огнеупорными материалами, которые при выпуске плавки выбивают. Печи работают непрерывно, до остановки на капитальный ремонт – 400...600 плавов.

В зависимости от состава шихты, используемой при плавке, различают разновидности мартеновского процесса:

- скрап-процесс, при котором шихта состоит из стального лома (скрапа) и 25...45 % чушкового передельного чугуна, процесс применяют на заводах, где нет доменных печей, но много металлолома.

- скрап-рудный процесс, при котором шихта состоит из жидкого чугуна (55...75 %), скрапа и железной руды, процесс применяют на металлургических заводах, имеющих доменные печи.

Футеровка печи может быть основной и кислой. Если в процессе плавки стали, в шлаке преобладают основные оксиды, то процесс называют основным мартеновским процессом, а если кислые – кислым. Наибольшее количество стали производят скрап-рудным процессом в мартеновских печах с основной футеровкой. В печь загружают железную руду и известняк, а после подогрева подают скрап. После разогрева скрапа в печь заливают жидкий чугун. В период плавления за счет оксидов руды и скрапа интенсивно окисляются примеси чугуна: кремний, фосфор, марганец и, частично, углерод. Оксиды образуют шлак с высоким содержанием оксидов железа и марганца (железистый шлак). После этого проводят период «кипения» ванны: в печь загружают железную руду и продувают ванну подаваемым по трубам 3 кислородом. В это время отключают подачу в печь топлива и воздуха и удаляют шлак. Для удаления серы наводят новый шлак, подавая на зеркало металла известь с добавлением боксита для уменьшения вязкости шлака. В период «кипения» углерод интенсивно окисляется, поэтому шихта должна содержать избыток углерода. На данном этапе металл доводится до заданного химического состава, из него удаляются газы и неметаллические включения. Затем проводят раскисление металла в два этапа. Сначала раскисление идет путем окисления углерода металла, при одновременной подаче в ванну раскислителей – ферромарганца, ферросилиция, алюминия. Окончательное раскисление алюминием и ферросилицием осуществляется в ковше, при выпуске стали из печи. После отбора контрольных проб сталь выпускают в ковш. В основных мартеновских печах выплавляют стали углеродистые конструкционные, низко- и среднелегированные (марганцовистые, хромистые), кроме высоколегированных сталей и сплавов, которые получают в плавильных электропечах. В кислых мартеновских печах выплавляют качественные стали. Применяют шихту с низким содержанием серы и фосфора. Стали содержат меньше водорода и кислорода, неметаллических включений. Следовательно, кислая сталь имеет более высокие механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, ее используют для особо ответственных деталей: коленчатых валов крупных двигателей, роторов мощных турбин, шарикоподшипников.

Основными технико-экономическими показателями производства стали в мартеновских печах являются:

- производительность печи – съем стали с 1 м^2 площади пода в сутки (т/м^2 в сутки), в среднем составляет 10 т/м^2 ;

- расход топлива на 1 т выплавляемой стали, в среднем составляет 80 кг/т.

Производство стали в кислородных конвертерах. Кислородно-конвертерный процесс – выплавка стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кисло-

родом через водоохлаждаемую фурму. Первые опыты в 1933-1934 – Мозговой. В промышленных масштабах – в 1952...1953 г.г. на заводах в Линце и Донавице (Австрия) – получил название ЛД-процесс. В настоящее время способ является основным в массовом производстве стали. Кислородный конвертер – сосуд грушевидной формы из стального листа, футерованный основным кирпичом. Вместимость конвертера – 130...350 т жидкого чугуна. В процессе работы конвертер может поворачиваться на 360° для загрузки скрапа, заливки чугуна, слива стали и шлака. Шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий передельный чугун, стальной лом (не более 30%), известь для наведения шлака, железная руда, а также боксит и плакированный шпат для разжижения шлака. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах представлена на рис. 10.4.

