

Лекция 02: Классификация сталей

- Общая классификация сталей
- Углеродистые стали: состав, свойства, классификация
- Легированные стали: состав, свойства, классификация
- Стали со специальными свойствами
 - нержавеющие коррозионностойкие стали
 - жаростойкие
 - жаропрочные
 - теплостойкие
 - износостойкие
 - дуплексные
 - мартенсито-стареющие
 - дисперсионно твердеющие

Металлы

Металлы – простые вещества, которые в обычных условиях характеризуются наличием нескольких отличительных признаков:

- высокая теплопроводность и проводимость электрического тока;
- ковкость;
- пластичность;
- кристаллическое строение на атомарном уровне и как следствие высокие прочностные показатели;
- температура плавления: тугоплавкие и легкоплавкие.

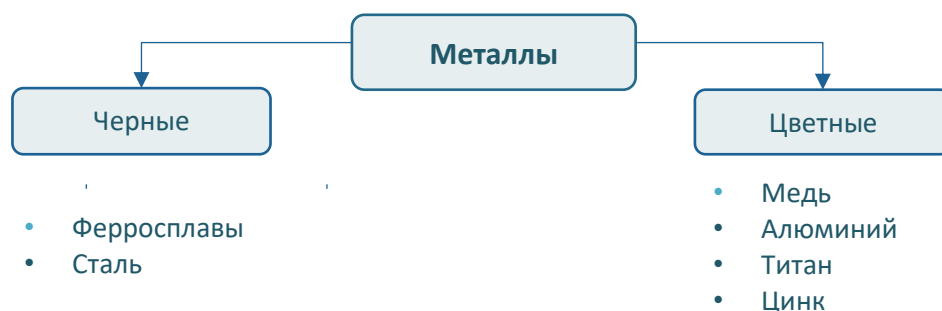


Схема 1. Классификация металлов

Сплавы – материалы, полученные из двух и более веществ путем их нагревания свыше температуры плавления.

Сталь получают из чугуна и приобретает необходимые свойства за счет очистки от вредных примесей, доведения до необходимого уровня содержания углерода и введением ряда элементов для достижения необходимых свойств. Сталь – содержание углерода до 2,14%; чугун – содержание углерода от 2,14% до 6,67%.

Ферросплавы – сплавы железа с кремнием, хромом, марганцем, никелем и некоторыми другими элементами.

К **цветным металлам** относятся все остальные металлы и их сплавы.

Общие принципы классификации сталей

Стали могут быть классифицированы по множеству различных признаков, см. Схему 2. Данная классификация общая, ниже мы рассмотрим специфику классификации разных групп сталей.

К основным критериям классификации сталей можно отнести следующие:

- химический состав;
- способ выплавки;

- качество (содержанию вредных примесей);
- степень раскисления и характер затвердевания металла;
- формообразование;
- структурный класс;
- свариваемость;
- назначение



Схема 2. Общая классификация сталей

Рассмотрим отдельно каждый признак.

По способу производства (выплавки)

Стали разделяют на мартеновскую, конвертерную и электросталь. Для выплавки углеродистых сталей применяют все типы печей. Для высоколегированных как правило электропечи.

Отсюда вытекает следующие два признака классификации: по качеству и по степени раскисления.

По качеству

Классификация по качеству основана на количественном показателе качества, т.е. содержании вредных примесей – серы и фосфора:

- обыкновенного качества ($S \leq 0,05, P \leq 0,04$);
- качественные стали ($S, P \leq 0,035$);
- высококачественные ($S, P \leq 0,025$);
- особо высококачественные ($S \leq 0,015, P \leq 0,025$)

Для изделий ответственного назначения применяют высоко- и особо высококачественные стали с еще очень низким содержанием серы и фосфора. Необходимость обеспечения низкого содержания вредных примесей дополнительно удорожает и усложняет их производство. Поэтому обычно высококачественными сталями бывают не углеродистые, а легированные стали.

При одинаковом содержании углерода качественные стали имеют более высокие пластичность и вязкость, особенно при низких температурах. Качественные стали предпочтительнее для изготовления изделий, эксплуатируемых при низких температурах, в частности в условиях Севера и Сибири.

По степени раскисления и характеру затвердевания стали классифицируют на:

- спокойные;
- полуспокойные;
- кипящие.

Легированные стали производят только спокойными; углеродистые - спокойными, полуспокойными и кипящими.

Под раскислением понимают **процесс удаления** из стального расплава растворенного в нем **кислорода**, ухудшающего механические свойства будущего металла, путем добавления различных добавок. Процесс запускается добавлением в расплав веществ, которые характеризуются лучшим взаимодействием с кислородом, чем железо. Это могут быть: кальций, алюминий, кремний, марганец и комбинации этих веществ в разных пропорциях. Механизм процесса раскисления заключается в отъеме атомов кислорода из оксида железа, что по сути является восстановлением железа (из оксидов).

Кипящая сталь

Кипящие стали раскисляют в печи или ковше не полностью: только марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное количество кислорода, который при затвердевании частично взаимодействуя с углеродом и удаляется в виде CO_2 . Выделение CO создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название. Кипящая сталь дешевле спокойной, но слитки получаются неоднородными, что ограничивает ее применение.

Структура кипящей стали, насыщенной газообразными элементами, максимально неоднородна, что также влечет неравномерность застывания металла в изложницах: химические элементы распределены по объему слитка в разных пропорциях, потому и физические свойства разных частей отливки могут серьезно различаться.

Такая сталь достаточно хрупкая, плохо сваривается, восприимчива к коррозии. Эксплуатационные характеристики кипящей стали ниже аналогичных параметров спокойных и полуспокойных сплавов и потому она не применяется для производства ответственных деталей. Однако такая сталь имеет и некоторые достоинства, например, она довольно пластична, стоимость ее выплавки ниже, чем стоимость производства аналогов. Узнать такой металл можно по литерам «кп» в его маркировке.

Поскольку производство кипящей стали обходится дешевле, чем спокойной и полуспокойной она достаточно широко используется для изготовления наименее ответственных изделий металлопроката.

Спокойная сталь

Спокойные стали (раскисляют марганцем, кремнием, и алюминием), такие стали содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовыделения. Содержание кремния в спокойной стали не менее 0,12%, а наличие неметаллических включений и шлаков минимально. В изложнице металл застывает с равномерной кристаллизацией. Кипения, а также выделения газовых продуктов или искр не наблюдается. Для обозначения спокойных сплавов в маркировку добавляют литеры «сп».

Такой сплав обладает плотной однородной структурой, что гарантирует получение высоких механических показателей. Он хорошо сваривается, имеет хорошую сопротивляемость к ударным, вибрационным и прочим подобным нагрузкам. Сталь спокойного типа устойчива к хрупкому разрушению.

Полуспокойная сталь

Это промежуточная вариация между кипящей и спокойной, по техническим характеристикам чаще всего приближающаяся к последней и даже способная заменить ее. Она кристаллизуется с выделением достаточного количества газа, но количество и размеры пузырьков незначительны, активного кипения не наблюдается. Такая сталь обозначается буквами «пс» в маркировке после указания химического состава

Полуспокойная сталь имеет средние показатели качества (максимально приближенные к спокойной), и иногда заменяет спокойную. Показатели качества полуспокойной стали ближе к спокойной.

По структурному классу

Классификация по микроструктуре несколько условна*. Характерные для конкретного класса структуры получаются в результате различных режимов термической обработки.



Классификация по структуре условна и относится к случаю охлаждения на воздухе образцов небольших размеров. Меняя условия охлаждения, можно получать разные структуры. Так, при закалке перлитной стали может быть получена мартенситная структура. Охлаждение аустенитной стали ниже нуля может вызвать в ней мартенситное превращение.

После охлаждения на воздухе различают:

- *перлитные стали*, характеризующиеся низким содержанием легирующих элементов и соответственно невысокой устойчивостью переохлажденного аустенита;

- *ферритные* (структура феррита) – низкоуглеродистые и высоколегированные (элементами, расширяющими α -область – хром, кремний);

- *мартенситные* стали (аустенит не распадаясь превращается в мартенсит) со средним содержанием легирующих элементов и, соответственно, высокой устойчивостью аустенита;

- *аустенитные* стали, содержащие большое количество легирующих элементов и сохраняющие аустенитную структуру при комнатной температуре;

- *карбидный* (структура мартенсит и карбиды) – высокоуглеродистые, средне- и высоколегированные стали. В составе обязательно наличие хотя бы одного карбидообразующего элемента;

- стали *со смешанной структурой*: аустенитно-ферритные, мартенситно-ферритные.

Стали ферритного класса содержат мало углерода, свыше 13% хрома или более 2,5% кремния, применяются как коррозионноустойкие или инструментальные.

Стали перлитного класса наиболее распространены. Структура сталей этого класса после нормализации или отжига состоит из феррита и перлита или перлита и карбидов. Такие стали содержат мало легирующих элементов. Все они относятся к низко- и среднелегированным сталям, обладают хорошей обрабатываемостью режущим инструментом. Многие стали перлитного класса, содержащие 0,15-0,20% углерода, хорошо свариваются.

Стали мартенситного класса закаляются на мартенсит при охлаждении на воздухе и относятся в основном к среднелегированным сталям. Эта сталь обычно легирована большим количеством различных элементов (хром, никель и др.). Массовая доля углерода в этих сталях повышенная. Стали наиболее широко применяются для изготовления пружин, крепежа.

Стали аустенитного легированы большим количеством (до 30%) легирующих элементов (никель, хром, марганец и др.). Содержание углерода колеблется в широких пределах. Их применяют для изготовления сосудов под давлением, различных деталей трубопроводной арматуры и элементов трубопроводов, поверхностей теплообмена парогенераторов, регенеративных подогревателей, пароперегревателей котлов, паропроводов, арматуры на сверхвысокие и сверхкритические параметры пара, а также для плакировки корпусов реакторов ВВЭР.

Зная структуру нетрудно отследить, что в мягких сталях при равновесной структуре должно быть явное преобладание феррита над перлитом и твердость, близкая к ферриту порядка (80 ÷ 130) НВ; в средних по твердости сталях количество феррита и перлита должно быть примерно равное и твердость порядка (130 ÷ 150) НВ, а в твердых сталях — явное преобладание перлита над ферритом и твердость более 150 НВ.

Классификация сталей по свариваемости

Свариваемость в основном определяется содержанием углерода и легирующих элементов. С увеличением содержания этих элементов свариваемость ухудшается, т.е. возрастает вероятность образования трещин металле шва, наплавленном металле и зоне термического влияния.

Свариваемость стали определяется по значению углеродного эквивалента. Углеродный эквивалент (C_{Σ}) позволяет оценить риск развития холодных трещин. Международный институт сварки для оценки свариваемости низколегированных сталей рекомендует пользоваться следующим выражением:

$$[C]_{\Sigma} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15},$$

где C_{Σ} – углеродный эквивалент, С, Мп, Cr, Мо, V, Ni, Cu – массовые доли углерода, марганца, хрома, молибдена, ванадия, никеля, и меди, %.

По технологической свариваемости легированные углеродистые стали условно можно разбить на четыре группы (см.Схема 3):

- стали, *свариваемые без ограничений* ($C_{\Sigma} \leq 0,25$ %);

- стали *удовлетворительной свариваемости* ($0,25 < Cэ \leq 0,35 \%$), сварка которых производится только при температуре окружающей среды не ниже 5°C , толщине металла менее 20 мм при отсутствии сквозняков (ветра);

- *ограничено свариваемые* стали ($0,25 < Cэ \leq 0,45 \%$), при сварки которых необходимы дополнительные технологические мероприятия: предварительный и сопутствующий подогрев до 250°C в жестком диапазоне режимов сварки

- *трудносвариваемые* стали ($Cэ \leq 0,45 \%$), применение которых для изготовления сварных конструкций не рекомендуется.

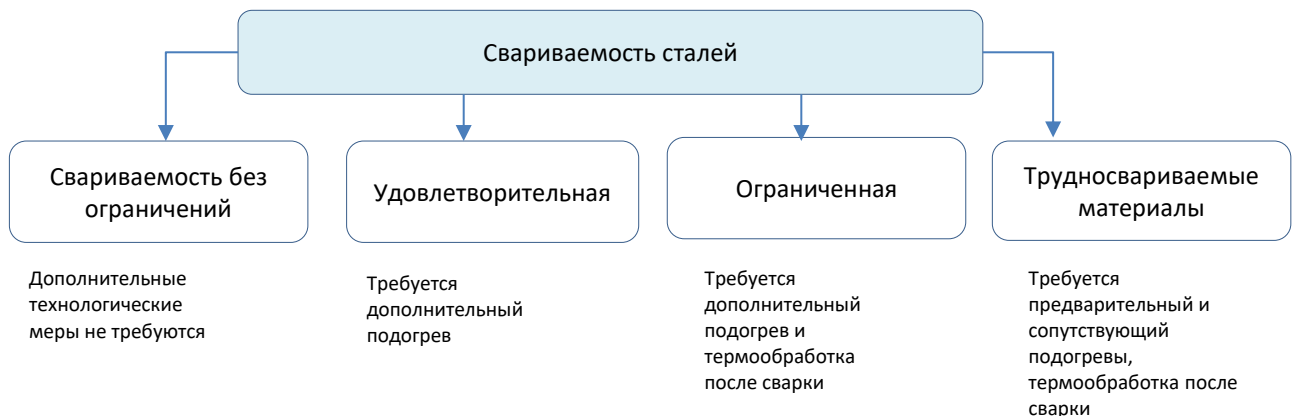


Схема 3. Классификация сталей по свариваемости

По назначению

- конструкционные (наиболее распространены в арматуростроении);
- инструментальные (штамповые, для режущего и мерительного инструмента);
- стали с особыми физическими и химическими свойствами (коррозионностойкие, жаропрочные, электротехнические, магнитные и др.).

Конструкционные – это углеродистые и легированные стали, содержание углерода в которых не превышает 0,5-0,6 %. Они обладают высокой предельной прочностью.

В инструментальных углеродистых сталях содержание углерода колеблется от 0,7% до 1,5%. Эти стали обладают высокой прочностью, устойчивы к факторам износа и предельно высоким температурам. Они применяются в точном машиностроении, изготовлении инструмента, медицине, в научной сфере, в отраслях, где требуется повышенная прочность и точность.

Каждый из этих классов подразделяется на подклассы более узкого назначения.

