

**ЛЕКЦИЯ 5:** Легированные стали. Конструкционные стали и чугуны. Классификация, общая характеристика и назначение. Чугуны. Углеродистые стали обыкновенного качества. Рессорно-пружинные стали общего назначения. Шарикоподшипниковые стали. Стали и сплавы со специальными свойствами. Коррозионностойкие стали. Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы.

### **Легированные стали**

**Легированной называют сталь**, содержащую специально введенные в нее с целью изменения строения и свойств легирующие элементы.

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).

Классификация сталей по различным признакам была рассмотрена ранее. Отметим только, что стали обыкновенного качества могут быть только углеродистыми, т.е. легированные стали, как минимум, являются качественными.

**Маркируются** легированные стали с помощью цифр и букв, указывающих примерный химический состав стали. Первые цифры в марке показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Далее показывается содержание легирующих элементов. Каждый элемент обозначается своей буквой: Н — никель, Г — марганец, Ц — цирконий, Т — титан, Х — хром, Д — медь, С — кремний, А — азот, К — кобальт, Р — бор, П — фосфор, Ф — ванадий, М — молибден, Б — ниобий, В — вольфрам, Ю — алюминий. Цифры, идущие после буквы, указывают примерное содержание данного легирующего элемента в процентах. При содержании

элемента менее 1% цифра отсутствует. Например, сталь 12X18H10T содержит приблизительно 0,12% углерода, 18% хрома, 10% никеля, менее 1% титана. Для некоторых групп сталей применяют другую маркировку, которая будет указана при рассмотрении этих сталей.

### **Конструкционные стали**

**Конструкционные стали** идут на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений. Они должны обеспечивать длительную и надежную работу деталей и конструкций в условиях эксплуатации. Поэтому основное требование к конструкционным сталям — комплекс высоких механических свойств.

**Строительные стали** содержат малые количества углерода (0,1-0,3%). Это объясняется тем, что детали строительных конструкций обычно соединяются сваркой. Низкое содержание углерода обеспечивает хорошую свариваемость. В качестве строительных используются углеродистые стали Ст2 и Ст3, имеющие предел текучести  $\sigma_{0,2} = 240$  МПа. В низколегированных строительных сталях при содержании около 1,5% Mn и 0,7% Si предел текучести увеличивается до 360 МПа. К этим сталям относятся 14Г2, 17ГС, 14ХГС. Дополнительное легирование небольшими количествами ванадия и ниобия (до 0,1%) повышает предел текучести до 450 МПа за счет уменьшения величины зерна. К сталям такого типа относятся 14Г2АФ, 17Г2АФБ.

Приведенные стали применяют для строительных конструкций, армирования железобетона, магистральных нефтепроводов и газопроводов.

**Цементуемые стали** содержат 0,1-0,3% углерода. Они подвергаются цементации, закалке и низкому отпуску. После этой обработки твердость поверхности составляет HRC 60, а сердцевины HRC 15 — 40. Упрочнение сердцевины в этих сталях тем сильнее, чем больше содержание легирующих элементов. В зависимости от степени упрочнения сердцевины цементуемые стали можно разделить на три группы.

К **сталям с неупрочняемой сердцевиной** относятся углеродистые цементуемые стали 10, 15, 20. Их сердцевина имеет феррито-перлитную структуру. Эти стали имеют высокую износостойкость, но малую прочность ( $\sigma = 400-500$  МПа). Поэтому они применяются для малоответственных деталей небольших размеров.

К **сталям со слабо упрочняемой сердцевиной** относятся низколегированные стали 15Х, 15ХР, 20ХН и др. Сердцевина имеет структуру бейнит. Эти стали имеют повышенную прочность ( $\sigma_{\text{в}} = 750-850$  МПа).

К **сталям с сильно упрочняемой сердцевиной** относятся стали 20ХГР, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХНЗ, 18Х2Н4В и др. Сердцевина имеет мартенситную структуру. Стали этой группы имеют высокую прочность ( $\sigma_{\text{в}} = 1200-1600$  МПа) и применяются для крупных деталей, испытывающих значительные нагрузки.

**Улучшаемые стали** содержат 0,3-0,5% углерода и небольшое количество легирующих элементов (до 3-5%). Эти стали подвергаются улучшению, состоящему из закалки в масле и высокого отпуска. После термообработки имеют структуру сорбита. Механические свойства разных марок улучшаемой стали в случае сквозной прокаливаемости близки ( $\sigma_{\text{в}} = 900-1200$  МПа). Поэтому прокаливаемость определяет выбор стали. Чем больше легирующих элементов, тем выше прокаливаемость. Следовательно, чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует использовать. По прокаливаемости улучшаемые стали могут быть условно разбиты на пять групп.

