**Производство стали**

Сталь является материальной основой промышленного производства и строительства, важнейшим продуктом черной металлургии. В сравнении с чугуном она имеет боле высокие механические свойства, ее можно обрабатывать давлением; многие сорта стали, в расплавленном состоянии обладают достаточной жидкотекучестью для получения фасонных отливок.

Основная масса стали (до 90-92 %) подвергаются обработке давлением (прокатке, прессованию, ковке, штамповке). Стальные изделия получают также из порошков.

Шихтовыми материалами для плавки стали являются жидкий или твёрдый чугун, стальной и чугунный лом, стружка, обрезки (скрап), железорудные окатыши, ферросплавы (перечисленные материалы называют металлошихтой); известняк, известь, боксит, плавиковый шпат, марганцевая руда, кварцевый песок (флюсы); железная руда, окалина, агломерат, кислород, воздух (окислители). Отнесение перечисленных материалов к группам металлошихты, флюсов и окислителей сделано в соответствии с основным их назначением; многие из материалов одной группы содержат элементы другой (например, в окалине, боксите есть железо, в скрапе – кислород и т. п.)

Задача передела чугуна в сталь состоит в том, чтобы из чугуна удалить избыток углерода, кремния, марганца и других примесей. Особенно важно при этом удалить вредные примеси серы и фосфора, придающие стали хрупкость. Углерод чугуна, соединяясь с кислородом, превращается в газ (оксид углерода CO), который улетучивается. Другие примеси переходят в различные соединения, нерастворимые или малорастворимые в металле; эти соединения вместе с флюсами образуют на поверхности металла шлак.

При окислении марганец и кремний образуют оксиды MnO и SiO2, нерастворимые в металле. Образующийся оксид фосфора P2O5 в соединение (CaO)4 · P2O5, нерастворимое в металле. Непосредственным окислителем примесей в процессе производства стали является оксид железа FeO, растворенный в металле.

Сера растворена в чугуне в составе соединения FeS, ее удаляют с помощью марганца или извести, которые образуют с ней или плохо растворимые в металле соединения MnS или нерастворимое соединение CaS, переходящие в шлак. Конечной операцией процесса выплавки стали является ее раскисление (восстановление железа из FeO). Для легированной стали, раскисление обычно совмещают с легированием.

В металлургии в основном применяют следующие способы получения стали: кислородно-конвертерный, в мартеновских и двухванных печах и электротермический.

**Производство стали в кислородных конвертерах**

В производстве стали широко используют кислородно-конвертерные процессы при продувке кислородом сверху и в последние годы – при продувке через днище. Их преимуществами является высокая производительность, которая обеспечивается интенсивностью процессов окисления элементов, а также меньше по сравнению с мартеновскими цехами затраты на строительство. В кислородных конвертерах могут выплавлять как углеродистые, так и легированные стали.

Основным шихтовым материалом кислородно-конвертерного процесса является жидкий передельный чугун, источником тепла при выплавки стали являются химические экзотермические реакции окисления элементов при продувке жидкого чугуна кислородом.

Кислородные конвертеры делятся на стационарные и вращающиеся. В СССР применяют стационарные конверторы с глухим дном и конвертеры с донной продувкой вместимостью от 100 до 400 т.

Стационарный конвертер имеет два бандажа, каждый из которых опирается на два ролика. Горловина конвертера имеет симметричную форму. Внутри стального кожуха конвертеры выкладываются смолодоломитовым кирпичом. Летка предназначена для слива готовой стали и способствует лучшему отделении стали от шлака и уменьшению восстановления фосфора из шлака при сливе.

В конвертер сначала загружают скрап, далее заливают чугун, затем засыпают известь, а также боксит, железную руду и окалину (если нужно), после чего производят продувку, взятие проб, их анализ, а затем слив металла и шлака.

Кислород под давлением 900 – 1000 кПа подается через водоохлаждаемую фурму, часть его проникает в металл, а оставшийся кислород растекается по поверхности ванны. Залитый в конвертер чугун содержит около 93 % железа, поэтому проникающий в чугун кислород преимущественно окисляет железо:

Fe + 1/202 → FeO + ∆H.

С началом продувки в конвертере сразу образуются две несмешивающиеся между собой жидкости – металл (плотность 7,8 г/см3) и шлак (плотность около 2,5 г/см3), находящиеся в непосредственном контакте и взаимодействии.