По применению стали подразделяют на:

- строительные стали – это стали со средним содержанием углерода. Применяется для выпуска широкой номенклатуры различных строительных металлоконструкций, фасонных и листовых профилей, труб, уголков и т.д.;
- арматурные стали - стали, предназначенные для армирования бетонных блоков и готовых конструкций из бетона и изготавливаются в виде стержней или проволоки большого диаметра;
- котельные стали - стали используют для выпуска котлов и цилиндров, а также прочих сосудов и арматуры, которым предстоит работать в условиях повышенного давления при различных температурных режимах;
- автоматные стали - стали, которые легко обрабатываются и легко поддаются резани
- подшипниковые стали - стали, отличающиеся высокой прочностью и огромной устойчивостью к износу (истиранию)

По химическому составу

Один из основных является разделение сталей по химическому составу на *углеродистые* и *легированные*.

Входящие в состав сплавов элементы можно разделить на **сопутствующие примеси** и **легирующие элементы**. Исходя из этого все стали разделяются на углеродистые (технически чистые, без специально введенных добавок) и легированные.

Примеси попадают в сталь с чугуном, рудой, топливом, некачественных футеровки печи, ковша и форм. Примеси оказывают влияние на структуру, а, следовательно, и свойства сталей и сплавов.

Углеродистые – это стали, содержащие, только сопутствующие примеси, без дополнительно введенных легированных элементов; легированные – стали со специально введенными добавками – легирующими элементами (см. Схема 4).



Схема 4. Классификация сталей по химическому составу

Углеродистые стали. Классификация

Сплавы железа с углеродом в концентрации до 2,14%, содержащие в малом количестве другие элементы – углеродистые стали. Углеродистые стали классифицируют по структуре, способу производства и раскисления, по качеству.

Углеродистые стали завершают кристаллизацию образованием аустенита. В их структуре нет эвтектики, благодаря чему они **обладают высокой пластичностью, особенно при нагреве, и хорошо деформируются.**

Углеродистые стали выплавляются в электропечах, мартеновских печах и кислородных конвертерах. Наилучшими свойствами обладает электросталь, более чистая по содержанию вредных примесей - серы и фосфора, а также газов и неметаллических включений.

Т.к. углеродистые стали не содержат специально введенных легирующих элементов, то свойства углеродистых сталей зависят от содержания основного элемента - углерода, а также от количества постоянных (сопутствующих) примесей.

Влияние углерода

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства углеродистой стали. Даже малое изменение содержания углерода оказывает заметное влияние на свойства стали. С увеличением углерода в структуре стали растет содержание цементита, при содержании до 0,8 % C сталь состоит из феррита и перлита, при содержании более 0,8 % C в структуре стали кроме перлита появляются структурно свободный вторичный цементит. Феррит, как мы узнали ранее, имеет низкую прочность, но сравнительно пластичен. Цементит характеризуется высокой твердостью, но хрупок. Поэтому с ростом содержания углерода увеличиваются твердость и прочность и уменьшаются вязкость и пластичность стали. Зависимость представлена на Рисунок 1.

Рост прочности происходит при содержании углерода в стали до (0,8 ÷ 1,0) %C. При увеличении содержания углерода более 1,0 % уменьшается не только пластичность, но и прочность стали. Это связано с образованием сетки хрупкого цементита вокруг перлитных зерен, который легко разрушается при нагружении. По этой причине заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, в результате которого получают структуру зернистого перлита.

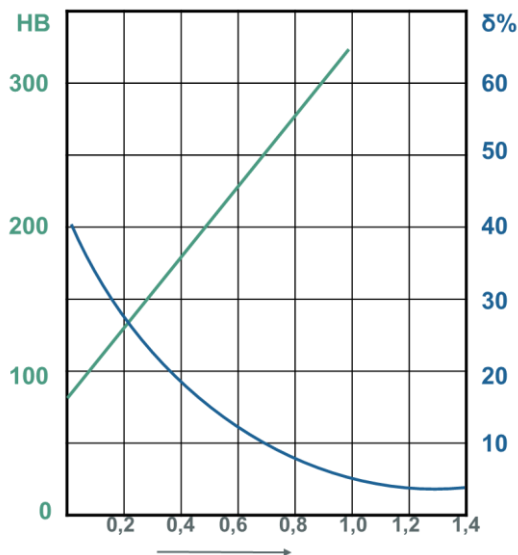



Рисунок 1. Влияние углерода на свойства сталей

Углерод оказывает существенное влияние на технологические свойства стали: свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием. С увеличением содержания углерода ухудшается свариваемость, а также способность деформироваться в горячем и особенно в холодном состоянии.

 *Лучше всего обрабатываются резанием среднеуглеродистые стали, содержащие 0,3-0,4 % С. Низкоуглеродистые стали при механической обработке дают плохую поверхность и трудноудаляемую стружку. Высокоуглеродистые стали имеют повышенную твердость, что снижает стойкость инструмента.*

Влияние примесей

Примеси можно классифицировать следующим образом:

- постоянные (сопутствующие) примеси в углеродистых сталях: S, P, O₂, N, H;
- скрытые примеси (газы): O₂, N, H;
- полезные примеси (попадают в сталь при раскислении): Mn, Si.

Сера и фосфор являются вредными примесями.

Основным источником серы в сталях является исходное сырье – чугуны. Сера нерастворима в стали. Образует с железом соединение – сульфид железа, хорошо растворимый в металле. При малом содержании марганца и благодаря высокой ликвации серы в стали может образовываться легкоплавкая эвтектика, располагающаяся по границам зерен. При нагреве стальных заготовок до температур горячей деформации включения эвтектики сообщают стали хрупкость, а при некоторых условиях могут даже плавиться и при деформировании образовывать надрывы и трещины. Марганец способен устранить эти проблемы связывая серу в сульфид марганца, однако сульфиды марганца, как и другие неметаллические включения, также снижают вязкость и пластичность стали, уменьшают усталостную прочность стали. Поэтому содержание серы в стали должно быть как можно ниже. Повышение содержания серы до 0,2% допустимо для автоматных сталей для изготовления крепежных элементов неответственного назначения. Сера улучшает обрабатываемость стали, делая ее мягкой, податливой.

Основной источник фосфора - руды, из которых выплавляется исходный чугун. Фосфор является вредной примесью, способной в количестве до 1,2 % растворяться в феррите. Растворяясь в феррите, фосфор уменьшает его пластичность. Фосфор резко отличается от железа по типу кристаллической решетки, диаметру атомов и их строению. Поэтому фосфор располагается вблизи границ зерен и способствует их охрупчиванию, повышая температурный порог хладноломкости.

Скрытые примеси - кислород, азот, водород - присутствуют в стали либо в виде твердого раствора в феррите, либо в составе химических соединений (нитриды, оксиды), либо в свободном состоянии в порах металла.

Кислород и азот мало растворимы в феррите. Они загрязняют сталь хрупкими неметаллическими включениями, что снижает вязкость и пластичность стали. Водород находится в твердом растворе и

особенно сильно охрупчивает сталь. Повышенное содержание водорода, особенно в хромистых и хромоникелевых сталях, приводит к образованию внутренних трещин - флокенов.

Даже небольшие концентрации газов оказывают резко отрицательное влияние на свойства, ухудшая пластические и вязкие характеристики стали. Поэтому вакуумирование является важной операцией для улучшения свойств стали.

Mn в углеродистой стали содержится до (0,7 ÷ 0,8) %, Si в углеродистой стали содержится до 0,4 %; Mn и Si оказывают схожее воздействие на свойства углеродистых сталей: в указанных количествах раскисляют сталь и полностью растворяется в феррите, упрочняя его. Mn также уменьшает вредное влияние серы, связывая в тугоплавкие частицы и фиксируя внутри зерен: $\text{FeS} + \text{Mn} \rightarrow \text{MnS} + \text{Fe}$.

Кроме того, в углеродистых сталях присутствуют такие случайные примеси, как Cr, Ni, Cu, наличие которых обусловлено загрязненностью шихты.

По химическому составу углеродистые стали разделяют на следующие группы:

- низкоуглеродистые – менее 0,25 % C, считают мягкими;
- среднеуглеродистые – (0,25 ÷ 0,6) % C, средней твердости;
- высокоуглеродистые – более 0,6 % C, твердая.

Низкоуглеродистые стали марок 05, 08, 10, 15, 20. Часто именуются как **цементуемые стали**.



Цементация - поверхностное диффузионное насыщение малоуглеродистой стали углеродом с целью повышения твердости, износостойчивости.

Низкоуглеродистые стали малопрочные, но высокопластичные: $\sigma_b = 280 \div 460$ МПа, $\delta = 33 \div 45$ %. Хорошо штампуются и свариваются. Применяют как в горячекатаном виде и после нормализации, так и с цементацией поверхности. Предназначены для деталей небольшого размера (кулачки, толкатели, малонагруженные шестерни и др.), от которых требуется твердая износостойкая поверхность и вязкая сердцевина.

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45 и 50 - **улучшаемые стали**. Получили наибольшее распространение благодаря хорошему сочетанию прочностных и пластических свойств, хорошей обрабатываемости резанием. Они более прочные, но менее пластичны. Обладают следующими свойствами: $\sigma_b = 500 \div 600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 300 \div 360$ МПа, $\delta = (21 \div 16)$ % (в нормализованном состоянии) и $\sigma_b = 600 \div 700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 400 \div 600$ МПа, $\delta = 19 \div 20\%$ (после улучшения);



Улучшение – вид термообработки: закалка + высокий отпуск для получения структуры сорбит (структурная составляющая стали).

Высокоуглеродистые стали марок 60, 65, 70. Также относятся к улучшаемым. Стали этой группы обладают высокой прочностью, износостойкостью и упругостью, используются для изготовления деталей типа пружин. Прочность после улучшения (закалка + средний отпуск на троостит) для получения высокой прочности и упругости $\sigma_b > 800$ МПа.

По структуре углеродистые стали разделяют на следующие группы:

- доэвтектоидные (содержание углерода от 0,02% до 0,8%), структура – феррит+перлит;
- эвтектоидные (содержание углерода $\approx 0,8\%$), структура – перлит;
- заэвтектоидные (содержание углерода от 0,8% до 2,14%), структура – зерна перлита, окаймленные сеткой цементита.

Отсюда можно сделать вывод о том, что доэвтектоидные стали мягкие, заэвтектоидные твердые, но хрупкие, эвтектоидные стали имеют наиболее оптимальные свойства.

По степени раскисления углеродистые стали делятся на: кипящие, полуспокойные и спокойные.

Недостатки углеродистых сталей

Менее технологичны при термической обработке: высокая скорость охлаждения при закалке вызывает деформацию и коробление деталей. Кроме того, для получения прочности, сравнимой с прочностью легированной стали их следует подвергать отпуску при более низкой температуре, поэтому они сохраняют более высокие закалочные напряжения, снижающие конструкционную прочность. Главный их недостаток – небольшая прокаливаемость (т.е. способность закаливаться на определенную

глубину). Поэтому крупные детали изготавливают без термического упрочнения – в горячекатаном или нормализованном состоянии. По статической прочности они относятся к сталям нормальной прочности.

Углеродистые и низколегированные стали обладают невысокой коррозионной стойкостью в большинстве природных и промышленных сред и требуют соответствующих мер по защите от коррозии. Содержание в углеродистой стали таких компонентов как углерод, марганец, кремний, фосфор, медь не имеет существенного влияния на скорость коррозии. Примеси серы и азота выше допустимых концентраций могут ускорять коррозионный процесс.

Легированные стали

Легированные стали – это стали, в состав которых помимо железа и углерода добавлены легирующие элементы такие как хром, никель, молибден, марганец, кремний, вольфрам, титан и др. Легированные стали классифицируют по структуре, по количеству легирующих элементов и по назначению.

Легированные стали имеют целый ряд преимуществ перед углеродистыми. Они имеют более высокие механические свойства, прежде всего, прочность. Легированные стали обеспечивают большую прокаливаемость, а также возможность получения структуры мартенсита при закалке в масле, что уменьшает опасность появления трещин и коробления деталей. С помощью легирования можно придать стали различные специальные свойства (коррозионную стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, магнитные и электрические свойства). Необходимый комплекс свойств обычно обеспечивается не только легированием, но и термической обработкой, позволяющей получать наиболее оптимальную структуру металла. Применение легирующих элементов существенно влияет на себестоимость стали.

Легирующими называют элементы, специально вводимые в сталь для изменения ее строения и свойств. Соответственно стали, содержащие легирующие элементы, называются легированными. При этом, если содержание кремния превышает 0,4 % или марганца – 0,8%, то они также относятся к легирующим элементам.

Концентрация некоторых легирующих элементов может быть очень малой. В количестве до 0,1 % вводят Nb, Ti, а содержание бора обычно не превышает 0,005 %. Если концентрация элемента составляет около 0,1 % и менее, легирование стали принято называть микролегированием.

Для легирования применяются около 50 элементов из 104 элементов Периодической Системы. Основными легирующими элементами являются Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Al, Cu, Ti, Nb, Zr, B. Часто сталь легируют не одним, а несколькими элементами (комплексное легирование), например Cr и Ni, получая хромоникелевую сталь, Cr и Mn – хромомарганцевую сталь, Cr, Ni, Mo, V – хромоникельмолибденованадиевую сталь.

Если провести анализ диаграммы Fe-C можно заметить, что легирующие элементы оказывают влияние на области твердых растворов и температуры превращений в сплаве.

Находясь в стали, легирующие элементы входят в состав тех или иных фаз. Они могут:

- растворяться в феррите (Ф) или аустените (А);
- растворяться в цементите (Ц) или образовывать специальные карбиды

Стоит обратить отдельное внимание на **карбидообразующие легирующие элементы**.

Карбидообразующими легирующими элементами называют элементы, обладающие большим, чем железо, сродством к углероду. По возрастанию сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз карбидообразующие элементы располагаются в следующий ряд: Fe - Mn - Cr - Mo - W - Nb - Zr - Ti. Чем устойчивее карбид, тем труднее он растворяется в аустените и выделяется при отпуске. Препятствуют росту аустенитного зерна, упрочняют сталь, предотвращают МКК.

Классификация легированных сталей по химическому составу определяется суммарным процентом содержания легирующих элементов:

- низколегированные – менее 2,5 %;
- среднелегированные – (2,5 ÷ 10,0) %;
- высоколегированные – более 10,0 %.

По содержанию основных легирующих элементов:

В зависимости от состава (системы легирования) легированные стали классифицируются как:

- *хромистая*, с содержанием хрома 13-17-25 % – (08X13, 20X13, 40X13, 12X17, 14X17H2, 15X25Г и др.);

При содержании хрома (25 ÷ 30) % и 0,1% углерода сталь является окалиностойкой – способной выдерживать длительные и высокие нагревы (до 1100 °С) в окислительной атмосфере.

- *марганцовая сталь* (15Г, 20Г, 30Г и др.). Легированной марганцовой сталью принято считать сталь с содержанием марганца более 1 %. Такая сталь обладает высокой твердостью, сопротивлением износу, что дает возможность использовать её в деталях, подвергающихся высокому износу;

Следующие стали в данной группе являются сложнелегированными.