В **первую группу** входят углеродистые стали 35, 40, 45, имеющие критический диаметр  $D_{\text{кр}} = 10$  мм (см. раздел 4.2.). Эти стали подвергаются нормализации вместо улучшения.

Ко **второй группе** относятся стали, легированные хромом 30Х, 40Х. Для них критический диаметр составляет  $D_{\text{кр}} = 15-20$  мм.

**Третью группу** составляют хромистые стали, дополнительно легированные еще одним двумя элементами (кроме никеля) 30ХМ, 40ХГ, 30ХГС и др. Для этих сталей  $D_{кр} = 20-30$  мм.

**Четвертая группа** представлена хромоникелевыми сталями, содержащими около 1% никеля: 40ХН, 40ХНМ и др. Их критический диаметр  $D_{кр} = 40$  мм.

В **пятую группу** входят стали, легированные рядом элементов, причем содержание никеля доходит до 3-4%: 38ХНЗ, 38ХНЗМФ ( $D_{кр} = 100$  мм). Это лучшие марки улучшаемых сталей, хотя они сравнительно дороги.

### **Высокопрочные стали**

Новейшая техника предъявляет высокие требования к прочности стали ( $\sigma = 1500-2500$  МПа). Этим требованиям соответствуют **мартенситностареющие стали** сочетающие высокую прочность с достаточной вязкостью и пластичностью. Они представляют собой практически безуглеродистые (до 0,03% С) сплавы железа с никелем (17-26% Ni), дополнительно легированные титаном, алюминием, молибденом, ниобием и кобальтом. Широкое распространение получила сталь Н18К9М5Т. Она подвергается закалке на воздухе с 800-850°C. Высокую прочность мартенситностареющие стали получают в результате старения, представляющего собой отпуск, производимый при температуре 450-500°C. В результате такой термообработки сталь Н18К9М5Т имеет предел прочности  $\sigma_b = 2000$  МПа.

Кроме упомянутой выше стали нашли применение стали Н12К8М3Г2 М10Х11М2Т, Н12К8М4Г2 и другие. Мартенситностареющие стали применяют в авиационной промышленности, в ракетной технике, судостроении и т. д. Они обладают хорошей свариваемостью и обрабатываемостью. Эти стали являются достаточно дорогостоящими.

### **Пружинные стали**

В пружинах и рессорах используются только упругие свойства стали. Возникновение пластической деформации в них недопустимо, поэтому

высоких требований к пластичности и вязкости не предъявляется. Основное требование к пружинной стали — высокий предел упругости  $\sigma$ . Хорошие упругие свойства стали достигаются при повышенном содержании углерода (0,5-0,7%) и применении термообработки, состоящей из заковки и среднего отпуска при температуре 350-450°C. После такой термообработки сталь имеет троститную структуру.

Углеродистые пружинные стали (65, 70, 75) вследствие низкой прокаливаемости используются для пружин небольшого сечения. Они могут работать при температуре до 100° С. Стали, легированные кремнием и марганцем (60С2, 60СГ и др.) предназначены для больших по размеру упругих элементов и обеспечивают их длительную и надежную работу. Для ответственных пружин применяют высококачественные стали легированные хромом и ванадием (50ХФА, 50ХГФА). Детали, выполненные из этой стали, могут работать при температуре до 300° С. Из них изготавливают, например, рессоры легковых автомобилей.

**Износостойкие стали** способны сопротивляться процессу изнашивания. **Изнашивание** — это процесс постепенного разрушения поверхностных слоев трущихся деталей, который приводит к уменьшению их размеров (износу). Износостойкие стали можно разделить на три группы.

В **первую группу** входят стали, износостойкость которых достигается высокой твердостью поверхности. Они подвергаются заковке и низкому отпуску или химико-термической обработке. Имеют структуру мартенсита или мартенсита с карбидными включениями. К этой группе относятся подшипниковые стали, из которых изготавливаются шарики и ролики подшипников качения. Они маркируются буквами ШХ и цифрой показывающей содержание хрома в десятых долях процента, содержат также марганец и кремний (ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ). Содержание углерода в них около 1%.