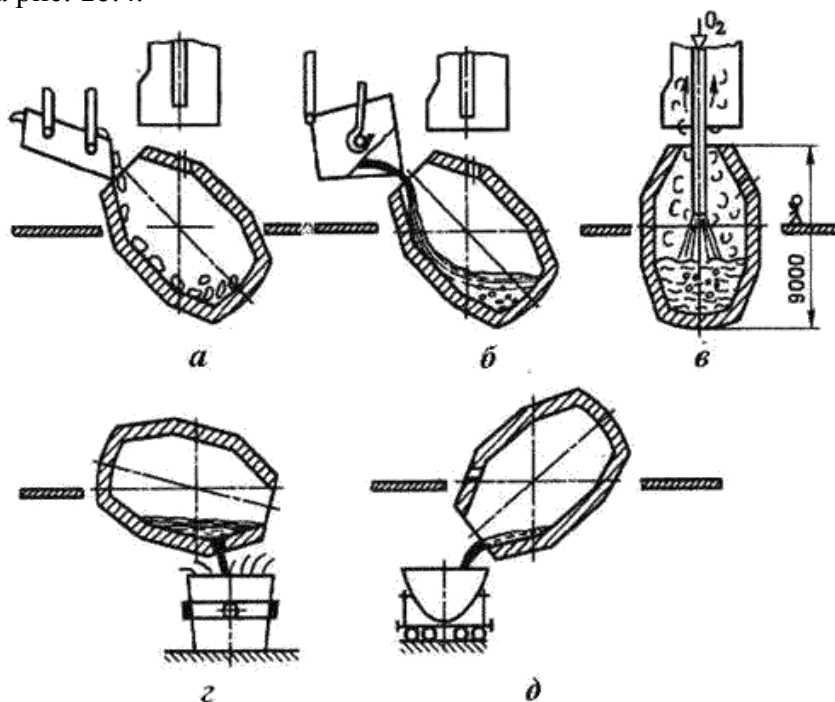


Рис. 10.4. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах

После очередной плавки стали выпускное отверстие заделывают огнеупорной массой и осматривают футеровку, ремонтируют. Перед плавкой конвертер наклоняют, с помощью завалочных машин загружают скрап (рис. 10.4.а), заливают чугун при температуре $1250...1400^{\circ}\text{C}$ (рис. 10.4.б). После этого конвертер поворачивают в рабочее положение (рис. 10.4.в), внутрь вводят охлаждаемую фурму и через нее подают кислород под давлением $0,9...1,4$ МПа. Одновременно с началом продувки загружают известь, боксит, железную руду. Кислород проникает в металл, вызывает его циркуляцию в конвертере и перемешивание со шлаком. Под фурмой развивается температура 2400°C . В зоне контакта кислородной струи с металлом окисляется железо. Оксид железа растворяется в шлаке и металле, обогащая металл кислородом. Растворенный кислород окисляет кремний, марганец, углерод в металле, и их содержание падает. Происходит разогрев металла теплотой, выделяющейся при окислении. Фосфор удаляется в начале продувки ванны кислородом, когда ее температура невысока (содержание фосфора в чугуне не должно превышать 0,15 %). При повышенном содержании фосфора для его удаления необходимо сливать шлак и наводить новый, что снижает производительность конвертера. Сера удаляется в течение всей плавки (содержание серы в чугуне должно быть до 0,07 %). Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода в металле соответствует заданному. После этого конвертер поворачивают и выпускают сталь в ковш (рис. 10.4.г), где раскисляют осаждающим методом ферромарганцем, ферросилицием и алюминием, затем сливают шлак (рис. 10.4.д). В кислородных конвертерах выплавляют стали с различным содержанием углерода, кипящие и спокойные, а также низколегированные

стали. Легирующие элементы в расплавленном виде вводят в ковш перед выпуском в него стали. Плавка в конвертерах вместимостью 130...300 т заканчивается через 25...30 минут.

Производство стали в электропечах. Плавильные электропечи имеют преимущества по сравнению с другими плавильными агрегатами:

- а) легко регулировать тепловой процесс, изменяя параметры тока;
- б) можно получать высокую температуру металла;
- в) возможность создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу и вакуум, что позволяет раскислять металл с образованием минимального количества неметаллических включений.

Электропечи используют для выплавки конструкционных, высоколегированных, инструментальных, специальных сплавов и сталей. Различают дуговые и индукционные электропечи.

Дуговая плавильная печь. Схема дуговой печи показана на рис. 10.5.