- *хромоникелевая сталь* (37ХНЗА), обладает высокими прочностью, твердостью и упругостью и применяемую в связи с этим для изготовления рессор и пружин;

- *хромомарганцовистая сталь* (20ХГ, 20ХГР, 40ХГР, 30ХГТ, 18ХГТ), применяемую частично в целях экономии никеля как заменитель хромоникелевой стали;

- *хромованадиевая сталь* (15ХФ, 50ХФА и др.), обладающую высокой прочностью, пластичностью, твердостью, упругостью и применяемую для изготовления ответственных пружин, валов, шестерен. Содержание ванадия обычно колеблется от 0,15 до 0,25 % и содержание хрома – около 1 %. Пружны изготовленные из этой стали, сохраняют упругие свойства при нагреве до 380 °С;

- *хромомолибденовая сталь* (например, 30ХМА). Молибден придает стали способность сохранять прочность при нагреве. Сталь обладает высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и теплоустойчивостью при температурах (400 ÷ 600) °С;

- *хромоникельвольфрамовая и хромоникельмолибденовую стали* (30ХНВА, 40ХНМА, 18Х2Н4ВА и др.), предназначенные для нагруженных деталей машины, зубчатых колес, коленчатых валов, высоконагруженных шатунов;

- *хромомарганцовокремнистая сталь* (20ХГСА, 25ХГС и др.) разработаны незадолго до Великой Отечественной войны как низколегированная сталь повышенной прочности. Не содержащей дорогостоящих элементов (никеля, молибдена, ванадия, вольфрама и пр.), а легированной хромом, марганцем и кремнием. Сталь легко сваривается, после соответствующей термической обработки не уступает по свойствам хромомолибденовой стали.

В арматуростроении и атомной энергетике наиболее востребованы конструкционные легированные стали и стали со специальными свойствами.

Легированные стали со специальными свойствами

К сталям с особыми свойствами относят сплавы, **для которых механические свойства**, как правило, **не имеют первостепенного значения**. Основным предъявляемым к этим сталям требованием является обеспечение определенного уровня физических свойств. Многие из этих сплавов высоколегированные, отличающиеся высокой точностью химического состава. Т.е., это стали обладающие каким-нибудь ярко выраженным свойством. Среди наиболее применяемых в арматуростроении и атомной энергетике выделим следующие группы: *нержавеющие, коррозионностойкие (жаропрочные, жаростойкие), теплоустойчивые,*

Также необходимо обратить внимание, что в ряде случаев стали содержат такое больше количество легирующих элементов, что их нужно причислять не к сплавам железа, т.е. не к сталям, а к *сложным многокомпонентным сплавам*. Однако четкой границы между такими сплавами и сталями нет (в соответствии с ГОСТ 5632-2014, условно принято, что если сумма легирующих элементов превосходит 50 %, то такой сплав не называют сталью). Более того, некоторые из таких сплавов могут вовсе не содержать железа, хотя по свойствам и назначению они близки к сплавам, в которых основной элемент железо.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали

Существует огромное количество ложных представлений о нержавеющей стали, даже само название вводит в заблуждение. Помимо железа и углерода, нержавеющая сталь содержит ряд легирующих добавок. Из них самой важной является хром. Если сталь содержит его более (10,5 ÷ 12) %, вся поверхность покрывается пленкой из оксида хрома. Эта пленка "пассивна": стойка к большинству воздействий и самовосстанавливается в присутствии кислорода. Именно оксид хрома защищает поверхность от ржавчины. При отсутствии кислорода оксидный слой разрушается, и нержавеющая сталь покрывается ржавчиной не хуже обычной. Иными словами, "нержавейка" не ржавеет только до тех пор, пока имеется доступ кислорода и покрывающие ее окисел хрома не разрушен.

Граница содержания хрома (10,5 ÷ 12) % установлена при измерениях потенциалов твердых растворов железо-хром, где резкое изменение потенциала наступает в указанной границе содержания хрома. Чем выше содержание хрома, тем больше увеличивается способность нержавеющей стали противостоять коррозии в различных средах. Справедливости ради, стоит отметить, что сталь с содержанием 12 % хрома будет устойчива только к атмосферным окислителям (в первую очередь кислороду воздуха), а с высоким содержанием хрома (порядка (17 ÷ 19) %), при определённых условиях, всё же подвержена коррозии. Также высокое содержание хрома приводит к повышению хрупкости и ударной вязкости стали. Сталь, содержащая только хром достаточно хрупкая.

Другим элементом, который обеспечивает антикоррозионные свойства, является **никель**. Как легирующий элемент, никель вводится в металлический сплав с определенным содержанием углерода и хрома и способствует образованию твердых прочных связей, а также усилению защитных свойств. Стали с высоким содержанием никеля особенно распространены в среде, где необходимо предотвратить появление межкристаллитной коррозии. Помимо хрома и никеля, повышению антикоррозионных свойств способствуют такие элементы, как **медь, молибден, марганец, алюминий, кремний**. В качестве специальных стабилизирующих элементов часто вводят титан и ниобий. **Титан** обеспечивает повышенную стойкость к межкристаллитной коррозии. Различия в коррозионном поведении различных марок сталей проявляется главным образом в сварных соединениях. Это определяется разностью электродных потенциалов трех элементов сварного соединения: основной металл, сварной шов и зона термического влияния. Выбор сварочных электродов и технологии сварки производится с таким расчетом, чтобы три указанных элемента имели приблизительно одинаковые потенциалы.

Более подробная информация о легирующих элементах и их влиянии на свойства сталей – представлены в приложении 1.

Другие легирующие элементы, вводимые в сталь, могут улучшать или ухудшать антикоррозионные свойства железо-хромистого сплава. Например, углерод, связывающий хром в частицы карбидов $Cr_{23}C_7$ и т. п., удаляет его из твердого раствора. С увеличением содержания углерода в стали скорость коррозии в кислых растворах увеличивается.

Марганец, улучшая механические свойства железноуглеродистых сталей (0,5 ÷ 0,8)%, не оказывает влияния на скорость коррозии. Специальные стали (марганцевые), содержащие 12 % марганца, обладают повышенной коррозионной устойчивостью.

Содержание кремния в сталях до 0,3 % не оказывает влияния на коррозионную стойкость стали. При увеличении содержания кремния в специальных кремнистых сталях скорость коррозии повышается, что, возможно, связано со склонностью этих сталей к растрескиванию. А при содержании кремния свыше 14 % наблюдается повышение коррозионной стойкости.

Сера образует с железом и марганцем сульфиды, которые являются катодными включениями и способствуют увеличению скорости коррозии.

Один и тот же сплав может иметь несколько порогов устойчивости в зависимости от характера и агрессивности среды, от наличия примесей в сплаве и от состояния его поверхности. Так, для хромистых сталей первый порог устойчивости, соответствующий содержанию хрома 12,5 %, обеспечивает стойкость их в холодной разбавленной азотной кислоте, повышение содержания хрома до 25 % соответствует второму порогу устойчивости, при котором сталь оказывается стойкой даже в кипящей азотной кислоте. Дальнейшего повышения коррозионной стойкости сплавов можно достигнуть дополнительным легированием помимо хрома, например никелем.

Детали из коррозионностойких сталей работают при температуре эксплуатации до (550 ÷ 600) °С. Физико-химические свойства коррозионностойких сталей меняются в довольно широком диапазоне в зависимости от структуры.

Для того чтобы удалить с поверхности остаточное железо и сделать поверхностную пленку значительно более равномерной и устойчивой к местной коррозии, может использоваться такая технологическая операция как пассивирование.



Пассивация стали, железа и других металлов основана на методах, в основе которых лежит химическое взаимодействие поверхностного слоя металла с разными растворами прочих металлов. В итоге на поверхности образуется пассивирующий слой, обладающий новыми химико-физическими характеристиками. Такой слой формирует надежный барьер, препятствующий окислению, за счет чего создается надежная защита от ржавчины.

Коррозионная стойкость сталей может быть повышена термической обработкой (закалкой и высоким отпускком) и созданием шлифованной поверхности.

Наиболее распространенные отечественные и импортные марки нержавеющей сталей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Распространенные импортные марки сталей и их отечественные аналоги

Обозначение				Содержание легирующих элементов, %						
*	EN	AISI	ГОСТ	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti
C1	1.4021	420	20X13	0,20	1,5	1,0	12,0 ÷ 14,0	-	-	-
F1	1.4016	430	12X17	0,08	1,0	1,0	16,0 ÷ 18,0	-	-	-
A2	1.4301	304	12X18H9	0,07	2,0	0,75	18,0 ÷ 19,0	8,0 ÷ 10,0	-	-
	1.4948	304H	08X18H10	0,08	2,0	0,75	18,0 ÷ 20,0	8,0 ÷ 10,5	-	-
	1.4306	304L	03X18H11	0,03	2,0	1,0	18,0 ÷ 20,0	10,0 ÷ 12,0	-	-
A3	1.4541	321	08X18H10T	0,08	2,0	1,0	17,0 ÷ 19,0	9,0 ÷ 12,0	-	5×C-0,7
A4	1.4401	316	03X17H14M2	0,08	2,0	1,0	16,0 ÷ 18,0	10,0 ÷ 14,0	2,0 ÷ 2,5	-
	1.4435	316S	03X17H14M3	0,08	2,0	1,0	16,0 ÷ 18,0	12,0 ÷ 14,0	2,5 ÷ 3,0	-
	1.4404	316L	03X17H14M3	0,03	2,0	1,0	17,0 ÷ 19,0	10,0 ÷ 14,0	2,0 ÷ 3,0	-
A5	1.4571	316Ti	08X17H13M2T	0,08	2,0	0,75	16,0 ÷ 18,0	11,0 ÷ 12,5	2,0 ÷ 3,0	5×C-0,8
	1.4845	310S	20X23H18	0,08	2,0	0,75	24,0 ÷ 26,0	19,0 ÷ 21,0	-	-

* A1, A2, A3, A4, A5 – стали аустенитного класса;

C1 – стали мартенситного класса;

F1 – ферритного класса

Примечания:

Марки импортных коррозионностойких нержавеющей сталей – это стали серии 300 и 400.

Наиболее применимы марки серии «300»: это 301, 303, 304, 316, 317, 321, 314 (по возрастанию содержания легирующих добавок). Стали 316, 317, 321, 347 содержат молибден.

Марки могут иметь добавочные индексы: L или LN. L имеет низкое содержание углерода (такие стали будут более пластичны); NL – это разновидность с меньшим содержанием азота.

Классификация нержавеющей сталей

В Российской Федерации номенклатура и химический состав коррозионностойких сталей и сплавов обусловлены ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные», в котором приведена классификация выпускаемых материалов по основным элементам и структурной принадлежности. Стандарт охватывает стали, а также сплавы на железоникелевой и никелевой основах.

По ГОСТ 5632-72 стали подразделяют на следующие структурные классы:

- мартенситный – стали с основной структурой мартенсита и содержащие при комнатной температуре не более 10 % остаточного аустенита и феррита, т. е. претерпевающие практически полное мартенситное превращение ($\gamma \rightarrow M$) при охлаждении на воздухе с температуры несколько выше АСз (07X16H4Б, 15X11MФ, 20X13, 20X17H2);

- мартенситно-ферритный – стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10 % феррита. Это стали с частичным фазовым превращением, отличающиеся от чисто мартенситных повышенным содержанием ферритообразующих элементов. При температуре выше Асз их структура состоит из аустенита и феррита, при комнатной температуре - из мартенсита и феррита (12X13, 14X17H2);

- ферритный – однофазные стали со структурой феррита, т. е. не претерпевающие $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения при высокотемпературном нагреве и охлаждении. Они отличаются более высоким соотношением феррито- и аустенитообразующих элементов по сравнению с мартенситными и мартенситно-ферритными сталями; аустенитно-мартенситный - стали, имеющие после охлаждения на воздухе из γ -области преимущественно аустенитную структуру с некоторым (обычно не более 20 %) количеством мартенсита, причем соотношение этих структурных составляющих достаточно легко изменяется в широких пределах при термической и механической обработке вследствие недостаточной стабильности аустенита (08X13, 12X17);

- аустенитно-ферритный – стали, имеющие при комнатной температуре структуру аустенита с содержанием феррита 40-60 % (03X22H5AM3, 03X22H6M2);

- аустенитный – стали, имеющие после закалки от высоких (1000 ÷ 1100 °С) температур структуру аустенита (03X17H14M3, 03X18H10T, 03X18H11, 08X18H10, 08X18H10T, 08X18H12T).

Подразделение стали на классы по структурным признакам и для нержавеющей сталей является условным, так как предполагает только одну термическую обработку, а именно – быстрое охлаждение после высокотемпературного нагрева (свыше 900 °С) образцов небольших размеров. Поэтому структурные отклонения в стали браковочным признаком не являются.

Стали мартенситного и ферритного класса обладают свойством намагничивания, а аустенитные стали – немагнитны. Таким образом, испытание постоянным магнитом поможет определить лишь только то, к какому классу относится нержавеющая сталь.

Общая характеристика сталей различных структурных классов

Мартенситные стали – безникелевые низкохромистые стали с основной структурой мартенсита и содержащие при комнатной температуре не более 10 % остаточного аустенита и феррита. Практически не содержат никаких других элементов кроме хрома. Стали данной группы упрочняются закалкой (приобретают высокую твердость) как обычные стали. Содержат (12 ÷ 16) % Cr; (0,1 ÷ 0,5) % C, иногда до 1 %. Обладают высокими механическими свойствами.

Мартенситные стали обладают достаточно высокой стойкостью против равномерной коррозии в атмосферных условиях (кроме морской атмосферы), слабых растворах кислот и солей при комнатной температуре и других слабоагрессивных средах. Стали используют в основном как материалы с повышенной твердостью и прочностью для изделий, работающих на износ, в качестве упругих элементов или режущего инструмента. Из-за малого содержания хрома склонны к МКК. К данному классу сталей относятся: 20X13, 30X13, ASI 403, ASI 410, ASI 420M ASI 431.



В зарубежной практике стали мартенситного класса в зависимости от количества углерода имеют переменное содержание хрома, например, стали, имеющие до 0,15 % C, легированы (12 ÷ 14) % Cr, (0,20 ÷ 0,40) % C до (13 ÷ 15) % Cr и (0,6 ÷ 1,4) % C до (14 ÷ 15) % Cr.

Ферритные стали – безникелевые высокохромистые стали, имеющие структуру феррита (без $\alpha \rightarrow \gamma$ превращений). Содержат (16 ÷ 30) % Cr, содержание углерода должно быть очень низким для менее богатых хромом сталей. Их структура стабильна при нагревании и при охлаждении они не могут закаливаться. Склонны к росту зерна при высоких температурах и к хрупкости, относительно не высокие механические свойства.

