

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Игнатенко Виталий Иванович
Должность: Проректор по учебно-методической деятельности
Дата подписания: 09.02.2023 13:06:04
Уникальный программный ключ:
a49ae343af5448d45d7e3e1e499659da8109ba78

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУВО «Заполярье государственный университет им. Н.М. Федоровского»
Кафедра технологических машин и оборудования

Классификация, маркировка и свойства легированных конструкционных сталей

*Методические указания
к практическим работам*

Норильск 2023

Классификация, маркировка и свойства легированных конструкционных сталей: метод. указ. к практ. работам / составитель А.Я. Сарафанова; Министерство науки и высшего образования РФ, Заполярный гос. ун-т им. Н.М. Федоровского. – Норильск: ЗГУ, 2023. – 68 с. – Библиогр.: с. 66. – Текст: непосредственный.

Представлены практические работы по классификации, составу, маркировке и назначению конструкционных, легированных конструкционных сталей, применяемых в машиностроении, металлургии и строительстве.

Предназначены для обучающихся бакалавриата технических направлений подготовки и специалитета.

Практическая работа №1

КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Классификация легированных конструкционных сталей

Легированные стали классифицируют по структуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе; по содержанию (количеству) легирующих элементов и назначению.

По **равновесной структуре** стали делятся:

- на *дозэвтектоидные* с избыточным ферритом в структуре, *эвтектоидные* с перлитной структурой;
- *заэвтектоидные* с избыточными карбидами;
- *ледебуритные стали*, в структуре которых присутствуют первичные карбиды.

Граница между перечисленными легированными сталями проходит при меньшем содержании углерода по сравнению со значениями, указанными на диаграмме состояния сплавов Fe–Fe₃C.

Некоторые легирующие элементы резко сужают или расширяют область γ -железа.

По структуре **после охлаждения на воздухе** различают:

- *перлитные стали*, характеризующиеся низким содержанием легирующих элементов и соответственно невысокой устойчивостью переохлажденного аустенита;
- *мартенситные стали* со средним содержанием легирующих элементов и, соответственно, высокой устойчивостью аустенита;
- *аустенитные стали*, содержащие большое количество легирующих элементов, сохраняющие аустенитную структуру при комнатной температуре.

По **количеству легирующих элементов** различают:

- *низколегированные стали*, содержащие до 2,5% легирующих элементов;
- *среднелегированные* – от 2,5 до 10%;
- *высоколегированные стали* – более 10% легирующих элементов.

По **назначению** различают три группы сталей:

1) *конструкционные*:

- строительные;
- машиностроительные (цементуемые, улучшаемые, высокопрочные, рессорно-пружинные, подшипниковые, износостойкие);

2) *инструментальные* (штамповые, для режущего и мерительного инструмента);

3) *с особыми физическими и химическими свойствами* (коррозионностойкие, жаропрочные, электротехнические, магнитные и др.).

Свойства легированных конструкционных сталей

Наиболее часто используется классификация, которая подразделяет конструкционные стали по назначению, определяющему выбор стали для конкретных деталей и конструкций. Каждая группа сталей оценивается соответствующими критериями, обеспечивающими работоспособность в эксплуатации.

Конструкционная прочность

Общие требования, предъявляемые к конструкционным материалам

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающихся механическим нагрузкам. Детали машин и приборов характеризуются большим разнообразием форм, размеров, условий эксплуатации. Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяются эксплуатационными, технологическими свойствами и экономическими требованиями.

Эксплуатационные свойства имеют первостепенное значение, они характеризуют способность материалов эксплуатироваться в определенных условиях. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Требуемые значения механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и от воздействия на него рабочей среды и температуры.

Рабочая среда (жидкая, газообразная, ионизированная, радиационная), в которой эксплуатируется материал, оказывает существенное и преимущественно отрицательное влияние на его механические свойства, снижая работоспособность деталей. В частности, рабочая среда может вызывать повреждение поверхности вследствие коррозионного растрескивания, окисления и образования окалина, а также изменение химического состава поверхностного слоя в результате насыщения водородом, вызывающим охрупчивание. Для того чтобы противостоять рабочей среде, материал должен обладать не только механическими, но и определенными физико-химическими свойствами: стойкостью к электрохимической коррозии, жаростойкостью (окалиностойкостью), радиационной стойкостью, влагостойкостью, способностью работать в условиях вакуума и др.