Часть оксида железа остается в металле, часть его переходит в шлак, при этом как в металле, так и в шлаке оксид железа реагирует с другими элементами и соединениями, однако в шлаке и металле распределение оксида железа постоянно при данной температуре; это называется константой распределения LFeO:

LFeO= FeO в мет.= const.

Следовательно, при уменьшении массового содержания FeO в шлаке соответственно уменьшается его массовое содержание и в металле.

Оксид железа, находящийся в металле, вступает во взаимодействие с примесями в чугуне, к которым кислород имеет большое сродство, чем к железу:

2FeO + Si → 2Fe +SiO2 + ∆H

FeO + Mn → Fe + MnO + ∆H

Фосфор выгорает по реакции:

5FeO + 2P → P2O5 + 5Fe + ∆H

Оксид фосфора растворяется в металле и в шлаке со своей константой распределенияLP O наподобие оксида железа:

LP O =P O в мет. = const

Углерод выгорает по реакции:

FeO + C → Fe + CO - ∆H

Оксид углерода СО пузырьками выходит из жидкой ванны, частично сгорает, реагируя с кислородом, растекающимся по поверхности ванны:

CO + 1/2O2 → CO2 + ∆H

Разогрев ванны способствует растворению извести, боксита и оксидов железа, в результате образуется активный основной шлак с избытком свободного оксида кальция, который связывает фосфор в нерастворимое в металле соединение:

P2O5 + 4 CaO → (CaO)4 P2O5 + ∆H

При переработке высокофосфористого чугуна, для того чтобы предотвратить обратный переход фосфора из шлака в металл, шлак, обогащенный фосфором, сливают и вновь загружают известь. Фосфористый шлак используют в сельском хозяйстве в качестве удобрения.

Горячий высокоизвестковистый шлак в конвертере дает возможность шлаковать фосфор раньше, чем выгорает углерод. Известь обеспечивает также шлакование серы по реакции:

FeS + CaO → FeO + CaS + ∆H

Эта реакция идет на границе раздела шлак – металл. Перегретый активный основной шлак обеспечивает удаление значительной части серы из металла, в результате чего ее массовое содержание может быть доведено до 0,015%

Увеличение производительности кислородных конвертеров достигается не только путем увеличения вместимости, но также за счет интенсивности продувки при внедрении автоматического управления и контроля плавки и использованием ЭВМ.

В конвертерах с донным дутьем выход стали больше за счет увеличения присадки скрапа по сравнению с конвертерами с верхним дутьем.

За последнее время на металлургических заводах построено несколько крупных кислородно-конвертерных цехов. Строительство таких цехов будет продолжаться, а удельный вес производства стали, в мартеновских печах значительно сократится.

**Легированные стали и сплавы**

Прочность, вязкость, жаро- и хладостойкость, а также коррозионная стойкость углеродистых сталей являются недостаточными для многих высоконагруженных деталей машин и строительных конструкций; инструменты из углеродистой инструментальной стали тверды, но не выдерживают повышенной скорости резания, так как размягчаются при нагреве уже до температуры 250 0C, кроме того, они хрупкие. Прокаливаемость углеродистой стали также невелика в связи с большой критической скоростью закалки, в результате этого на мартенсит закаливается только поверхностный слой заготовки, а внутренние слои закаливаются лишь на троостит или сорбит, а у заготовок больших размеров остаются вовсе не закалёнными. Таким образом, углеродистая сталь часто не отвечает повышенным требованиям машиностроения и инструментального производства.

Вводимые в сталь легирующие элементы улучшают ее механические, физические и химические свойства. Для легирования стали применяют хром, никель, марганец, кремний, вольфрам, молибден, ванадий, кобальт, титан, алюминий, медь и другие элементы. Марганец считается легирующим компонентом при массовом содержании более 1 %, а кремний – более 0,8 %. Большинство легированных сталей приобретают высокие физико-механические свойства лишь после термической обработки.

Легированную сталь классифицируют по следующим признакам:

числу введённых легирующих элементов;

суммарному массовому содержанию легирующих элементов;

характеру взаимодействие легирующих элементов с железом и с углеродом;

структуре в отожженном и нормализированным состояниях;

качеству;

назначению и применению.