Удовлетворительная коррозионная стойкость (выше мартенситных). По стойкости против коррозионного растрескивания ферритные стали также существенно превосходят аустенитные стали типа 08X18H10T.

Стойкость против питтинговой коррозии стали ферритного класса приобретают при концентрации Cr > 18 % и дополнительном легировании молибденом. Стойки к радиационному распуханию.

Ниже перечислены некоторые особенности хромистых сталей ферритного класса:

Несмотря на то, что традиционные хромистые коррозионностойкие стали ферритного класса представляют наиболее экономнолегированную группу сталей, широкое использование их в качестве конструкционного материала не всегда возможно из-за следующих особенностей:

- повышенной склонности к росту зерна при нагреве из-за отсутствия полиморфных превращений. При температуре нагрева (850 ÷ 900) °С в ферритных сталях начинается активный рост зерна, который

сопровождается повышением температуры перехода в хрупкое состояние и увеличением склонности к межкристаллитной коррозии.

Полученное в результате технологических операций крупное зерно невозможно устранить термической обработкой. Привести ферритную сталь из крупнозернистого состояния в мелкозернистое возможно только с помощью горячей пластической деформации с температурой конца деформации (700 ÷ 750) °С и последующей стандартной термической обработкой.

- низкой хладостойкости сталей и их сварных соединений (до минус 20 °С);

Решающее влияние на хладостойкость ферритных сталей оказывают примеси внедрения – углерод и азот, а также фосфор и кислород.

- склонность к МКК проявляется при нагреве свыше (900 ÷ 1000) °С и быстрого охлаждения. Углерод и азот в ферритных сталях является причиной возникновения МКК.

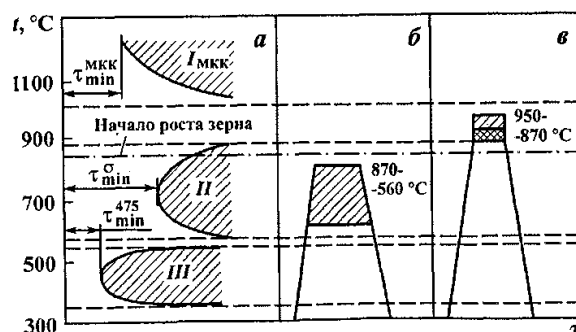
- ограниченная способность к формоизменению при холодной пластической деформации;

- «475-градусная хрупкость» и выделение хрупкой σ -фазы. Оба этих процесса приводят к повышению прочности и твердости, но значительной потере пластичности и вязкости.

При (350 ÷ 540) °С в ферритных хромистых сталях происходят процессы вызывающее резкое снижение ударной вязкости практически до нуля. Это явление называют «475-градусной хрупкостью». Процесс (во времени) состоит из двух стадий. Нагрев при 480 °С в течение 1 часа приводит к образованию зон упорядоченного твердого α -раствора в основном по приграничным областям с низкой пластичностью. При выдержках более (2 ÷ 4) часов происходит расслоение твердого раствора по всему объему зерен. Наблюдается быстрое и значительное снижение ударной вязкости. Для устранения «475-градусной хрупкости» сталь следует подвергнуть кратковременному нагреву при температуре свыше 550 °С, т.е. выше области возникновения хрупкости. Скорость охлаждения в интервале (350 ÷ 550) °С должна быть достаточно высокой для предотвращения возникновения повторной «475-градусной хрупкости»

В диапазоне (650 ÷ 850) °С происходит выделение « σ -фазы». Эта фаза представляет собой интерметаллидное соединение железа с хромом (содержание хрома до 45 %). Фаза характеризуется высокой твердостью и хрупкостью; выделение « σ -фазы» сопровождается обеднением α -раствора хромом и, соответственным, снижением коррозионной стойкости. Предварительная холодная пластическая деформация стимулирует выделение « σ -фазы».

Хрупкость, полученная в результате выделения σ -фазы, может быть устранена нагревом до температур, вызывающих ее растворение. Обычно для чисто хромистых сталей применяют нагрев при (870 ÷ 900) °С в течение 1 ч с охлаждением в воде, т.к. скорость охлаждения в диапазоне температур (350 ÷ 550) °С должна быть достаточно высокой, чтобы также предупредить повторное развитие «475-градусной хрупкости» (рисунок 2).



I – МКК; II – выделение σ -фазы; III – «475-градусная хрупкость»

Рисунок 2. Схема термической обработки хромистых коррозионностойких сталей

Если сталь легирована молибденом, никелем и другими легирующими элементами, то, растворение « σ -фазы» наступает при температурах (900 ÷ 950) °С и более длительных выдержках. Таким образом, эти виды хрупкости имеют обратимый характер и устраняются соответствующей термической обработкой.

Применение ферритных хромистых сталей с $(0,08 \div 0,12) \%$ С в качестве коррозионностойких материалов ограничивается тонкостенными до $(3 \div 5)$ мм сварными изделиями неотчетственного назначения. При отсутствии сварки диапазон применения этих сталей может быть расширен. Кроме того, их можно использовать в сварных конструкциях достаточно большого сечения при температуре ниже $(100 \div 350) ^\circ\text{C}$. Этот интервал ограничен, с одной стороны, температурой перехода в хрупкое состояние, а с другой - температурой начала развития «475-градусной хрупкости».

Аустенитные стали (хромоникелевые и хромникельмолибденовые/титановые стали), имеющие структуру устойчивого аустенита после закалки от высоких температур: $(1000 \div 1100) ^\circ\text{C}$. Отсутствие точки превращения у этих сталей делает их восприимчивыми к росту зерна. Стали данного класса не упрочняются при закалке.

Основными легирующими элементами определяющими аустенитную структуру стали являются никель и (в меньшей степени) марганец. Кроме того, никель оказывает влияние на определенные механические свойства нержавеющей сталей.



Вспомним: никель – второй по значимости легирующий элемент, при введении которого повышается коррозионная стойкость стали и одновременно улучшается механическая прочность, пластичность, а также способность к сварке. Легирование никелем в количестве $(9 \div 12) \%$ переводит сталь в аустенитный класс, что обеспечивает сталям данного класса высокую технологичность в сочетании с уникальным комплексом служебных свойств. Это дает возможность использовать стали типа 18-10 в качестве коррозионностойких, жаростойких, жаропрочных и криогенных материалов. Хромоникелевые стали более «технологичны», чем хромистые.

В последнее время в связи с ростом цен на никель все чаще начали применяться более дешевые, так называемые экономно легированные стали, в которых процентное содержание никеля снижено $(4 \div 5) \%$, а вместо дорогого никеля используется более дешевый марганец $(8 \div 10) \%$. Для стабилизации структуры такого типа стали, в нее добавляется медь $(1,5 \div 2) \%$. Недостатком экономно легированных сталей является их склонность к трещинообразованию при глубокой вытяжке. Причем образование трещин происходит по направлению движения рабочего инструмента как непосредственно в процессе вытяжки, так и через некоторое время после того. Вероятность трещинообразования напрямую зависит от толщины материала. Чем материал (лист) тоньше, тем больше вероятность образования таких трещин.

К этой группе сталей относятся самые распространенные и используемые в арматуростроении стали аустенитного класса 18-8. Которые в свою очередь разделяются по содержанию углерода, стабилизированные (титаном и/или ниобием) и нестабилизированные.

Также хромоникелевые стали делят на следующие подгруппы:

- хромоникелевые аустенитные стали с малым содержанием углерода, в т.ч. нестабилизированные титаном и ниобием;
- хромоникелевые аустенитные стали стабилизированные;
- хромоникелевые кислотостойкие аустенитные стали с присадкой молибдена и меди;
- хромоникелевые окислительностойкие стали с высоким содержанием хрома и никеля



Стали стабилизированные титаном, используются в средах высокой агрессивности, а также для изделий, работающих при температурах до $600 ^\circ\text{C}$. Пригодны для свариваемых деталей.

Стали стабилизированные ниобием рекомендуются для использования в средах высокой агрессивности, а также как присадочный материал для сварки хромоникелевых сталей.

Стали стабилизированные титаном и содержащие молибден, применяются в специфических средах, например, кипящих кислотах, морской воде.

Имея в составе в среднем 18% Cr, данные стали коррозионностойки во многих средах окислительного характера в широком диапазоне концентраций и температур. Кроме того, они обладают жаростойкостью и жаропрочностью при умеренных температурах.

- выделение избыточных карбидных фаз и **σ -фазы** при нагреве в интервале $(450 \div 900) ^\circ\text{C}$;
- образование в аустенитной основе **δ -феррита** при высокотемпературном нагреве;
- образование **α -фазы** мартенситного типа при холодной пластической деформации или охлаждении ниже комнатной температуры.



Присутствие в структуре аустенитной стали δ -феррита оказывает отрицательное влияние на ее технологичность при горячей пластической деформации – прокатке, прошивке, штамповке и т.д. Содержание δ -феррита ограничивают с помощью регулирования соотношения между хромом и никелем, а также углеродом и титаном.

Большинство хромоникелевых сталей проявляет склонность к МКК, которая в первую очередь определяется содержанием углерода. Установлено, что необходимая степень стойкости стали против МКК, позволяющей выполнять сварочные операции на достаточно больших сечениях, обеспечивается в интервале (0,021 ÷ 0,054) % С и обычно на практике ее принимают равной 0,03 %С. Необходимо учитывать, что снижение углерода до уровня 0,012 % и 0,006 % не обеспечивает полной стойкости сталей типа 18-10 к МКК в интервале (500 ÷ 600) С, то представляет опасность при длительной эксплуатации в данном интервале температур.

Также к недостаткам хромоникелевых сталей следует отнести, характерную для пассивирующихся металлов, подверженность точечной и щелевой коррозии в растворах, содержащих ионы хлора и окислитель. Добавление молибдена повышает стойкость к этим видам коррозии.


Термическая обработка хромоникелевых сталей аустенитного класса сравнительно проста и заключается в закалке в воде с (1050 ÷ 1100) °С. Нагрев до этих температур вызывает растворение карбидов хрома, а за счет относительно быстрого охлаждения фиксируется аустенитная структура. Кроме того, при закалке происходят рекристаллизационные процессы, устраняющие последствия пластической деформации, которой часто подвергаются аустенитные стали. Также обеспечивается коррозионная стойкость. Для аустенитных сталей этого типа закалка является смягчающей термической обработкой. После закалки на аустенит хромоникелевые стали обладают высокими пластическими свойствами. При этом, чем выше температура закалки, тем меньше прочность и твердость и выше пластичность. При холодной деформации происходит значительный рост предела прочности, текучести и твердости. Также при холодной деформации происходит изменение магнитных свойств.

Закалка является **эффективным средством предупреждения МКК** и придания стали оптимального сочетания механических и коррозионных свойств. Однако, она не всегда удобна при проведении термической обработки крупногабаритных и сложных, особенно сварных деталей и конструкций. Высокая температура нагрева и быстрое охлаждение может привести к короблению конструкций. В этих случаях часто применяют стабилизирующий отжиг, который проводят при более низких температурах. Если при закалке происходит растворение карбидов, то при отжиге происходит их перевод в неопасное для МКК состояние (нестабилизированные стали) или осуществляют их перевод в специальные карбиды (в случае стабилизированных сталей).

Аустенитно-мартенситные стали – стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах при термической и механической обработке вследствие недостаточной стабильности аустенита. Применяются в тех случаях, когда наряду с высокой коррозионной стойкостью требуется повышенная прочность. Марки: 07X16H6, 03X14H7B, X15H9Ю, X17H7Ю.

Мартенситно-ферритный – стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10 % феррита. Механические и физические свойства этих сталей определяются количеством аустенита, перешедшего в мартенсит, и дополнительным процессам карбидного и интерметаллидного упрочнения. Высокие прочностные свойства стали переходного класса достигаются после комплексной термической обработки, состоящей из закалки или нормализации при температурах (925 ÷ 1050) °С, обработки холодом в диапазоне от минус 50 °С до минус 70 °С или высокого отпуска при (745 ÷ 775) °С и старения при (350 ÷ 500) °С с охлаждением на воздухе. В зарубежных источниках данный класс сталей называют полуаустенитными, или дисперсионно-твердеющими. Более подробно будут рассмотрены ниже.

При увеличении содержания хрома свыше 20 % в аустенитных хромоникелевых сталях (содержание никеля от (6,5 ÷ 8) %, дальнейшее увеличение содержания никеля препятствует образованию феррита), вместо чисто аустенитной структуры наблюдается смешанная – аустенитно-ферритная. Такие коррозионностойкие стали, имеющие мелкозернистую смешанную микроструктуру чередующихся зерен аустенита и феррита, называют «*дуплексными*».

 *Однофазные стали обладают недостатками: у аустенитных сталей низкая прочность ($\sigma_{0,2}$ в состоянии после аустенизации – 200 МПа), низкое сопротивление коррозионному растрескиванию; у ферритных – низкая прочность (немного выше, чем у аустенитных $\sigma_{0,2} = 250$ МПа), плохая свариваемость при больших толщинах, низкотемпературная хрупкость. Кроме того, высокое содержание никеля в аустенитных сталях приводит к их удорожанию.*

Наличие двухфазной структуры придает сталям аустенитно-ферритного класса свойства, которые характерны в отдельности для аустенитных и ферритных сталей. В то же время стали данного класса обладают свойствами, которые определяют самостоятельные области их применения.

Аустенитно-ферритные стали были разработаны как заменители хромоникелевых сталей аустенитного класса. Обе эти фазы вследствие высокого содержания в них хрома являются коррозионностойкими. Коррозионная стойкость нержавеющей дуплексных сталей – аналогична аустенитным нержавеющей сталям. Однако дуплексные нержавеющей стали обладают более высокой прочностью и пределом текучести при растяжении и лучше противостоят трещинообразованию от коррозии под напряжением, чем их аустенитные аналоги. Использование аустенитно-ферритных сталей взамен аустенитных позволяет снизить металлоемкость оборудования.

Аустенитно-ферритные стали не подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением: трещины могут возникать только на аустенитных участках, но ферритные участки задерживают их развитие. Стойкость сталей аустенитно-ферритного класса против КР зависит от соотношения аустенита и феррита в структуре, химического состава фаз, степени чистоты сталей по примесным элементам, уровня приложенных напряжений, температуры и природы хлорида. Наибольшей стойкостью против коррозионного растрескивания эти стали обладают при содержании (40 ÷ 50) % феррита в структуре.

Стали «дуплекс» особенно устойчивы к эрозии благодаря сочетанию высокой поверхностной твердости и хорошей общей коррозионной стойкости. Поэтому стали «дуплекс» идеально подходят для систем с водой, с содержанием твердых частиц, таких как песок или кристаллы соли.