Температурный диапазон работы современных материалов составляет от 269 до 1000 °С, а в отдельных случаях – до 2500 °С. Для обеспечения работоспособности при высокой температуре от материала требуется жаропрочность, а при низкой температуре – хладостойкость.

В некоторых случаях важно также требование определенных магнитных, электрических, тепловых свойств, высокой стабильности размеров деталей (особенно высокоточных деталей приборов).

Технологические свойства (технологичность материала) характеризуют способность материала обеспечивать наименьшую трудоемкость изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала оценивается обрабатываемостью, резанием, давлением, свариваемостью, способностью к литью, а также прокаливаемостью, склонностью к деформации и короблению при термической обработке.

Экономические требования сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы по возможности должны содержать минимальное количество легирующих элементов. Использование материалов, содержащих легирующие элементы, должно быть обосновано повышением эксплуатационных свойств деталей.

Экономические требования, также как и технологические, приобретают особое значение при массовом масштабе производства.

Таким образом, качественный конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований.

Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки

Конструкционная прочность – комплексная характеристика, включающая прочность, жесткость, надежность и долговечность.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. При статических нагрузках критериями прочности являются *временное сопротивление* σ_s и *предел текучести* $\sigma_{0,2}$, характеризующие сопротивление материала пластической деформации. Поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность определяют по пределу текучести. Для приближенной оценки статической прочности используют твердость НВ (для сталей эмпирическое соотношение $\sigma_s = \text{НВ}/3,4$).

Большинство деталей машин испытывает длительные циклические нагрузки. Критерий их прочности – предел выносливости σ_{-1} .

По значениям выбранных критериев прочности рассчитывают допустимые рабочие напряжения. При этом, чем больше прочность материала, тем выше допустимые рабочие напряжения и меньше размеры и масса детали.

Однако повышение уровня прочности материала и, как следствие, рабочих напряжений сопровождается увеличением упругих деформаций.

Для ограничения упругой деформации материал должен обладать высоким модулем упругости (или сдвига), являющимся критерием его *жесткости*. Именно критерии

жесткости (не прочности) обуславливают размеры станин станков, корпусов редукторов и других деталей.

Для пружин, мембран и других чувствительных упругих элементов приборов, наоборот, важно обеспечить высокий предел и низкий модуль упругости.

Кроме стандартных механических характеристик, для оценки конструкционной прочности необходимы характеристики прочности при рабочих температурах и в эксплуатационных средах.

Надежность – свойство материала противостоять хрупкому разрушению, которое вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации.

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью (δ , ψ) и ударной вязкостью (KCU). В условиях эксплуатации большое влияние на свойства оказывают концентраторы напряжения, дополнительно снижающие пластичность, вязкость материалов и увеличивающие опасность хрупкого разрушения.

Чтобы избежать внезапных поломок в условиях эксплуатации, необходимо учитывать трещиностойкость материала.

Трещиностойкость характеризует способность материала тормозить развитие трещины.

Для оценки надежности материала используют следующие параметры: ударную вязкость KCV или KCT , температурный порог хладноломкости.

Порог хладноломкости характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. Его определяют результатами ударных испытаний образцов с надрезом при понижающейся температуре.

О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и температурному порогу хладноломкости t_{50} . При этом, чем ниже температура перехода в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения.

На рис. 1 показан случай, когда ударная вязкость двух сталей при температуре эксплуатации, равной 20 °С, одинакова. Однако переход в хрупкое состояние стали 1 (мелкозернистой) заканчивается при -40 °С, а стали 2 (крупнозернистой) – при 0 °С. По сравнению с температурой эксплуатации температурный запас вязкости у стали 1 составит 60 °С, а у стали 2 – лишь 20 °С. Сталь 1 более надежна в работе, так как возможное понижение температуры эксплуатации относительно расчетной при наличии трещин и ударной нагрузки не вызовет в ней хрупкого разрушения.