Ко **второй группе** относятся стали, износостойкость которых достигается смазывающим действием графита. Эти стали имеют в структуре

графитные включения, которые в процессе изнашивания выходят на поверхность и выполняют роль сухой смазки. Эти стали имеют высокое содержание углерода (-1,5%) и кремния (-1%), что повышает способность к графитизации. Эти стали подвергаются графитизирующему отжигу, который аналогичен отжигу ковкого чугуна.

**Третью группу** составляют стали, износостойкость которых достигается повышенной склонностью к наклепу. Это, прежде всего, сталь 110Г13. Она имеет невысокую твердость, которая при действии давления и ударов резко повышается, за счет чего и достигается износостойкость. Эта сталь подвергается закалке от 1100°С в воде, после чего получает аустенитную структуру. Плохо обрабатывается резанием, поэтому применяется в литом состоянии.

### **Стали со специальными свойствами**

#### **Коррозионностойкие (нержавеющие) стали**

**Коррозией** называется разрушение металла под действием внешней агрессивной среды в результате ее химического или электрохимического воздействия. Различают химическую коррозию, обусловленную воздействием на металл сухих газов и неэлектролитов (например, нефтепродуктов) и электрохимическую, возникающую под действием жидких электролитов или влажного воздуха. По характеру коррозионного разрушения различают сплошную и местную коррозию. Сплошная коррозия захватывает всю поверхность металла. Ее делят на равномерную и неравномерную в зависимости от того, одинаковая ли глубина коррозионного разрушения на разных участках. При местной коррозии поражения локальны. В зависимости от степени локализации различают пятнистую, язвенную, точечную, межкристаллитную и др. виды местной коррозии.

Самый надежный способ защиты от коррозии — применение коррозионностойких сталей. Коррозионная стойкость достигается при введении в сталь элементов, образующих на ее поверхности тонкие и

прочные оксидные пленки. Наилучший из этих элементов — хром. При введении в сталь 12-14% хрома она становится устойчивой против коррозии в атмосфере, воде, ряде кислот, щелочей и солей. Стали, содержащие меньшее количество хрома, подвержены коррозии точно так же, как и углеродистые стали. В технике применяют хромистые и хромоникелевые коррозионностойкие стали.

Хромистые коррозионностойкие стали могут содержать 13, 17 или 25-27% хрома. Стали марок 08X13, 12X13, 20X13 подвергаются закалке от 1000°C и отпуску при 600-700°C. Их применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, работающих в слабоагрессивных средах. Стали 30X13, 40X13 подвергаются закалке и отпуску при 200-300°C. Из них изготавливают режущий, мерительный и хирургический инструмент.

Стали 12X17, 15X28 имеют более высокую коррозионную стойкость. Подвергаются отжигу при температуре 700-780°C. Используются для оборудования заводов легкой и пищевой промышленности, труб, работающих в агрессивных средах, для кухонной посуды.

Хромоникелевые стали обычно содержат 18% хрома и 9-12% никеля (04X18N10, 12X18N10T, 12X18N12T и др.). Они имеют более высокую коррозионную стойкость по сравнению с хромистыми сталями, лучшие механические свойства, хорошо свариваются. Эти стали имеют аустенитную структуру. Их термообработка состоит из закалки от температуры 1100-1150°C в воде без отпуска.

Хромоникелевые стали склонны к межкристаллитной коррозии. Она быстро распространяется по границам зерен без заметных внешних признаков. Это происходит вследствие образования карбидов хрома по границам зерен, что приводит к уменьшению содержания хрома в поверхностном слое зерна. Чтобы карбиды хрома не образовывались, надо либо использовать стали с пониженным содержанием углерода (до 0,04%), либо дополнительно легировать сталь титаном, связывающим углерод в карбид титана.

Используются хромоникелевые стали в пищевой и химической промышленности, в холодильной технике. Поскольку никель дорогостоящий элемент, иногда его частично заменяют марганцем и используют сталь 10X14Г14Н4Т.

### **Другие методы защиты от коррозии**

Распространенным средством защиты от коррозии является нанесение на защищаемый металл различных покрытий. Металлические покрытия наносятся различными способами. При погружении в расплавленный металл поверхность изделия покрывается тонким и плотным слоем, затвердевающим после извлечения изделия. Этот способ применяется для нанесения покрытий цинком, оловом, свинцом и алюминием, температура плавления которых ниже, чем у защищаемого металла. При диффузионной металлизации изделие засыпают порошками алюминия, хрома, цинка и выдерживают при высокой температуре. При напылении поверхность изделия покрывают слоем расплавленного металла (цинка, алюминия, кадмия и др.) с помощью воздушной струи. При **плакировании** защищаемый металл подвергают совместной прокатке с защищающим (алюминием, титаном, нержавеющей сталью). Гальванический способ нанесения покрытий основан на осаждении под действием электрического тока тонкого слоя защитного металла (хрома, никеля, меди, кадмия) при погружении защищаемого изделия в раствор электролита.