Аустенитно-ферритные стали **более устойчивы против МКК, чем аустенитные**, независимо от стабилизации. МКК коррозия возникает в аустенитно-ферритных сталях при более низких температурах и длительных выдержках, практически не наблюдаемых при технологических операциях. Отсутствие склонности к МКК позволяет применять эти стали для деталей, которые нельзя подвергать термической обработке с последующим охлаждением в воде. Литейные дефекты можно устранять с помощью сварки без выполнения последующей термической обработки. Это относится к наплавке тех участков деталей, которые подвержены износу вследствие трения или, например, явлений кавитации. Отливки из дуплексных сталей получаются более качественными и плотными.

В таблице 2 для справки приведен типичный состав зарубежных дуплексных нержавеющей сталей:

Таблица 2 – Состав зарубежных дуплексных сталей

Номер по EN/UNS	Тип	Примерное содержание, %						
		Cr	Ni	Mo	N	Mn	W	Cu
1.4362/ S32304	Низколегированная	23,0	4,8	0,3	0,10	-	-	-
1.4462/ S31803, S32205	Стандартная	22,0	5,7	3,1	0,17	-	-	-
1.4410/ S32750	Супер	25,0	7,0	4,0	0,27	-	-	-
1.4507/ S32520, S32550	Супер	25,0	6,5	3,5	0,25	-	-	1,5
1.4482/ S32001	Низколегированная	20,0	1,8	0,2	0,11	4,2	-	-
1.4162/ S32101	Низколегированная	21,5	1,5	0,3	0,22	5,0	-	-
1.4062/ S32202	Низколегированная	23,0	2,5	0,3	0,2	1,5	-	-
1.4501/ S32760	Супер	25,0	7,0	3,2	0,25	-	0,7	0,7

В России дуплексные стали не получили широкого применения.

Отечественной металлургией производятся аустенитно-ферритные стали трех поколений:

- первого поколения – стали (выпускаются с 1955 г.), содержащие менее 0,12 % С и стабилизированные титаном 12Х2, Ш5Т (ЭИ811), 08Х22Н6 (ЭП53), 08Х21Н6М2Т (ЭП54));
- второе поколение – стали с содержанием углерода менее 0,03 % С, нестабилизированные: 03Х23Н6 (ЗИ68) и 03Х22Н6М2 (ЗИ67);

- третье поколение – стали с содержанием углерода менее 0,03 % С, нестабилизированные, дополнительно легированные азотом (до 0,35 %): 03Х24Н6АМЗ (ЗИ130) и 05Х22Н7АМЗД (ЭК72).

Наилучшим комплексом свойств обладают низкоуглеродистые азотсодержащие стали третьего поколения. Наиболее перспективна в данной группе сталь 03Х24Н6АМЗ (ЗИ130).

Жаропрочные стали

Жаропрочные стали должны обладать высоким сопротивлением химической коррозии, но вместе с тем, обеспечивать надежную работу под нагрузкой (то есть иметь достаточно высокие пределы ползучести и длительной прочности) при температурах эксплуатации выше (400 ÷ 450) °С и сохранять механические свойства.



Механическая прочность металлов, нагретых выше некоторой, определенной для данного металла, температуры зависят от скорости, с которой производится нагружение. При больших скоростях нагружения сопротивление разрушению всегда выше, чем при малых скоростях деформирования.

Жаропрочные стали и сплавы в своем составе обязательно содержат **никель**, который обеспечивает существенное увеличение предела длительной коррозионной прочности при незначительном увеличении предела текучести и временного сопротивления, и **марганец**. Они могут дополнительно легироваться молибденом, вольфрамом, ниобием, титаном, бором и др. Так микролегирование бором, а также редкоземельными и некоторыми щелочноземельными металлами повышают такие характеристики, как число оборотов при кручении, пластичность и вязкость при высоких температурах. Механизм этого воздействия при микролегировании основан на рафинировании границ зерна и повышении межкристаллитной прочности. Химический состав и структура этих сталей весьма разнообразны.

Рабочие температуры современных жаропрочных сплавов составляют примерно (45 ÷ 80) % от температуры плавления. Эти стали классифицируют по температуре эксплуатации:

- при (400 ÷ 550) °С – 15ХМ, 12Х1МФ, 25Х2М1Ф, 20Х3МВФ;
- при (500 ÷ 600) °С – 15Х5М, 40ХЮС2М, 20Х13;
- при (600 ÷ 650) °С – 12Х18Н9Т, 45Х14Н14В2М, ЮХЦН23Т3МР, ХН60Ю, ХН70Ю, ХН77ТЮР, ХН56ВМКЮ, ХН62МВМКЮ, ХН35ВТ.

Особенности поведения металлов в области высоких температур вызывают необходимость применения специальных методов испытаний и установления особых критериев механической прочности в нагретом состоянии. В большинстве случаев жаропрочность оценивается с помощью определения следующих характеристик:

- *предел ползучести* – напряжения, при котором через определенных промежутков времени деформация ползучести при данной температуре получит заранее заданную величину;
- *предел длительной прочности* – напряжения, вызывающего разрушение металла при заданной температуре за определенных отрезков времени;
- *кратковременной прочности*, представляющей предел прочности при данной температуре.



Металлы, нагретые до определенной для каждого металла температуры (для нелегированной стали выше (300 ÷ 440) °С, обнаруживают способность постепенно пластически деформироваться («течь» или «ползти») при длительных постоянных нагрузках несмотря на то, что эти нагрузки значительно ниже показателей сопротивления деформированию при кратковременных испытаниях. Это явление называется ползучестью металлов.

Эксплуатируемые при повышенных температурах детали, как правило, рассчитываются на длительные периоды работы в нагретом состоянии, основными критериями их качества являются показатели не кратковременной, а длительной прочности. Предел ползучести и предел длительной прочности в большинстве случаев лимитируют возможность дальнейшего повышения напряжений в этих деталях.

Жаропрочные стали способны работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и при этом обладают достаточной жаростойкостью.

Жаростойкие стали

Жаростойкие (окалиностойкие) стали обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах, в том числе серосодержащих, при температурах в диапазоне от 550 °С до 1200 °С в воздухе, печных газах (15Х5, 15Х6СМ, 40Х9С2, 30Х13Н7С2, 12Х17, 15Х28), окислительных и науглероживающих средах (20Х20Н14С2, 20Х23Н18) и работают в ненагруженном или слабонагруженном состоянии, так как могут проявлять ползучесть при приложении больших нагрузок.

Жаростойкие стали характеризуют по температуре начала интенсивного окисления. Величина этой температуры определяется содержанием хрома в сплаве. Жаростойкие стали легируют никелем, кремнием, алюминием.

Жаростойкие стали и сплавы получают на базе системы легирования (Fe + Cr + Ni) с небольшим количеством кремния, алюминия. Чем выше содержания хрома, тем больше жаростойкость. Например, обычная хромистая нержавеющая сталь, содержащая (12 ÷ 14) %Cr жаростойка приблизительно до температуры (750 ÷ 800) °С, хромистая сталь с содержанием хрома до 25% Cr – 1000 °С, а сталь с (30 ÷ 35) % – до 1100 °С.

Жаростойкость зависит от состава стали, а не от ее структуры, поэтому жаростойкость ферритных и аустенитных сталей при равном количестве хрома практически одинакова. Положительное влияние на повышение жаростойкости стали оказывают также такие добавки как Si и Al в количестве порядка нескольких процентов.

Теплоустойчивые стали

Теплостойкими или теплоустойчивыми называют стали, работающие при температурах до (500 ÷ 580) °С в течение $t = 10^4 \div 10^6$ часов. По степени легирования к теплоустойчивым сталям относятся низко- и среднелегированные перлитные стали, а также 5 ÷ 13 % хромистые мартенситные и мартенситно-ферритные стали. Содержание углерода в этих сталях составляет 0,08 ÷ 0,17 %. В соответствии с условиями эксплуатации теплоустойчивые стали должны обладать сопротивлением ползучести, длительной прочностью и жаростойкостью. Стабильность перечисленных свойств в указанном интервале температур достигается путем легирования сталей хромом (0,5 ÷ 2,0 %), молибденом (0,2 ÷ 1,0 %), ванадием (0,1 ÷ 0,3 %), добавками W, Ti, Si и соответствующей термообработкой (улучшением).



Известны два направления достижения требуемого уровня теплостойкости.

Первый путь – обеспечение длительной прочности за счет структурного упрочнения твердого раствора хромом и молибденом, что увеличивает температуру рекристаллизации железоуглеродистого сплава и снижает интенсивность диффузионных процессов (разупрочнение) при высокотемпературной эксплуатации. Кроме того, в процессе длительной эксплуатации при $T = 450 \div 600$ °С молибден образует с железом интерметаллид Fe_2Mo (фазу Лавеса), что также повышает длительную прочность стали, за счет дисперсионного твердения, т.е. созданием по границам зерен препятствий для движения дислокации. Оптимальным содержанием Mo в стали считается 0,4...1,3 %.

Второй путь структурного упрочнения стали – это введение в сталь карбидообразующих – ванадия и ниобия. Эти элементы, находясь в металле в виде высокодисперсных карбидов VC и NbC, растворенных в зернах, также повышают длительную прочность стали. Поэтому теплоустойчивые стали с карбидным упрочнением (содержащие Nb и V) подвергают полной термической обработке: закалке на мартенсит и высокому отпуску. Во время последнего и образуются мелкодисперсные карбиды VC и NbC. Однако длительная эксплуатация изделий при $T = 550 \div 600$ °С приводит к коагуляции этих карбидов и их концентрации по границам зерен, что ведет к межзеренному разрушению (охрупчиванию) и снижению теплостойкости сталей. Поэтому для сварных конструкций предпочтительным является первый путь структурного упрочнения стали, так как он позволяет получать более пластичный металл по сравнению с карбидным упрочнением и обеспечивает большую стабильность структуры в процессе длительной эксплуатации.

Теплостойкие стали используются для изготовления сварных узлов парогенераторов, трубопроводных систем энергетических и нефтехимических установок, атомных реакторов и т.д. Наиболее известными являются марки сталей 12ХМ, 12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ (Траб = 450 ÷ 550 °С) и 12Х1МФ, 15Х1МФ, 20ХМФЛ, 12Х2МФЛ и др. (Траб = 550 ÷ 580 °С). Химический состав и свойства сталей регламентированы ГОСТ 20072-74. Оптимальные механические свойства и их стабильность в течение 100000 ч (10 лет) обеспечиваются структурой перлита, получаемой после закалки (нормализации) с последующим высоким отпуском.

Износостойкие стали

Износ – это процесс изменения размеров формы, массы или состояния поверхностного слоя под влиянием внешней среды.

Износ вызывается трением деталей машин или воздействием на поверхность рабочей среды потоков жидкостей, газов.

Износостойкими называют стали, которые способны выдерживать большие механические и сжимающие нагрузки, воздействие скольжения и трения, и могут использоваться в экстремальных условиях.

По химическому составу могут быть высокоуглеродистыми (1,1 ÷ 1,3) %С или малоуглеродистыми и высоколегированными (Si, Mn, Cr, Ni и др.). Основное потребительское свойство этих сталей - высокая стойкость деталей при кавитационной коррозии и механическом изнашивании при значительных ударных нагрузках. Эти стали (12Х18Н9Т, 30Х10Г10, Х14АГ12, Х14АГ12М, Г13) применяют чаще в литом или кованном (катанном) состоянии, так как их общее технологическое свойство - пониженная обрабатываемость резанием. Износостойкие стали используются для изготовления лопастей гидротурбин и гидронасосов, крестовин рельсов, щек дробилок, черпаков землеройных машин, траков и др.

Криогенные машиностроительные стали и сплавы (ГОСТ 5632-72) по химическому составу являются низкоуглеродистыми (0,10 % С) и высоколегированными (Cr, Ni, Mn и др.) сталями аустенитного класса (08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6, 03Х13АГ19 и др.). Основными потребительскими свойствами этих сталей являются пластичность и вязкость, которые с понижением температуры (до минус 196 °С) либо не меняются, либо мало уменьшаются, т.е. не происходит резкого уменьшения вязкости, характерного при хладноломкости. Криогенные машиностроительные стали классифицируют по температуре эксплуатации в диапазоне от минус 196 °С до минус 296 °С и используют для изготовления деталей криогенного оборудования.

Ниже более подробно рассмотрим *дисперсионно-твердеющие и мартенситно-стабилизирующие стали*.

Дисперсионно-твердеющие марки нержавеющей стали (ДТС) были разработаны в 50-х годах прошлого века ведущими мировыми производителями стали. Дисперсионно-твердеющие марки нержавеющей стали относятся к группе хромоникелевых сталей (Cr ≈ 17%, Ni ≈ 5%), легированных медью. Их отличительной чертой является возможность получения различных механических свойств в зависимости от выбранного режима термической обработки. Все дисперсионно-твердеющие марки нержавеющей стали характеризуются уникальным сочетанием высоких механических свойств, хорошей коррозионной стойкости и возможности использования при низких – до минус 73 °С и высоких температурах – до 500 °С.



Создание этих марок сталей было ответом на возрастающие потребности новых отраслей промышленности: авиакосмической, нефтяной (строительство гигантских нефтяных платформ в океане), атомной энергетики, т.е. тех отраслей, где требовались новые материалы с повышенными прочностными характеристиками. Ещё одной предпосылкой для создания этих сталей были ведущиеся после второй мировой войны многочисленные гражданские войны на африканском континенте, одним из поставщиков никеля, и недоступность советского никеля из-за «железного занавеса». Эти два фактора заставляли производителей стали искать альтернативные пути по созданию материалов с меньшим содержанием никеля.

Упрочнение в ДТС происходит за счет вторичного твердения, которое проявляется при отпуске предварительно закаленных сталей со структурой мартенсита благодаря выделению карбидов при температуре (550 ÷ 650) °С. Содержание углерода в этих сталях не должно превышать (0,3 ÷ 0,4) %, чтобы не было значительного снижения пластичности. Для оптимального упрочнения сталей при вторичном твердении применяют комплексное легирование хромом, молибденом, ниобием и ванадием, при котором максимум вторичного твердения достигается при Cr = 5 %, Mo = (1 ÷ 2) %, V = 0,5 %. Т.о., эффект упрочнения обусловлен выделением дисперсных частиц карбидов хрома (максимум твердения при 500 °С); карбидов молибдена (550 °С); карбидов ванадия (600 °С). Полезным является легирование стали кремнием. При Si = (0,7 ÷ 1,2) % повышается интенсивность вторичного твердения.

Примеры высокопрочных отечественных дисперсионно-твердеющих сталей: 40Х5М2СФ; 40Х5М2СФБ; 40Х5СФБ.