**Число введённых легирующих элементов.** Если введён один легирующий элемент, то сталь называют по этому элементу, такую сталь называют также тройной, так как она содержит железо, углерод и легирующий элемент (постоянные примеси не считаются). Из тройных легированных сталей применение находят хромовая, марганцевая и кремнистая стали.

Если сталь легирована двумя, тремя и более элементами, то она является сложнолегированной (комплексно-легированной) и её называют по введённым легирующим элементам (например, хромомарганцевой, хромомолибденовой, хромоникелевой, сернистомарганцевой, хромокремнистованадиевой). Хром, кремний и марганец присутствуют в большинстве легированных сталей, остальные легирующие элементы вводят (за исключением сплавов с особыми свойствами) чаще всего в сочетании с ними. При комплексном легировании получение нужных свойств достигается полнее и при меньшем общем массовом содержании легирующих элементов.

**Суммарное массовое содержание легирующих элементов.** По этому признаку сталь делится на низколегированную (суммарное содержание их менее 2,5 %, среднелегированную (от 2,5 до 10 %) и высоколегированную (более 10 %).

**Взаимодействие легирующих элементов с железом и углеродом. С** железом легирующие элементы образуют у-, так и a- твёрдые растворы, т. е. они могут входить в состав аустенита и феррита, упрочняя их. При этом легирующие элементы оказывают различное влияние на устойчивость аустенита: одни (например, никель) расширяют этот интервал и при достаточном массовом содержании определяют аустенит устойчивом даже при комнатной температуре (такие стали называют аустенитными). Другие (например, хром) уменьшают устойчивость аустенита и могут совсем устранить аустенитное превращение; при достаточном содержании таких элементов (например, более 13 % Cr) аустенита не существует и сталь вплоть до плавления остаётся ферритной. Аустенитные и ферритные стали заколки не принимают, так как они не имеют фазовых превращений в твёрдом состоянии.

По отношению к углероду легирующие элементы разделяют на две группы: 1) элементы, образующие с углеродом устойчивые химические соединения, - карбиды (хром, марганец, молибден, вольфрам, ванадий, цирконий, титан); карбиды могут быть простыми, например, Cr4C, MoC, и сложными легированными - [(Fe, Cr)7] C3; (Fe, W)4C и др. Они твёрже карбида железа и менее хрупкие; 2) элементы, не образующие в стали карбидов и входящие в твёрдый раствор – феррит (никель, кремний, кобальт, алюминий, медь); они оказывают графитизирующее действие.

**Структура в отожженном состоянии.** По этому признаку различают доэвтектоидную, эвтектоидную, заэвтектоидную и ледебуритную легированные стали.

На рис. 1 приведена структурная диаграмма для отожженных хромовых сталей, показывающая изменения положения точек легированного перлита (линия 1) и предельного массового содержания углерода в легированном аустените (линия 11) на диаграммах состояние систем сплавов в зависимости от количества хрома. Из диаграммы видно, что по мере увеличения массового содержания хрома точки, аналогичные тачкам S и E на диаграмме состояния системы сплавов Fe-Fe3C, будут смещаться влево на соответствующих диаграммах состояния систем сплавов с хромом, т. е. массовое содержание углерода в легированном перлите и легированном аустените уменьшаются по мере увеличения количества хрома в сплавах. Это относится также и к сталям, легированным другими карбидообразующими элементами.

*Доэвтектоидная* сталь состоит из легированного перлита и избыточного легированного феррита, *заэвтектоидная –* из легированного перлита и легированных карбидов, а *ледебуритная –* из легированных ледебурита, перлита и карбидов. На диаграмме указана также область *ферритных* сталей, получающихся при большом массовом содержании и небольшом углерода.

**Структура в нормализованном состоянии.** На рис. 2 приведена диаграмма для никелевых сталей, показывающая зависимость полученной при охлаждении на воздухе структуры стали от массового содержания углерода и никеля в ней.

Из диаграммы видно, что при небольшом массовом содержании никеля и углерода получается структура, состоящая из смеси феррита и цементита, которая, однако, характеризуется повышением дисперсности по мере увеличения в стали никеля и углерода, т. е. структура может быть перлитной, сорбитной или трооститной. На диаграмме соответствующая область характеризует *перлитный класс* сталей. Большее массовое содержание никеля и углерода в сталях приводит к образованию при их охлаждении на воздухе структуры мартенсита или аустенита; такие стали относят, соответственно, к *мартенситному* или *аустенитному* классу.