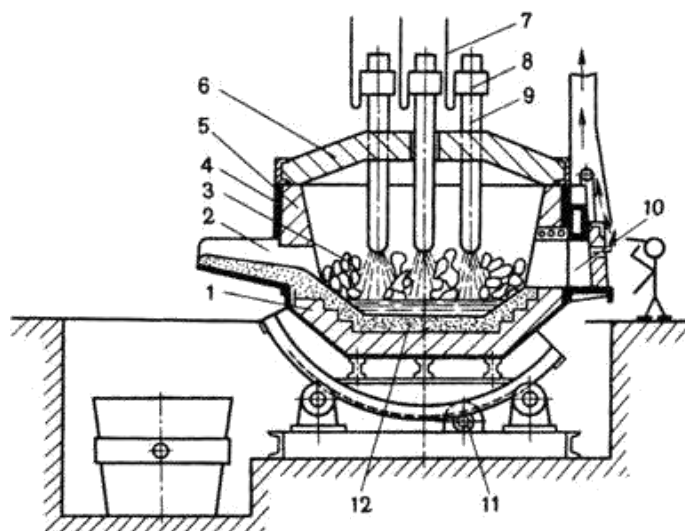


Рис. 10.5. Схема дуговой плавильной печи

Дуговая печь питается трехфазным переменным током. Имеет три цилиндрических электрода 9 из графитизированной массы, закрепленных в электроподдержателях 8, к которым подводится электрический ток по кабелям 7. Между электродом и металлической шихтой 3 возникает электрическая дуга. Корпус печи имеет форму цилиндра. Снаружи он заключен в прочный стальной кожух 4, внутри футерован основным или кислым кирпичом 1. Плавильное пространство ограничено стенками 5, подиной 12 и сводом 6. Съёмный свод 6 имеет отверстия для электродов. В стенке корпуса рабочее окно 10 (для слива шлака, загрузки ферросплавов, взятия проб), закрытое при плавке заслонкой. Готовую сталь выпускают через сливное отверстие со сливным желобом 2. Печь опирается на секторы и имеет привод 11 для наклона в сторону рабочего окна или желоба. Печь загружают при снятом своде. Вместимость печей составляет 0,5...400 тонн. В металлургических цехах используют электропечи с основной футеровкой, а в литейных — с кислой. В основной дуговой печи осуществляется плавка двух видов:

- а) на шихте из легированных отходов (методом переплава);
- б) на углеродистой шихте (с окислением примесей).

Плавку на шихте из легированных отходов ведут без окисления примесей. После расплавления шихты из металла удаляют серу, наводя основной шлак, при необходимости науглероживают и доводят металл до заданного химического состава. Проводят диффузионное раскисление, подавая на шлак измельченные ферросилиций, алюминий, молотый кокс. Так выплавляют легированные стали из отходов машиностроительных заводов.

Плавку на углеродистой шихте применяют для производства конструкционных сталей. В печь загружают шихту: стальной лом, чушковый перепельный чугун, электродный бой или

кокс, для науглероживания металлов и известь. Опускают электроды, включают ток. Шихта под действием электродов плавится, металл накапливается в подине печи. Во время плавления шихты кислородом воздуха, оксидами шихты и окислы окисляются железо, кремний, фосфор, марганец, частично, углерод. Оксид кальция из извести и оксид железа образуют основной железистый шлак, способствующий удалению фосфора из металла. После нагрева до 1500...1540 °С загружают руду и известь, проводят период «кипения» металла, происходит дальнейшее окисление углерода. После прекращения кипения удаляют шлак. Затем приступают к удалению серы и раскислению металла заданного химического состава. Раскисление производят осаждением и диффузионным методом. Для определения химического состава металла берут пробы и при необходимости вводят в печь ферросплавы для получения заданного химического состава. Затем выполняют конечное раскисление алюминием и силикокальцием, выпускают сталь в ковш.

При выплавке легированных сталей в дуговых печах в сталь вводят легирующие элементы в виде ферросплавов. В дуговых печах выплавляют высококачественные углеродистые стали – конструкционные, инструментальные, жаростойкие и жаропрочные.

Индукционные тигельные плавильные печи. Выплавляют наиболее качественные коррозионно-стойкие, жаропрочные и другие стали и сплавы. Вместимость от десятков килограммов до 30 тонн. Схема индукционной тигельной печи представлена на рис 10.6.