Среди импортных марок наибольшее распространение из всех известных дисперсионно-твердеющих марок нержавеющей стали получила сталь AISI 630. Эта марка стали не используется в закаленном состоянии, поскольку в этом состоянии она обладает полностью мартенситной структурой и недостаточной вязкостью и может подвергаться разрушению из-за охрупчивания. Более того, в коррозионно-агрессивной среде, содержащей ионы водорода, закаленный материал более подвержен

водородному охрупчиванию, а в средах с повышенной концентрацией хлоридов – коррозионному растрескиванию под напряжением. Оптимальная коррозионная стойкость достигается после отпуска.

Сочетание высоких механических свойств и хорошей коррозионной стойкости, обусловленной наличием в составе стали молибдена, делает эту сталь пригодной для использования в морской среде, в т.ч. в качестве компонентов клапанов и насосов. Однако, как и все нержавеющие стали, ДТС восприимчивы к щелевой коррозии в стоячей воде. В том случае, если оборудование не используется регулярно, следует предпринимать дополнительные защитные меры, например, использовать катодную защиту. При использовании нержавеющих сталей в средах с повышенной концентрацией хлоридов возможен риск коррозионного растрескивания под напряжением. Для максимальной стойкости к этому виду коррозии сталь следует подвергнуть термообработке с максимальной температурой отпуска.

В арматуростроении дисперсионно-твердеющие используются для изготовления золотников, в шаровых кранах для штоков и валов; в судостроении для гребных валов; для специального крепежа; в насосах для валов и роторов. Области применения дисперсионно-твердеющих сталей многообразны благодаря высоким механическим свойствам и хорошей коррозионной стойкости.

Недостатком большинства сталей мартенситного и аустенитно-мартенситного класса является пониженная стойкость против коррозионного растрескивания, что часто не позволяет реализовать из высокую прочность.

Дисперсионное твердение служит также основой создания особого класса сталей - мартенситно-старящихся.

Мартенситно-старящиеся стали

Мартенситно-старящиеся стали (МСС) представляют собой безуглеродистые сплавы железа с никелем (8 ÷ 25) %, дополнительно легированные (элементами, способствующими старению мартенсита) кобальтом, молибденом, титаном, алюминием, хромом и другими элементами. В зависимости от системы легирования происходит выпадение интерметаллидных фаз типа: Ni_3Ti , Ni_3Al , $NiTi$ и тд.



Интерметаллидная фаза – соединения или промежуточные твердые растворы, содержащие два или более металла и обычно отличающиеся по составу, характеристическим свойствам и кристаллической структуре от других фаз и чистых компонентов системы. Кристаллизация – выделение из жидкой фазы при охлаждении твердой кристаллической фазы.

Достижимый уровень механических свойств в следующих пределах: σ_b до (1500 ÷ 2500) МПа; $\delta = (15 \div 20)$ %; $\psi = (30 \div 60)$ %. Мартенситно-старящиеся стали обладают высокой конструкционной прочностью в интервале температур от криогенных до 500 °С.

Основной системой легирования мартенситно-старящей стали, обеспечивающей максимальный уровень прочности, является железоникелевый сплав (18 ÷ 25 % Ni), содержащий добавки Mo, Co, Ti и Al (H18K9M5T, H18K8M5TЮ, H18K12M5T и др.).

Другой распространенной системой, обеспечивающей уровень прочности σ_b до 600 МПа, является железохромоникелевый сплав (10 ÷ 13) % Cr и (5 ÷ 10) % Ni) с добавками Mo, Co, Ti и Al: X11N10M2TЮ, X12N9K4MВТ, O3X12K14N5M5T и др. В структуре этих сталей может быть (10 ÷ 40) % остаточного аустенита.

Третьей системой легирования мартенситно-старящихся сталей, обеспечивающей уровень прочности σ_b до 500 МПа, является сплав Fe с 12 % Ni и дополнительным легированием Cu, Mn, V и другими элементами, вызывающими умеренное старение (H12M2D2TЮ, O3N12X5M3, H8Г4ФЗД2 и др.).

Четвертой системой легирования – является железоникелькобальтовый сплав (9 % Ni ÷ 4 % Co) с добавками карбидообразующих элементов и содержанием C (0,2 ÷ 0,4) %. Смешанный карбидно-интерметаллидный механизм упрочнения обеспечивает уровень прочности $\sigma_b = 1300 \div 2000$ МПа.



Никель при старении стали оказывает большое влияние на эффективность упрочнения: никель повышает растворимость многих элементов замещения в аустените и уменьшает их растворимость в мартенсите, благодаря чему закалкой можно зафиксировать сильно пересыщенный α -твердый раствор (мартенсит замещения), способный к интенсивному дисперсионному твердению при старении. Уменьшается растворимость легирующих элементов (Ti, Al, Mo, V и др.), что приводит к увеличению объемной доли выделяющихся при старении соответствующих интерметаллидных фаз (Ni_3Ti , $NiAl$, Fe_2Mo , Ni_3V и др.).

Легирование кобальтом некоторых МСС приводит к дополнительному упрочнению при нагреве. Положительное влияние кобальта в мартенситно-старящихся сталях обусловлено также формированием в мартенситной матричной фазе при

старении упорядоченных областей, являющихся дополнительным фактором упрочнения. Хром в мартенситно-стареющих сталях способствует повышению их коррозионной стойкости и одновременно вызывает дополнительное упрочнение при старении.

Высокий уровень прочности, достигаемый в этих сталях, обусловлен процессами старения в безуглеродистом (менее 0,03 % C) мартенсите, который в исходном (несостаренном) состоянии обладает высокой пластичностью и относительно малой прочностью. Упрочнение сталей осуществляется при старении и обусловлено процессами «предвыделения» и образования высокодисперсных интерметаллидных фаз. **Т.о. у МСС определенное сочетание легирующих элементов обеспечивает формирование в процессе соответствующей термической обработки (старения) пластичной матричной фазы — мартенсита замещения, армированной дисперсными высокопрочными, равномерно распределенными частицами интерметаллидных фаз.**

Основное упрочнение происходит в процессе старения при температуре (450 ÷ 550). Углерод для этих сталей является вредным элементом, так как при его наличии в стали вместо интерметаллидных фаз образуются карбиды, в том числе по границам зерен, что снижает пластичность и вязкость, а также уменьшает эффект интерметаллидного упрочнения.



Интерметаллид – химическое соединение двух или более металлов. Интерметаллиды обладают, как правило, высокой твердостью и высокой химической стойкостью. Интерметаллиды образуются при высоком содержании легирующих элементов между этими элементами или с железом. Примером таких соединений могут служить Fe_7Mo_6 , Fe_3Nb_2 и др. Интерметаллиды, как правило, отличают повышенные твердость и хрупкость.

Мартенситно-стареющие стали характеризуются высокой технологичностью. Их упрочняющая термическая обработка, заключающаяся в закалке и старении, сравнительно проста. Стали имеют глубокую прокаливаемость, закаляются на мартенсит практически при любой скорости охлаждения. Изменения размеров при термической обработке этих сталей минимальны, поэтому практически исключены поковки и коробления изделий самой сложной формы. Стали этого класса, как правило, не содержат углерода, поэтому нет опасности их обезуглероживания при термической обработке в обычной среде. Указанные преимущества мартенситно-стареющих сталей позволяют подвергать термической обработке готовые детали и изделия.

Благодаря усилиям специалистов ряда российских предприятий и организаций (ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина, ВИАМ, ЦНИИМВ и др.) они достаточно хорошо изучены и их производство освоено отечественной промышленностью.

Наиболее распространенная мартенситно-стареющая сталь содержит, %: C до 0,03; Ni 18; Co 10; Mo 5; Ti 0,5; Al 0,1.

Примеры отечественных марок МСС: H18K9M5T, H18K12M4T2, H17K10B10M2T, 03H18K9M5T, 04X11H9M2D2TЮ.

Мартенситно-стареющим сталям можно придать стойкость против коррозии и теплостойкость. Так при дополнительном легировании хромом 12 % эти стали становятся стойкими против коррозии даже в сильно агрессивных средах (морской воде, кислотах и др).

Так что, одни плюсы? Так тоже не бывает, и у этих сталей есть свои недостатки:

- упрочняющей фазой являются мелкие интерметаллиды (твердость которых HV 1100) эти стали имеют относительно невысокую абразивную износостойкость;
- сложный процесс комплексной термообработки, требующей соответствующего оборудования;
- высокая стоимость.

Сплавы на железоникелевой основе

Согласно ГОСТ 5632: к сплавам на железоникелевой основе относятся сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в железоникелевой основе (сумма никеля и железа более 65 % при приблизительном отношении никеля к железу 1:1,5).

Промышленное применение высоколегированных сплавов на Fe-Cr-Ni основе обусловлено благоприятным сочетанием свойств, достигаемых на их базе. В зависимости от легирования эти сплавы характеризуются высокой коррозионной стойкостью в сильноагрессивных средах, немагнитностью, окалиностойкостью, хладостойкостью, способностью к упрочнению, особыми физико-механическими

свойствами. В атомной энергетике распространен сплав 12ХН35ВТ (ХН35ВТ) как для основных деталей, так и для крепежа при воздействии высокой температуры до 600 °С.

После оптимальной термической обработки, состоящей в закалке с (1050 ÷ 1080) °С в воду, сплавы имеют чисто аустенитную структуру с отдельными вкраплениями первичных карбонитридов титана.

Сплавы на никелевой основе

К сплавам на никелевой основе относятся сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в никелевой основе (содержание никеля не менее 50 %).

Применяются для работы в экстремальных условиях эксплуатации, характеризующихся одновременным воздействием на металл сред особо высокой активности (например, HCl, H₂SO₄, HNO₃ + HF, H₃PO₄ + HF, H₂SiF₆ и др.) при повышенных температурах и давлениях, в которых коррозионностойкие стали и сплавы на железо-хромоникелевой основе недостаточно стойки. В атомной энергетике применяются сплав ХН78Т. В эту группу сплавов также входят хастеллои.

Для никеля характерно благоприятное сочетание свойств: высокой коррозионной стойкости во многих агрессивных средах, высоких механических свойств ($\sigma_b > 350$ Н/мм²), хорошей обрабатываемости в горячем и холодном состояниях. Никель обладает способностью растворять в большом количестве многие элементы, например, хром, молибден, хром + молибден, железо, медь, кремний, алюминий, титан. Поэтому никель служит основой коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сплавов.

Коррозионная стойкость одних никелевых сплавов связана с пассивностью, а других – с тем, что они имеют достаточно высокий равновесный потенциал и не замещают водород в кислых средах. Этим объясняется стойкость во многих средах включая кислоты и морскую воду.

В коррозионностойких никелевых сплавах наиболее важными легирующими элементами являются хром, молибден и медь.

Существуют три системы легирования никелевых сплавов: Ni-Mo, Ni-Cr, Ni-Cr-Mo.

Наряду с высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах никелевые сплавы имеют ряд других отличительных особенностей, к которым относятся:

- высокая пластичность в диапазоне от отрицательных температур до 1200 °С;
- в 1,5 ÷ 2 раза более высокие значения прочностных свойств, чем у стали 12Х18Н10Т;
- в 1,5 ÷ 2,0 раза более низкие значения коэффициентов линейного расширения (Ni-Mo сплавы) и теплопроводности, чем у широко распространенных коррозионностойких сплавов на основе железа.

Сплавы немагнитны, обладают способностью к деформации в горячем и холодном состояниях, обрабатываются механическими способами, свариваются.

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 высокий предел прочности и твердость. Недостатком является склонность к межкристаллитной коррозии, поэтому содержание углерода в этих сплавах должно быть минимальным.

В Приложении 2 к настоящей лекции представлен краткий обзор сталей, используемых для изготовления оборудования ООО «РЭС Инжиниринг».

Приложение 1. Легирующие элементы. Дополнительные материалы

По применимости для легирования можно выделить три группы элементов. Применимость для легирования различных элементов определяется не столько физическими, сколько, в основном, экономическими соображениями (сложности добычи и редкость):

- Mn, Si, Cr, В;
- Ni, Mo;
- V, Ti, Nb, W, Zr и др.

Обычно содержание в конструкционных сталях:

- хром до 2,0 %;
- никель (1,0 ÷ 4,0) %;
- марганец до 2 %;
- кремний (0,6 ÷ 1,2) %.

Такие легирующие элементы, как молибден, вольфрам, ванадий, титан обычно вводят в сталь в сочетании с хромом, никелем с целью дополнительного улучшения тех или иных физико-механических свойств. В конструкционных сталях эти элементы обычно содержатся в следующих количествах:

- молибден (0,2 ÷ 0,4) %;
- вольфрам (0,5 ÷ 1,2) %;
- ванадий (0,1 ÷ 0,3) %;
- титан (0,1 ÷ 0,2) %.

Часто сталь легируют не одним, а несколькими элементами, например Cr и Ni, получая хромоникелевую сталь, Cr и Mn - хромомарганцевую сталь, Cr, Ni, Mo, V – хромоникельмолибденованадиевую сталь.

Механизм

В промышленных легированных сталях легирующие элементы могут:

- находиться в свободном состоянии: свинец, серебро, медь (если ее не более 1%) не образуют соединения и не растворяются в железе;
- образовывать интерметаллические соединения с железом (Fe_7Mo_6 ; Fe_3Nb и др.) или между собой. Актуально при большом содержании легирующих элементов.



Интерметаллиды — химическое соединение двух или более металлов. Обладают, как правило, высокой твердостью и высокой химической стойкостью. Упрочняют стали и сплавы. Например, мартенситно-старяющие стали.

• растворяться в цементите или образовывать самостоятельные карбидные фазы. В связи с этим свойством легирующие элементы разделяют на 2 группы:

- элементы, образующие устойчивые карбиды в присутствии железа (Cr, Mn, Mo, W, V, Ti);
- элементы, не образующие в присутствии железа карбидов (Ni, Si, Co, Al, Cu).



Способность элемента образовывать связь с другим называют сродством. К Карбидообразующими легирующими элементами называют элементы, обладающие большим, чем железо, сродством к углероду, т.е. расположены левее железа. По возрастанию сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз карбидообразующие элементы располагаются в следующий ряд: Fe - Mn - Cr - Mo - W - Nb - Zr - Ti. Чем устойчивее карбид, тем труднее он растворяется в аустените и выделяется при отпуске. Элементы, расположенные в периодической системе правее железа (Cu, Ni, Co и др.) образуют только растворы с железом и не входят в карбиды.

Таким образом, легирующие элементы преимущественно растворяются в основных фазах железоуглеродистых сплавов - феррите и аустените, а также цементите легируют их или образуют специальные карбиды.