Образование структуры аустенита объясняется тем, что при повышенном массовом содержании в стали элементов, растворяющихся в аустените (в частности никеля), мартенситное превращение в сравнении происходит при более низких температурах, при большом содержании этих элементов такое превращение осуществляется при температурах ниже 0 0С. Соответственно при охлаждении на воздухе до комнатной температуры в стали сохранится структура аустенита без мартенсита.

При меньшем массовом содержании никеля и углерода мартенситная точка на соответствующей диаграмме будет лежать выше, так как мартеновское превращение в таких случаях происходит при более высокой температуре и охлажденная на воздухе сталь имеет структуру мартенсита.

При небольшом содержании никеля и углерода скорость охлаждения на воздухе оказывается меньше критической скорости закалки и сталь, охлаждённая на воздухе до комнатной температуры, имеет структуру троостита, сорбита или перлита. Заштрихованные участки на диаграмме соответствуют составом сталей, занимающим положение промежуточных классов: перлитно-мартенситного и мартенситно-аустенитного.

Аналогичные диаграммы могут быть построены также для сталей, легированных другими элементами, при этом кроме тех названных классов могут образоваться еще два класса: карбидный и ферритный.

Таким образом, легированная сталь в зависимости от структуры и состояния, полученных при охлаждении на воздухе, делятся на пять классов (не включая промежуточных): *перлитный, мартенситный, аустенитный, карбидный и ферритный.*

**Классификация по качеству.** Легированная сталь подразделяется на качественную (массовое содержание серы и фосфора не более 0,035 % каждого), высококачественную (не более 0,025 % каждого) и особовысококачественную (не более 0,015 % S и 0,025 % P), получаемую при рафинирующих переплавах.

**Классификация по назначению и применению.**Сталь подразделяют на конструкционные (общего и специального назначения и с особыми свойствами) и инструментальные.

В конструкционных сталях общего назначении выделяют строительные и машиностроительные низколегированные стали, а также улучшаемые, цементируемые стали и стали повышенной обрабатываемости резанием (автоматные стали).

К конструкционным сталям специального назначения и сталям с особыми свойствами относятся шарикоподшипниковые, рессорно-пружинные, высокопрочные, коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные, сварочные и наплавочные стали, стали с особыми магнитными, электрическими и тепловыми свойствами, котельные, корпусные стали для судостроения и прочие.

Инструментальные стали применяют для изготовления режущих, измерительных и ударно-штамповочных инструментов.

**Маркировка легированной стали.** В соответствии с ГОСТом для обозначения легирующих элементов приняты следующие буквы; Х – хром, Н – никель, Г – марганец, С – кремний, В – вольфрам, М – молибден, Ф – ванадий, К – кобальт, Т – титан, Ю – алюминий, Д – медь, П – фосфор, Р – бор, Б – ниобий, А – азот (ставить в конце маркировки запрещается), Е – селен, Ц – цирконий. Для обозначения легированной стали той или иной марки применяют определённое сочетание цифр и букв.

Для стали *конструкционной* легированной принята маркировка, по которой первые две цифры указывают среднее массовое содержание углерода в сотых долях процента, если сталь содержит менее 0,1 % углерода, то первая цифра ноль, например 08, 05. Буквы в маркировке указывают наличие соответствующих легирующих элементов, а цифры, следующие за буквами, - процентное массовое содержание этих элементов в стали. Если за какой–либо буквой отсутствует цифра, то это значит, что сталь содержит данный элемент в количестве до 1,5 %, кроме элементов, присутствующих в малых количествах (для комплексно-легированных сталей). Например, марка 35X обозначает хромовую сталь с массовым содержанием С около 0,35 % и Сr до 1,5 %; 45Г2 – марганцевую сталь с массовым содержанием С около 0,45 % и Мn около 2 %; марка 38ХН3МФА – сталь, содержащую 0,33-0,4 % С, 1,2-1,6 % Сr, 3,0-3,5 % Ni, 0,35-0,45 % Мо, 0,1-0,18 % V, а также 0,25-0,5 % Мn, не указанного по маркировке, букву А в конце маркировки используют для обозначения высококачественной стали. Для обозначения особовысококачественной стали в конце маркировки ставят букву Ш (через дефис), например, 30ХГС-Ш.