**Неметаллические покрытия** подразделяются на лакокрасочные и эмалевые, смоляные, покрытия пленочными полимерными материалами, резиной, смазочными материалами, керамические покрытия и др. Покрытия, получаемые химической и электрохимической обработкой, превращают поверхностный слой изделия в химическое соединение, образующее сплошную защитную пленку. Наибольшее распространение имеют оксидные и фосфатные защитные пленки.

Протекторная защита основана на подсоединении к защищаемому изделию протектора с более отрицательным электрохимическим

потенциалом. В агрессивной среде протектор будет являться анодом и разрушаться, а защищаемое изделие — катодом и разрушаться не будет.

Для уменьшения агрессивности окружающей среды в нее вводят добавки, называемые **ингибиторами коррозии**. Они значительно снижают скорость коррозии. Условием использования ингибиторов является эксплуатация изделия в замкнутой среде постоянного состава.

### **Жаростойкие и жаропрочные стали**

Под жаростойкими сталями понимают стали, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности при высокой температуре (свыше 550°C). При нагреве стали происходит окисление поверхности и образуется оксидная пленка (окалина). Дальнейшее окисление определяется скоростью проникновения атомов кислорода через эту пленку. Через пленку оксидов железа они проникают очень легко. Для повышения жаростойкости сталь легируют элементами, образующими плотную пленку, через которую атомы кислорода не проникают. Эти элементы — хром, алюминий, кремний. Так как алюминий и кремний повышают хрупкость стали, чаще всего применяют хром. Чем больше его содержание, тем более жаропрочной является сталь. Сталь 15X5 выдерживает до 600°C, 40X9C2 — до 800°C, рассмотренные ранее 12X17 — до 900°C и 15X28 — до 1050°C.

Жаропрочные материалы способны противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Жаропрочные стали классифицируются по структуре.

Перлитные стали содержат малое количество углерода, легируются хромом молибденом, ванадием (12XM, 12X1MФ). Используют для изготовления труб, паропроводов и др. деталей, длительно работающих при температуре 500-550°C.

Мартенситные стали в большом количестве легированы хромом (15X11MФ, 15X12BHMФ). Они используются для деталей энергетического оборудования, длительно работающего при температуре 600-620°C. Особую группу мартенситных сталей составляют **сильхромы**, применяемые для

клапанов двигателей внутреннего сгорания. Они дополнительно легированы кремнием (40X9C2, 40X10C2M).

Аустенитные стали легированы большим количеством хрома и никеля а также другими элементами (09X14H16Б, 09X14H19B2БР). Из этих сталей изготавливают детали газовых турбин, работающих при температуре 600-700°C.

Для работы при более высоких температурах (700-900°C) служат сплавы на основе никеля, называемые **нимониками**. Примером нимоника является сплав ХН77ТЮР, содержащий кроме никеля приблизительно 20% Сг, 2,5% Тi, 1% Аl. Для работы при температурах свыше 1000°C используют тугоплавкие металлы и их сплавы. Это — хром, ниобий, молибден, тантал, вольфрам. Они используются в атомной энергетике и в космической технике.

Температуры 1500-1700°C выдерживают жаропрочные керамические материалы на основе карбида и нитрида кремния.

### **Инструментальные стали и сплавы**

По назначению инструментальные стали делятся на стали для режущего, измерительного и штампового инструмента. Кроме сталей, для изготовления режущего инструмента применяются металлокерамические твердые сплавы и минералокерамические материалы. Режущий инструмент работает в сложных условиях, подвержен интенсивному износу, при работе часто разогревается. Поэтому материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью. **Теплостойкость** — это способность сохранять высокую твердость и режущие свойства при длительном нагреве.

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,7-1,3% углерода. Они маркируются буквой У и цифрой, показывающей содержание углерода в десятых долях процента (У7, У8, У9, У13). Буква А в конце марки Показывает, что сталь высококачественная (У7А, У8А, У13А). Предварительная термообработка этих сталей — отжиг на зернистый перлит, окончательная — закалка в воде или растворе соли и низкий отпуск. После

этого структура стали представляет собой мартенсит с включениями зернистого цементита. Твердость лежит в интервале HRC 56-64.