Растворение легирующих элементов в α -, γ -железе происходит путем замещения атомов железа атомами этих элементов. Атомы легирующих элементов, отличаясь от атомов железа размерами и строением, создают в решетке напряжения, которые вызывают изменение ее периода. Изменение размеров α -, γ -решетки вызывает и изменение свойств феррита и аустенита. Искажение решетки приводит к затруднению движения дислокаций. Указанные факторы вызывают упрочнение называемое твердорастворным и имеем следующие фазы:

- легированного феррита - твердого раствора легирующего элемента в α -Fe;



Легирование феррита сопровождается его упрочнением. Наиболее значительно влияют на его прочность марганец и хром. Причем чем мельче зерно феррита, тем выше его прочность. Многие легирующие элементы способствуют измельчению зерен феррита и перлита в стали, что значительно увеличивает вязкость стали. Однако все легирующие элементы, за исключением никеля, при содержании их в растворе выше определенного предела снижают ударную вязкость, трещиностойкость и повышают порог хладноломкости. Никель понижает порог хладноломкости.

- легированного аустенита - твердого раствора легирующего элемента в γ -Fe;



Легированный аустенит парамагнитен, обладает большим коэффициентом теплового расширения. Легирующие элементы, в том числе азот и углерод, растворимость которого в аустените при нормальной температуре достигает 1%, повышают его прочность при нормальной и высокой температурах, уменьшают предел текучести. Легированный аустенит является основной составляющей (матрицей) многих коррозионноустойчивых, жаропрочных и немагнитных сплавов. Он легко наклепывается, то есть быстро и сильно упрочняется под действием холодной деформации.

- легированного цементита - твердого раствора легирующего элемента в цементите или при увеличении содержания легирующего элемента сверх определенного предела - специальных карбидов.

Введение в сталь легирующих элементов сопровождается смещением критических точек как по температуре, так и по концентрации. Смещение тем значительнее, чем больше введено элементов. Поэтому для легированной стали нельзя использовать диаграмму железо-углерод. Последнее обстоятельство объясняется тем, что легирующие элементы сдвигают влево точки S, E диаграммы железо - углерод.

Необходимо учитывать, что также легирующие элементы разделяются на три группы по механизму их воздействия на свойства сталей и сплавов:

- влияющие на полиморфные превращения (α -Fe \rightarrow γ -Fe);
 - аустенитообразующие: Ni, Mn, Co, Cu, C, N



При легировании сталей аустенитообразующими элементами в большом количестве может произойти полное "выклинивание" области α -Fe, и в этом случае стали будут иметь аустенитную структуру при комнатной температуре – аустенитные стали. Сплавы, только частично претерпевающие превращение $\gamma \rightarrow \alpha$, называются, соответственно, полуаустенитными или полуферритными

- ферритообразующие: Cr, Si, Al, Mo, V, Ti, W, Nb, Zr.

При легировании сталей ферритообразующими элементами в большом количестве может произойти "выклинивание" области γ -Fe, и стали приобретут чисто ферритную структуру – ферритные стали.

Диаграмма приобретает следующий вид:

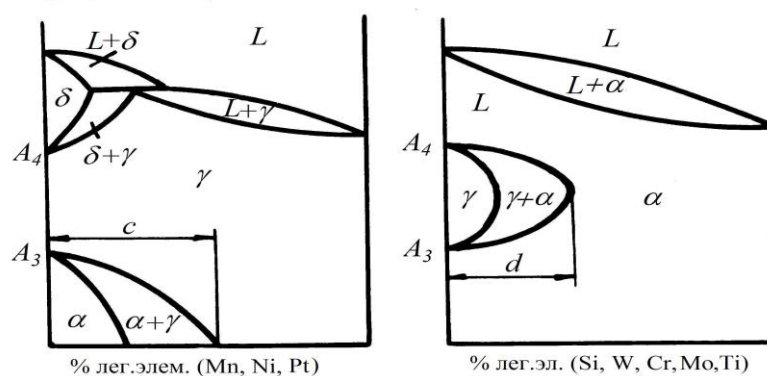


Рисунок 1. Схема диаграмм состояния железа - легирующий элемент

Рассмотрим влияние на свойства сталей наиболее распространенных легирующих элементов.

Легирующие элементы значительно понижают теплопроводность стали. Поэтому нагрев легированных сталей при термообработке должен медленно и равномерно (в отличие от углеродистой стали) во избежание коробления и появления трещин. Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование.

Легированием можно повысить предел текучести, ударную вязкость, относительное сужение и прокаливаемость, а также существенно снизить порог хладноломкости, деформируемость изделий и возможность образования трещин. В изделиях крупных сечений (диаметром свыше 15 ÷ 20 мм) механические свойства легированных сталей значительно выше, чем механические свойства углеродистых. Но в реальной жизни, как известно, нельзя получить всё и сразу. И улучшение какого-то одного свойства часто приводит к ухудшению другого (например, при добавлении в сталь хрома, она приобретает коррозионную стойкость, но уменьшается ударная

вязкость и сталь становится хрупкой). Так что, прежде чем добавлять какие-то легирующие элементы, производителям нужно точно знать для чего предназначается сталь и какие свойства они хотят получить.

Т.о., влияние легирующих элементов на механические свойства конструкционной стали не является однозначным при различных структурных состояниях стали, состава и режимов термообработки.

Общепринято, что увеличение содержания примесей в стали влияет на различные свойства сталей следующим образом:

- *прочность и твердость* стали повышается с увеличением содержания меди, никеля, молибдена олова и сурьма. Хром по-разному влияет на стали: в одних случаях повышает ее, а в других снижает.
- *пластичность* стали однозначно снижается с увеличением содержания меди, молибдена и олова. Никель и хром могут по-разному влиять на пластические свойства стали.
- *степень деформационного упрочнения* стали снижается с увеличением содержания всех примесей.
- *ударная вязкость* стали повышается с увеличением содержания меди и никеля, снижается с увеличением содержания молибдена и олова.
- *прокаливаемость* стали повышается с увеличением содержания меди, никеля и хрома. Другие примеси или не оказывают влияния на прокаливаемость, или оказывают на нее слабое влияние.
- *свариваемость* сталей снижается с увеличением содержания всех примесей.
- *коррозионная стойкость* сталей повышается с увеличением содержания меди, никеля, хрома и олова.

Марганец

Считается легирующим элементом при содержании свыше 0,8%. Снижает вредное воздействие серы. При содержании свыше 1,0 % увеличивает твердость, износоустойчивость. В малоуглеродистых сталях, повышая прочность, не снижает пластических свойств при содержании до 2,0 %. В средне- и высокоуглеродистой стали снижает ударную вязкость. Увеличивает износоустойчивость особенно при высоком содержании. Положительное влияние марганца особенно хорошо проявляется при пониженном содержании углерода: увеличивает хладостойкость сталей (например, стали 10Г2С и особенно 09Г2С применяются до минус 60 °С).

Кремний

Считается легирующим элементом при содержании свыше 0,37 %. В количестве свыше 1,0 % оказывает особое влияние на свойства стали: содержание (1,0 ÷ 1,5) % Si увеличивает прочность, причем вязкость сохраняется. При большем содержании кремния увеличиваются электросопротивление и магнитопроницаемость. Кремний увеличивает также упругость, окалиностойкость. Негативно сказывается на свариваемости: в сталях, предназначенных для сварных конструкций, содержание кремния не должно превышать (0,12 ÷ 0,25) %.

Никель

Дорогостоящий легирующий элемент. По действию схож с марганцем. Повышает коррозионную стойкость, сопротивление удару. Придает сталям высокую прочность и пластичность, увеличивает прокаливаемость. Кроме того, он повышает электросопротивление и снижает значение коэффициента линейного расширения. В качестве заменителя применяют *азот*. Азот значительно повышает коррозионную стойкость стали

Алюминий повышает жаростойкость и окалинность, раскисляет, сдерживает рост зерна

Медь увеличивает антикоррозионные свойства.

Хром повышает твердость, прочность, а при термической обработке увеличивает глубину прокаливаемости, положительно сказывается на жаропрочности, жаростойкости. Хром увеличивает стойкость стали к коррозии и износу. Сталь считается нержавеющей, если содержание хрома в ней свыше 10,5 %. Правда, справедливости ради, стоит отметить, что сталь даже с высоким (порядка (17 ÷ 19) %) содержанием хрома, при определенных условиях, всё же подвержена коррозии. Также высокое содержание хрома приводит к повышению хрупкости и ударной вязкости стали.

Кобальт повышает жаропрочность, магнитные свойства, увеличивает сопротивление удару.

Вольфрам

Образует в стали очень твердые соединения - карбиды, резко увеличивающие твердость и красностойкость стали. Вольфрам препятствует росту зерен при нагреве, способствует устранению хрупкости при отпуске. Вольфрам является металлом с самой высокой температурой плавления. Он используется во многих отраслях. Вольфрам, наравне с молибденом, является обязательным элементом для быстрорежущих сталей.

Молибден

Увеличивает красностойкость, упругость, предел прочности на растяжение, антикоррозионные свойства и сопротивление окислению при высоких температурах, повышает коррозионную стойкость.

Титан повышает прочность и плотность стали, способствует измельчению зерна, улучшает обрабатываемость и сопротивление коррозии.

Ванадий повышает твердость и прочность, износостойкость. Измельчает зерно. Увеличивает плотность стали. Ванадий присутствует в инструментальных и быстрорежущих сталях.

Ниобий улучшает кислотостойкость и способствует уменьшению коррозии в сварных конструкциях.

Повышение содержания в стали олова и сурьмы приводит к усугублению отпускной хрупкости стали.

Сводные сведения о влиянии легирующих элементов представлены в Таблицах ниже.

Таблица 3 – Влияние легирующих элементов на свойства сталей

Легирующий элемент	Ni	Cr	Mn (более 1,0%)	Si (более 0,8 %)	W	Cu (0,3 ÷ 0,5) %
Упрочнение твердого раствора железа	+	+	+	+	-	+
Увеличивает ударную вязкость	+	-	+	+	-	-
Расширяет область аустенита	+	-	+	-	-	-
Сужает область аустенита	-	+	-	+	-	-
Увеличивает прокаливаемость	+	-	+	-	-	-
Способствует раскислению	-	-	+	+	-	-
Образует устойчивые карбиды	-	+	+	-	+	-
Повышает сопротивление коррозии	+	+	+	-	-	+

Таблица 4 – Влияние отдельных компонентов на свойства стали (для малоуглеродистой и низколегированной стали)

Элемент	Механические свойства						Технологические свойства			
	$\sigma_{вр}$	σ_T	δ_5	НВ	КСУ	Длительная прочность	Свариваемость	Коррозионная стойкость	Хладостойкость	Красноломкость
Углерод	++	+	=	++	-	-	-	0	0	0
Марганец	+	+	-	+	-	+	0	+	0	0
Кремний	+	+	-	+	=	0	-	-	0	0
Никель	+	+	0	+	+	0	+	++	0	0
Хром	+	+	-	++	0	0	-	++	0	0
Медь	0	0	0	0	0	0	0	++	0	0
Ниобий	++	++	-	+	0	+	+	0	0	0
Ванадий	+	+	-	+	0	++	+	+	0	0
Молибден	+	+	-	+	0	++	+	+	0	0
Бор	++	++	-	+	-	+	+	0	0	0
Титан	+	+	0	+	-	0	+	0	0	0
Алюминий	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
Сера	-	-	0	-	-	-	=	0	0	++
Фосфор	+	+	=	+	=	0	=	-	=	0
Мышьяк	-	-	-	0	-	-	-	0	0	0
Азот	++	++	=	++	=	-	-	0	0	0
Кислород	=	=	=	+	=	=	=	-	-	+

Примечания: (+) - повышает; (++) - значительно повышает; (-) - снижает; (=) - значительно снижает; (0) - не оказывает заметного влияния.

Таблица 5 – Влияние легирующих элементов

Элемент	Влияние на свойства стали
Cr	Повышает твердость и прочность стали. При содержании до (1,0 ÷ 1,5) % способствует повышению пластических свойств. При большом содержании снижает пластические свойства, особенно, ударную вязкость. Увеличивает износостойкость. Несколько повышает жаропрочность. Сильно повышает электросопротивление и понижает теплопроводность. Повышает устойчивость против коррозии и окисления (при содержании ≥ 14 %). Увеличивает прокаливаемость. Способствует появлению отпускной

Элемент	Влияние на свойства стали
	хрупкости. Образуя нитриды (CrN и Cr_2N), является одной из обязательных присадок к сталям, подвергающимся азотированию
Mn	Повышает твердость и прочность стали. Особенно сильно повышает твердость в закаленном состоянии. В малоуглеродистых сталях, повышая прочность, не снижает пластических свойств при содержании до 2 %. В средне- и высокоуглеродистой стали снижает ударную вязкость. Уменьшает красноломкость при повышенном содержании серы. Увеличивает износостойчивость особенно при высоком содержании. Повышает электросопротивление и уменьшает теплопроводность. При содержании в количестве, достаточном для получения гомогенной аустенитной структуры, повышает коррозионную стойкость. Увеличивает прокаливаемость. Увеличивает склонность к отпускной хрупкости.
Ni	Прекрасный легирующий элемент, но очень дорогой. Увеличивает прочность, вязкость и твердость, но не снижает пластичности, сильно повышает прокаливаемость и коррозионную стойкость. В сочетании с хромом повышает прочность и пластические свойства конструкционных сталей. Снижает теплопроводность. Повышает сопротивление коррозии на воздухе, в морской воде и некоторых кислотах. Способствует появлению отпускной хрупкости.
Si	Активно раскисляет. При содержании выше 0,8 % повышает прочность и твердость стали и уменьшает вязкость (особенно при содержании более 2,5 %). Понижает теплопроводность и значительно повышает электросопротивление. Вследствие большой магнитной проницаемости и высокого электросопротивления значительно уменьшаются потери на токи Фуко и ватные потери.
W	Несколько повышает прочность и снижает пластичность. Сильно уменьшает теплопроводность и повышает коэрцитивную силу. Резко повышает красностойкость. Увеличивает прокаливаемость. Сильно замедляет процессы, происходящие при отпуске, препятствует смягчению стали. Вызывает появление вторичной твердости. Уменьшает склонность к отпускной хрупкости.
V	После закалки с температур значительно превышающих A_{c3} увеличивает твердость и прочность. Особенно увеличивается отношение предела текучести к пределу прочности. Незначительно уменьшает вязкость стали. Повышает механические свойства при высоких температурах. Препятствует понижению твердости стали при отпуске. При температурах отпуска 550-600 °C отмечается эффект вторичной твердости. Образуя стойкие нитриды, значительно повышает твердость стали после азотизации.
Mo	Повышает прочность и твердость. Понижает пластические свойства. Очень эффективно влияет на сохранение механических свойств при высоких температурах (жаропрочность). Способствует повышению предела ползучести. Повышает красностойкость. Повышает химическую стойкость нержавеющей сталей против действия некоторых кислот и щелочей. Уменьшает теплопроводность. Увеличивает коэрцитивную силу и остаточный магнетизм. Увеличивает прокаливаемость. Уменьшает склонность стали к отпускной хрупкости.
Ti	В небольших количествах улучшает механические свойства стали. Способствует резкому повышению коэрцитивной силы. Повышает коррозионную стойкость нержавеющей сталей и предотвращает возникновение межкристаллитной коррозии. Повышает устойчивость жароупорных сталей против окисления при высоких температурах. Образуя стойкие нитриды, значительно повышает твердость после азотирования.
Co	В отожженном и нормализованном состоянии стали повышает прочность и твердость, уменьшает пластические свойства. Повышает красностойкость. Увеличивает магнитную индукцию, коэрцитивную силу и остаточную индукцию. Способствует обезуглероживанию. Уменьшает прокаливаемость.
Al	Активный раскислитель. Повышает электросопротивление, магнитную проницаемость и уменьшает коэрцитивную силу. Резко увеличивает устойчивость против окисления при высоких температурах. Способствует обезуглероживанию. Несколько увеличивает прокаливаемость стали. Образуя нитриды, является легирующим элементом в азотируемых сталях.