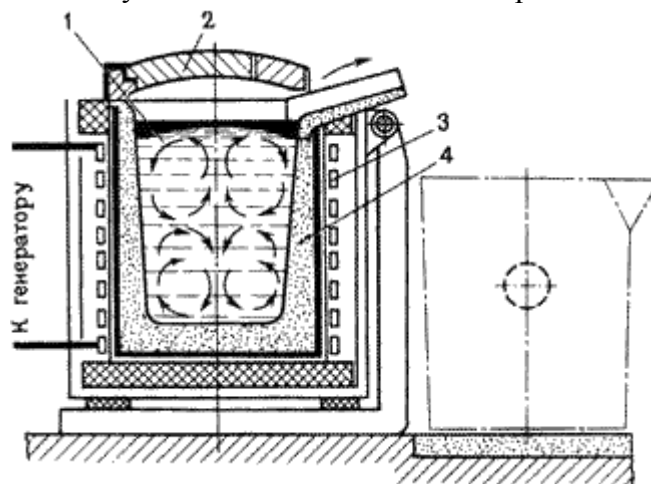


Рис. 10.6. Схема индукционной тигельной печи

Печь состоит из водоохлаждаемого индуктора 3, внутри которого находится тигель 4 (основные или кислые огнеупорные материалы) с металлической шихтой, через индуктор от генератора высокой частоты проходит однофазный переменный ток повышенной частоты (500...2000 Гц). При пропускании тока через индуктор в металле 1, находящемся в тигле, индуцируются мощные вихревые токи, что обеспечивает нагрев и плавление металла. Для уменьшения потерь тепла, печь имеет съемный свод 2. Тигель изготавливают из кислых (кварцит) или основных (магнетитовый порошок) огнеупоров. Для выпуска плавки печь наклоняют в сторону сливного желоба. Под действием электромагнитного поля индуктора при плавке происходит интенсивная циркуляция жидкого металла, что способствует ускорению химических реакций, получению однородного по химическому составу металла, быстрому всплыванию неметаллических включений, выравниванию температуры. В индукционных печах выплавляют сталь и сплавы из легированных отходов методом переплава, или из чистого шихтового железа и скрапа с добавкой ферросплавов методом сплавления. После расплавления шихты на поверхность металла загружают шлаковую смесь для уменьшения тепловых потерь металла и уменьшения угара легирующих элементов, защиты его от насыщения газами. При плавке в кислых печах, после расплавления и удаления плавильного шлака, наводят шлак из боя стекла. Для окончательного раскисления перед выпуском металла в ковш вводят ферросилиций, ферромарганец и алюминий. В основных печах раскисление проводят смесью из порошкообразной извести, кокса, ферросилиция, ферромарганца и алюминия. В основных печах выплавляют высококачественные легированные стали с высоким

содержанием марганца, титана, никеля, алюминия, а в печах с кислой футеровкой – конструкционные, легированные другими элементами стали. В печах можно получать стали с незначительным содержанием углерода и безуглеродистые сплавы, так как нет науглероживающей среды. При вакуумной индукционной плавке индуктор, тигель, дозатор шихты и изложницы, помещают в вакуумные камеры. Получают сплавы высокого качества с малым содержанием газов, неметаллических включений и сплавы, легированные любыми элементами.

Улучшить качество металла можно уменьшением в нем вредных примесей, газов, неметаллических включений. Для повышения качества металла используют: обработку синтетическим шлаком, вакуумную дегазацию металла, электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-дуговой переплав (ВДП), переплав металла в электронно-дуговых и плазменных печах и т. д.

Вакуумная дегазация проводится для уменьшения содержания в металле газов и неметаллических включений. Вакуумирование стали проводят в ковше, при переливе из ковша в ковш, при заливке в изложницу. Для вакуумирования в ковше ковш с жидкой сталью помещают в камеру, закрывающуюся герметичной крышкой. Вакуумными насосами создают разрежение до остаточного давления 0,267...0,667 кПа. При понижении давления из жидкой стали выделяются водород и азот. Всплывающие пузырьки газов захватывают неметаллические включения, в результате чего содержание их в стали снижается. Улучшаются прочность и пластичность стали.

Электрошлаковый переплав (ЭШП) применяют для выплавки высококачественных сталей для подшипников, жаропрочных сталей. Переплаву подвергается выплавленный в дуговой печи и прокатанный на прутки металл. Источником теплоты является шлаковая ванна, нагреваемая электрическим током.

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП) применяют в целях удаления из металла газов и неметаллических включений. Процесс осуществляется в вакуумно-дуговых печах с расходуемым электродом. Катод изготовляют механической обработкой слитка выплаваемого в электропечах или установках ЭШП. Слиток характеризуется высокой равномерностью химического состава, повышенными механическими свойствами. Изготавливают детали турбин, двигателей, авиационных конструкций. Масса слитков достигает 50 тонн.

Производство цветных металлов

Производство меди. Медь в природе находится в виде сернистых соединений, оксидов, гидрокарбонатов, углекислых соединений в составе сульфидных руд и самородной металлической меди. Наиболее распространенные руды – медный колчедан и медный блеск, содержащие 1...2 % меди. 90 % первичной меди получают пирометаллургическим способом, 10 % – гидрометаллургическим.