Для углеродистых инструментальных сталей характерны низкая теплостойкость (до 200°C) и низкая прокаливаемость (до 10-12 мм). Однако вязкая незакаленная сердцевина повышает устойчивость инструмента против поломок при вибрациях и ударах. Кроме того, эти стали достаточно дешевы и в незакаленном состоянии сами хорошо обрабатываются.

Стали У7-У9 применяются для изготовления инструмента, испытывающего ударные нагрузки (зубила, молотки, топоры). Стали У10-У13 идут на изготовление инструмента, обладающего высокой твердостью (напильники, хирургический инструмент). Стали У8-У12 применяются также для измерительного инструмента.

Низколегированные инструментальные стали содержат в сумме около 1-3% легирующих элементов. Они обладают повышенной по сравнению с углеродистыми сталями прокаливаемостью, но теплостойкость их невелика — до 400°C. Основные легирующие элементы — хром, кремний, вольфрам, ванадий. Маркируются эти стали так же, как конструкционные, но содержание углерода дается в десятых долях процента. Если первая цифра в марке отсутствует, то содержание углерода превышает 1%. Например 9ХС, ХВГ, ХВ5. Термообработка низколегированных инструментальных сталей — закалка в масле и отпуск при температуре 150-200°C. При этом обычно достигается сквозная прокаливаемость. Твердость после термообработки составляет HRC 62-64.

Благодаря большей прокаливаемости и закалке в масле низколегированные стали используются для изготовления инструмента большой длины и крупного сечения (например, сверл диаметром до 60 мм). Применяются для ручного инструмента по металлу и измерительного инструмента.

**Быстрорежущие стали** предназначены для работы при высоких скоростях резания. Главное их достоинство — высокая теплостойкость (до

650°C). Это достигается за счет большого количества легирующих элементов — вольфрама, хрома, молибдена, ванадия, кобальта. Маркируются быстрорежущие стали буквой Р, число после которой показывает среднее содержание вольфрама в %. Далее идут обозначения и содержание других легирующих элементов. Содержание углерода во всех быстрорежущих сталях приблизительно 1 %, а хрома 4%. Поэтому эти элементы в марке не указываются. Например, Р18, Р9, Р6М5, Р6М5Ф2К8.

Термообработка быстрорежущих сталей заключается в закалке от высоких температур (1200-1300°C) и трехкратном отпуске при 550-570°C. Трехкратный отпуск применяется для того, чтобы избавиться от остаточного аустенита, который присутствует после закалки в количестве приблизительно 30% и снижает режущие свойства. После термообработки сталь имеет мартенситную структуру с карбидными включениями. Твердость после термообработки составляет HRC 64–65.

Быстрорежущие стали применяются для инструмента, используемого для обработки металла на металлорежущих станках (резцы, фрезы, сверла). Для экономии дорогих быстрорежущих сталей режущий инструмент часто изготавливается сборным или сварным. Рабочую часть из быстрорежущей стали приваривают к основной части инструмента из конструкционной стали.

**Металлокерамические твердые сплавы** представляют собой спеченные порошковые материалы, основой которых служат карбиды тугоплавких металлов, а связующим — кобальт. Их теплостойкость доходит до 900-1000°C, а твердость HRA 80-97.

**Твердые сплавы делятся на три группы. Вольфрамовые** изготавливаются на основе карбида вольфрама и кобальта. Маркируются буквами ВК и цифрой показывающей содержание кобальта в % (ВК2, ВК6, ВК10). **Титановольфрамовые** твердые сплавы содержат дополнительно карбид титана. Они маркируются буквами Т, К и цифрами. После буквы Т указывается содержание карбида титана в %, а после буквы К — кобальта (Т15К10, Т15К6). **Титанотанталовольфрамовые** содержат дополнительно

карбид титана. Маркируются буквами ТТ, после которых указывается суммарное содержание карбидов титана и тантала в % и буквой К, после которой указывается содержание кобальта (ТТ7К12, ТТ10К8).

Твердые сплавы изготавливаются в виде пластин, которые припаиваются к державке из углеродистой стали. Применяют твердые сплавы для резцов, сверл, фрез и другого инструмента. Главный недостаток твердых сплавов — высокая хрупкость.