Для *инструментальной* легированной стали порядок маркировки по легирующим компонентам тот же, что и для конструкционных сталей, но содержание углерода указывается первой цифрой в десятых долях процента. Если цифра отсутствует, то сталь содержит около 1 % углерода.

Некоторые стали специального назначения имеют особую маркировку из букв, которые ставятся впереди цифр: А – автоматная, Ш – шарикоподшипниковая, Р – быстрорежущая, Е – магнитотвердая, Э – электротехническая, Св – сварочная, Нп – наплавочная и т. д.

**Влияние легирующих элементов на свойства стали.** Легирование стали, никелем повышает её прокаливаемость; этому же способствуют присадки марганца, молибдена, хрома, бора. Никель увеличивает также, вязкость и пластичность стали, понижает температуру порога хладноломкости. Однако никель дорог, поэтому его вводят в сочетании с марганцем или хромом. Понижение порога хладноломкости достигается также присадкой хрома, молибдена, вольфрама, ванадия, титана, ниобия и циркония, которые образуют дисперсные труднорастворимые в аустените карбиды и препятствуют росту зерна аустенита. Рост зерна аустенита задерживается также присадкой алюминия, присутствующего в виде дисперсных оксидов. Молибден и вольфрам повышают, также стойкость стали к отпуску. Кобальт (как и никель) полностью взаимно растворим с железом, и способствует понижению количества остаточного аустенита в закаленной стали.

**Особенности термической обработки легированной стали.** Введение большинства легирующих элементов определяет повышение точек А1 и А3 в сравнении с их положением для углеродистой стали, поэтому температура нагрева легированной стали для закалки выше. Легированные стали имеют меньшую теплопроводность и требуют замедленного нагрева и более продолжительной выдержки для аустенизации в сравнении с углеродистой сталью. Все легирующие элементы (за исключение кобальта) уменьшают критическую скорость закалки, т. е. увеличивает инкубационный период переохлажденного аустенита («сдвигают» вправо кривые на диаграммах изотермического превращения); это определяет увеличение прокаливаемости заготовок. Карбидообразующие элементы, кроме того, определяют на диаграмме изотермического превращения две области 1 и 3 (рис. 3) минимальной устойчивости аустенита и область 2 между ними повышенной его устойчивости. Увеличению устойчивости переохлажденного аустенита обеспечивает возможность получения структуры мартенсита при закалке охлаждением в масле, на воздухе и в горячих средах.

Многие легирующие элементы повышают устойчивость мартенсита против отпуска, поэтому для достижения требуемой прочности легированные стали при отпуске нагревают до более высоких температур, чем углеродистые.

**Термомеханическая**

**Обработка.** Некоторые марки легированной и углеродистой сталей упрочняют термомеханической обработкой (ТМО), при которой в единую операцию совмещают пластическую деформацию аустенита и закалку. После закалки производят низкий отпуск . Сталь после ТМО имеет повышенную прочность и ударную вязкость в 1,5-2 раза выше в сравнении со сталью той же марки после закалки и низкого отпуска.

В зависимости от температуры, при которой производят деформацию, различают высокотемпературную (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО) термомеханическую обработку. ВТМО применяют для углеродистой и легированной сталей. При этом сталь нагревают до температуры выше точки А3 (рис. 3, а), выдерживают для аустенизации, деформируют прокатной или ковкой (на схеме показано ломаной линией) для предупреждения поста зёрен аустенита их охлаждают. При НТМО (рис. 3 б) деформацию производят при температурах ниже рекристаллизации (зона рекристаллизации показана штриховкой) в области повышенной устойчивости аустенита, что возможно лишь для легированных сталей; рекристаллизация при этом не может возникнуть.

Повышение прочности при ТМО определяется измельчением блоков зёрен аустенита и уплотнением дислокаций; эти особенности наследуются и мартенситом . НТМО дает наибольшее упрочнение (σв до 2800 МПа), однако при температурах НТМО аустенит менее пластичен, поэтому НТМО применяют для изделий простой формы (ленты, прутка) при небольших сечениях.