Гидрометаллургический способ – получение меди путем ее выщелачивания слабым раствором серной кислоты и последующего выделения металлической меди из раствора.

Получение меди пирометаллургическим способом состоит из обогащения, обжига, плавки на штейн, продувки в конвертере, рафинирования.

Обогащение медных руд производится методом флотации и окислительного обжига.

Метод флотации основан на использовании различной смачиваемости медьсодержащих частиц и пустой породы. Позволяет получать медный концентрат, содержащий 10...35 % меди. Медные руды и концентраты, содержащие большие количества серы, подвергаются окислительному обжигу. В процессе нагрева концентрата или руды до 700...800 °С в присутствии кислорода воздуха сульфиды окисляются и содержание серы снижается почти вдвое против исходного. Обжигают только бедные (с содержанием меди 8...25 %) концентраты, а богатые (25...35 % меди) плавят без обжига. После обжига руда и медный концентрат подвергаются плавке на штейн, представляющий собой сплав, содержащий сульфиды меди и железа. Штейн содержит 20...50 % меди, 20...40 % железа, 22...25 % серы, около 8 % кислорода и примеси никеля, цинка, свинца, золота, серебра. Чаще всего плавка производится в пламенных отражательных печах. Температура в зоне плавки 1450 °С.

Полученный медный штейн, с целью окисления сульфидов и железа, подвергают продувке сжатым воздухом в горизонтальных конвертерах с боковым дутьем. Образующиеся окислы переводят в шлак, а серу – в оксид серы. Тепло в конвертере выделяется за счёт протекания химических реакций без подачи топлива. Температура в конвертере составляет 1200...1300 °С. Таким образом, в конвертере получают черновую медь, содержащую 98,4...99,4 % меди, 0,01...0,04 % железа, 0,02...0,1 % серы и небольшое количество никеля, олова, сурьмы, серебра, золота. Эту медь сливают в ковш и разливают в стальные изложницы или на разливочной машине.

Черновую медь рафинируют для удаления вредных примесей, проводят огневое, а затем электролитическое рафинирование.

Сущность огневого рафинирования черновой меди заключается в окислении примесей, имеющих большее сродство к кислороду, чем медь, удалении их с газами и переводе в шлак. После огневого рафинирования получают медь чистотой 99...99,5%. Ее разливают в изложницы и получают чушки для дальнейшей выплавки сплавов (бронзы и латуни) или слитки для электролитического рафинирования.

Электролитическое рафинирование проводят для получения чистой от примесей меди (99,95 % Cu). Электролиз проводят в ваннах, где анод изготавливают из меди огневого рафинирования, а катод – из тонких листов чистой меди. При пропускании постоянного тока анод растворяется, медь переходит в раствор, а на катодах разряжаются ионы меди, осаждаваясь на них слоем чистой меди. Примеси осаждаются на дно ванны в виде шлака, который идет на переработку с целью извлечения металлов. Катоды выгружают через 5...12 дней, когда их масса достигнет 60...90 кг. Их тщательно промывают, а затем переплавляют в электропечах.

Производство магния. Для получения магния наибольшее распространение получил электролитический способ, сущность которого заключается в получении чистых безводных солей магния, электролизе этих солей в расплавленном состоянии и рафинировании металлического магния. Основным сырьем для получения магния являются: карналлит, магнезит, доломит, бишофит. Наибольшее количество магния получают из карналлита. Сначала карналлит обогащают и обезвоживают. Безводный карналлит используют для приготовления электролита. Электролиз осуществляют в электролизере, футерованном шамотным кирпичом. Анодами служат графитовые пластины, а катодами – стальные пластины. Для электролитического разложения хлористого магния через электролит пропускают ток. В результате образуются ионы хлора, которые движутся к аноду. Ионы магния движутся к катоду и после разряда выделяются на поверхности, образуя капельки жидкого чернового магния. Магний имеет меньшую плотность, чем электролит, поэтому он всплывает на поверхность, откуда его периодически удаляют вакуумным ковшом. Черновой магний содержит 5 % примесей, поэтому его рафинируют переплавкой с флюсами. Для этого черновой магний и флюс нагревают в печи до температуры 700...750 °С и перемешивают. При этом неметаллические примеси переходят в шлак. Затем печь охлаждают до температуры 670 °С и магний разливают в изложницы на чушки.