Наиболее наглядное представление о структуре коррозионностойких сталей исходя из воздействия суммарного содержания аустенито- и ферритообразующих легирующих элементов дает диаграмма Шеффлера (рис. 3). По этой диаграмме можно предварительно рассчитать состав стали для получения требуемого типа структуры. Диаграмма показывает неравновесную структуру после быстрого охлаждения с высоких температур до комнатной, например структуру сварного шва.

Структура нержавеющей сталей. Диаграмма Шеффлера

Структуры высоколегированных сталей очень разнообразны и зависят в основном от их химического состава, т.е. от содержания основных элементов: хрома (ферритизатора) и никеля (аустенизатора).

Для приближенного определения характера структуры сплава пользуются диаграммой Шеффлера (рисунок 1), предварительно подсчитав эквивалентные содержания никеля и хрома. Соотношение $\text{Cr}_{\text{экв}}/\text{Ni}_{\text{экв}}$

Ниэкв, учитывает совместное действие легирующих элементов на конечную структуру и называют хромоникелевым эквивалентом.

Не стоит забывать, что на конечную структуру также оказывает влияние и окончательная термообработка, пластическая обработка и прочие факторы. Диаграмма определяет структуру стали после быстрого охлаждения с высоких температур до комнатной и также используется для определения структуры сварных швов.

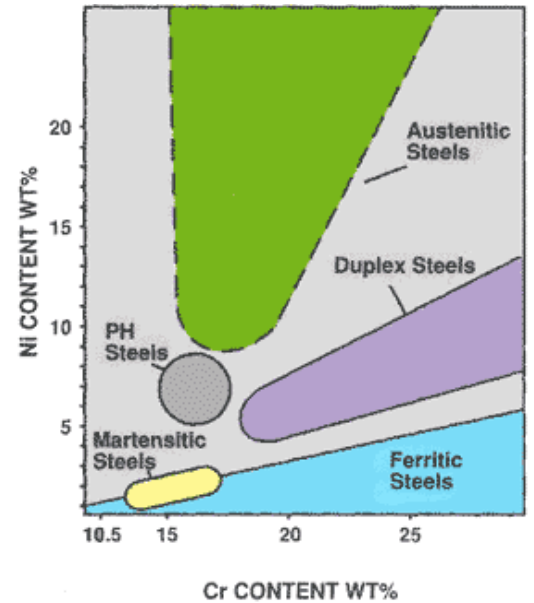
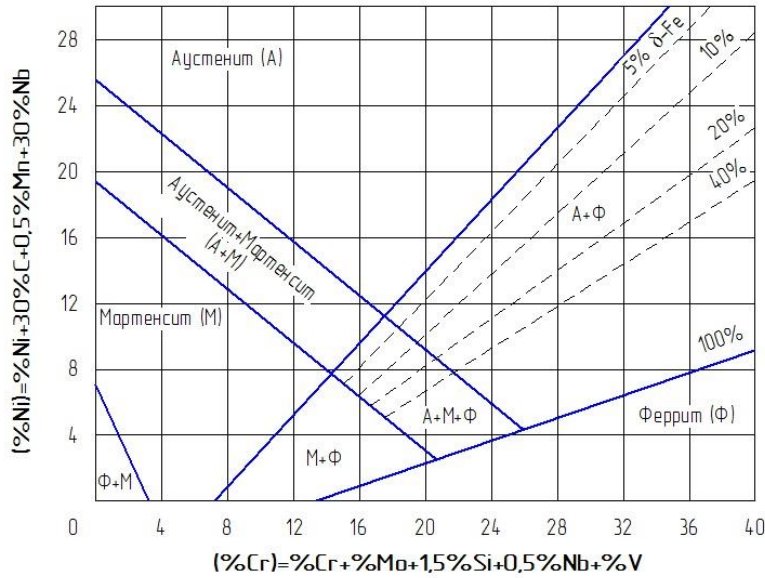


Рисунок 3. Диаграммы для определения класса нержавеющей стали в зависимости от содержания компонентов

Приложение 2. Обзор сталей, используемых для изготовления оборудования ООО «РЭС Инжиниринг»

Класс стали	Тип стали/описание	Описание/особенности	Рабочие условия	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
Углеродистые нелегированные					
Сталь 20 Сталь 25	Конструкционная качественная	Сортовой прокат ГОСТ 1050 Поковки ГОСТ 8479 Трубы ГОСТ 550 Гр. А и Б ГОСТ 8733 Гр. В ГОСТ 8731 Листы ГОСТ 1577	Т рабочей среды от минус 40 °С до 475 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора. Для сварных узлов арматуры, с обязательным проведением термообработки (закалка или нормализация и высокий отпуск) при температуре рабочей среды (стенки) ниже минус 30 °С до минус 40 °С. Для крепежных деталей: - болты, шпильки, винты при Тсреды от минус 40 до 425, РN до 2,5 МПа; - гайки Тсреды от минус 40 до 425, РN до 10 МПа; - плоские шайбы Тсреды от минус 40 до 425, РN до 10 МПа	1.0402 C22 1020
22К	конструкционная котельная перлитная	материалы относительно дешёвы, не дефицитны и обладают удовлетворительными механическими свойствами при комнатной и повышенных температурах (до 450оС).	Из-за способности выдерживать большие нагрузки под давлением при температуре от –40 до 450 °С, получила широкое распространение в производстве котельного и иного отопительного оборудования.	Сосуды под давлением, корпусные детали	1022, 20Mn5
25Л	конструкционная литая ГОСТ 977, СТ ЦКБА 014	Класс II, III Т рабочей среды (стенки) от минус 30 (40) °С до 450°С, давление (PN) – без ограничений. Для деталей арматуры, эксплуатирующейся при температуре ниже минус 30 °С до минус 40 °С применяется		Корпусные детали, детали узла затвора	GS-45; Grade 450-240; A10; 2A; LCA

Класс стали	Тип стали/описание	Описание/особенности	Рабочие условия	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
		в термообработанном состоянии: закалка + отпуск или нормализация + отпуск, с обязательным испытанием ударной вязкости $KCU_{-40} \geq 200 \text{ кДж/м}^2$ $(2,0 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2)$			
Нержавеющие					
12X13/ 20X13/ 30X13	Хромистые 12X13 – мартенсито-ферритного класса 20X13/30X13 – мартенситного класса Сортовой прокат ГОСТ 5949 Поковки ГОСТ 25054		От минус 40 °С до 450 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора, шпиндели, штоки. Для деталей внутренних устройств арматуры, работающих в условиях атмосферной коррозии, для сред слабой агрессивности, для воды и нефтепродуктов. При температуре рабочей среды ниже минус 31 °С до минус 40 °С проводить испытание на ударный изгиб, при этом значение ударной вязкости $KCU_{-40} \geq 300 \text{ кДж/м}^2$ (3,0 кгс·м/см ²). После низкого отпуска (на высокую твердость) температура применения до 200 °С. 20X13 для крепежных деталей: - болты, шпильки, винты при Тсреды от минус 30 до 450, PN не регламентируется; - гайки Тсреды от минус 30 до 510, PN не регламентируется; - плоские шайбы Тсреды от минус 40 до 450, PN не регламентируется.	12X13: X10Cr13 (1.4006) 20X13: X20Cr13 (1.4021) 30X13: X30Cr13 (1.4028)

Лекция 02. Классификация сталей

Класс стали	Тип стали/описание	Описание/особенности	Рабочие условия	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
				<p>Допускается применять крепежные изделия из стали марки 20Х13 на температуру ниже минус 30 °С до минус 40 °С, если при испытании на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454 при температуре минус 40 °С ударная вязкость не будет ниже 300 кДж/м (3 кгс·м/см²) ни на одном из испытываемых образцов.</p> <p>Сталь 30Х13 – для шайб пружинных при Т от минус 60 до 250 в условиях атмосферной коррозии для сред слабой агрессивности и для воды</p>	
08Х18Н10Т ГОСТ 5632	<p>Нержавеющая аустенитного класса Хим.состав ГОСТ 5632 Сортовой проквт ГОСТ 5949 Листы ГОСТ 7350 М26, М36 ТУ 108-930 Трубы ГОСТ 9940, ГОСТ 9941 Поковки ГОСТ 25054</p>	<p>нержавеющим жаропрочным стали аустенитного класса системы типа 18-8 традиционно применяемым в тепловой энергетике с середины прошлого века. Легирование сталей направлено на достижение повышенных характеристик жаропрочности и коррозионной стойкости.</p>	<p>от минус 270 °С до 610 °С Сильфоны: - из 08Х18Н10Т от минус 260 °С до 465 °С, РН от 0,15 до 3,10 МПа; - из 12Х18Н10Т от минус 260 °С до 550 °С, РН от 0,6 до 25,0 МПа либо минус 260 °С до 465 °С, РН от 0,15 до 3,10 МПа</p>	<p>Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора, шпинделей, штоков. Для сварных узлов арматуры, работающих в агрессивных средах: HNO₃, щелочей, аммиачной селитры, пищевых сред, сред спецтехники, судовой арматуры, криогенных сред, сероводородосодержащих сред. Сильфоны</p>	08Х18Н10Т: Х 6 CrNiTi 18.10 (1.4541, 321)
12Х18Н9Т 12Х18Н10Т ГОСТ 5632	<p>Нержавеющая аустенитного класса Хим.состав ГОСТ 5632 Сортовой прокат ГОСТ 5949 Листы ГОСТ 7350 Поковки ГОСТ 25054</p>		<p>от минус 270 °С до 350 °С свыше 350 °С до 610 °С</p>	<p>Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора, шпинделей, штоков. Для сварных узлов арматуры, при отсутствии требования стойкости к межкристаллитной</p>	<p>12Х18Н9Т: Х10CrNiTi 18.9 (1.4541) 12Х18Н10Т: Х12CrNiTi 18.9</p>

Лекция 02. Классификация сталей

Класс стали	Тип стали/описание	Описание/особенности	Рабочие условия	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
	Трубы ГОСТ 9940, ГОСТ 9941 (из 12Х18Н10Т)			коррозии	
10Х18Н12М3Л	Аустенитного класса ТУ 5.961-11185-81 До 560 °С	Хромоникельмолибденовая литейная коррозионнотойкая, кислотостойкая, жаропрочная сталь аустенитного класса. Она не подвержена межкристаллитной коррозии при температуре до +800 С	До 800°С		GX5CrNiMoNb19-11-2, J92971
Легированные					
25Х1МФ (ЭИ10)	Легированная, теплоустойчивая перлитного класса Листы ГОСТ 5520 (категории 3, 16) Сортовой прокат ГОСТ 20072 Поковки ГОСТ 8479		От минус 20 °С до 560 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора. Для сварных узлов арматуры, работающих при температуре свыше 500 °С. Допускается применять крепежные изделия при температурах ниже минус 40 °С до минус 60 °С при температуре ниже минус 50 °С. до минус 60 °С, если при испытании на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454 при рабочих отрицательных температурах ударная вязкость не будет ниже 300 кДж/м ² (3 кгс·м/см ²) ни на одном из испытываемых образцов. Для штоков и шпинделей при Т свыше 500 °С.	24CrMoV 5.5 (1.7733)
35ХМ	Легированная конструкционная мартенситного класса Сортовой прокат		От минус 50 °С до 450 °С	Для корпусов, крышек, фланцев, узлов затвора. Для несварных узлов арматуры, с обязательным проведением	34CrMo4 (1.7220)

Класс стали	Тип стали/описание	Описание/особенности	Рабочие условия	Детали ТПА, рекомендации по применению	Близкие зарубежные аналоги
	ГОСТ 4543 ГОСТ 1051			термообработки (закалка и высокий отпуск) при температуре рабочей среды (стенки) ниже минус 40 °С до минус 50 °С. Допускается применять крепежные изделия при температурах ниже минус 40 °С до минус 60 °С при температуре ниже минус 50 до минус 60 °С, если при испытании на ударный изгиб образцов типа 11 по ГОСТ 9454 при рабочих отрицательных температурах ударная вязкость не будет ниже 300 кДж/м ² (3 кгс·м/см ²) ни на одном из испытываемых образцов	
06Х13Н7Д2	Коррозионностойкая аустенитно-мартенситного класса (мартенситностареющая), жаропрочная Крепежные изделия ГОСТ 23304-78 Сортовой прокат ТУ 14-1-3613-83		До 300	Крепежные детали турбин и фланцевых соединений реакторов, парогенераторов, сосудов, паропроводов и аппаратуры. Рекомендуется для шпилек и болтов применять сталь, гаек и плоских подкладных шайб применять сталь с КП 805	-
Сплавы					
ХН35ВТ(-ВД) (ЭИ 612-ВД) * ВД- вакуумно-дуговой переплав Вакуумно-дуговой переплав – это вторичный процесс плавки для получения металлических	Жаропрочный сплав на никелевой основе ГОСТ 5632 ХН35ВТ ТУ 14-1-272 ХН35ВТ-ВД ТУ 14-1-1665		От минус 100 °С до 650 °С	Крепежные детали: - болты, шпильки, винты при Тсреды от минус 70 до 650, РН не регламентируется; - гайки Тсреды от минус 70 до 650, РН не регламентируется. Шпиндели, штоки. Применяется для работы при температуре выше 600 °С. Для деталей с высокими требованиями по плотности и	-

Лекция 02. Классификация сталей

Класс стали	Тип стали/описание	Описание/особенности	Рабочие условия	Детали ТПА, рекомендации по применению	Ближкие зарубежные аналоги
слитков с повышенной однородностью по химическому составу и механическим свойствам для высокотехнологичных применений				для изготовления тренированных шпилек применяется ХН35ИТ-ВД и для изготовления тренированных шпилек применять сталь марки ХН35ВТ-ВД	