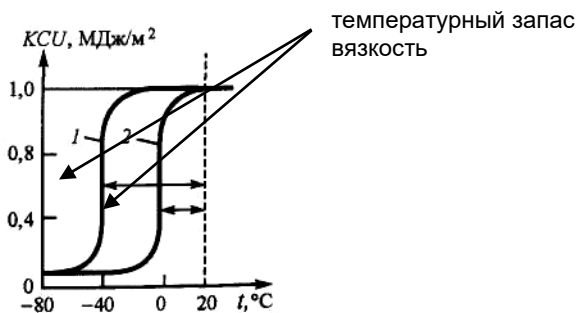


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры испытаний мелкозернистой (1) и крупнозернистой (2) стали (0,22%С)

Долговечность – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени (ресурса). Причины потери работоспособности (постепенного отказа): развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии, радиационного разбухания и др. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение. Обеспечение долговечности материала означает уменьшение до требуемых значений скорости его разрушения.

Для большинства деталей машин (более 80%) долговечность определяется сопротивлением материала усталостным разрушениям (циклической долговечности) или сопротивлением изнашиванию (износостойкости).

Циклическая долговечность характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяю-

щихся циклов напряжений. Она тем выше, чем ниже скорость зарождения и скорость развития трещин усталости.

Износостойкость характеризует сопротивление материала разрушению поверхности путем отделения его частиц под воздействием силы трения. Износостойкость оценивают величиной, обратной скорости изнашивания.

Долговечность деталей, работающих при высоких температурах (детали энергетических установок, реактивных двигателей), определяется *скоростью ползучести* – скоростью развития пластической деформации при постоянном (ниже предела текучести) напряжении. Ограничение скорости ползучести достигается применением жаропрочных материалов.

Долговечность деталей, работающих в атмосфере нагретых сухих газов или жидких электролитов, зависит соответственно от скорости химической или электрохимической коррозии. Работоспособность в таких средах сохраняют жаростойкие и коррозионностойкие материалы.

Таким образом, работоспособность материала детали в условиях эксплуатации характеризуют следующие критерии конструкционной прочности:

1) критерии прочности σ_s , $\sigma_{0,2}$, σ_1 , которые при заданном запасе прочности определяют допустимые рабочие напряжения, массу и размеры деталей;

2) модули упругости E , G , которые при заданной геометрии детали определяют величину упругих деформаций, т.е. ее жесткость;

3) пластичность δ , ψ , ударная вязкость KCT , KCV , KCU , вязкость разрушения, порог хладноломкости t_{50} , которые оценивают надежность материала в эксплуатации;

4) циклическая долговечность, скорости изнашивания, ползучести, коррозии, определяющие долговечность материала.

Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей

Стали – сложные по составу железо-углеродистые сплавы. Кроме железа и углерода – основных компонентов, а также возможных легирующих элементов, стали содержат некоторое количество постоянных и случайных примесей, влияющих на их свойства.

Углерод, концентрация которого в конструкционных сталях достигает 0,8%, оказывает определяющее влияние на их свойства. Степень его влияния зависит от структурного состояния стали, ее термической обработки.

В связи с этим, по мере повышения содержания углерода возрастают прочность и твердость, но снижаются пластичность и вязкость (рис. 2).

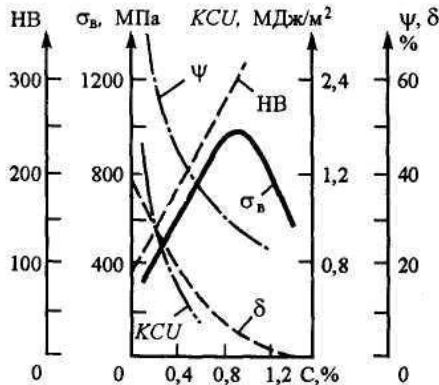


Рис. 2. Влияние углерода на механические свойства горячекатаных сталей

Углерод заметно повышает верхний порог хладноломкости, расширяя тем самым температурный интервал перехода стали в хрупкое состояние (рис. 3). Каждая 0,1% С повышает верхнюю границу этого перехода примерно на 20 °С. При 0,4% С порог хладноломкости равен 0 °С, при большей концентрации углерода эта температура достигает 20 °С; такие стали менее надежны в работе.

Влияние углерода еще более значительно при неравновесной структуре стали. После закалки на мартенсит временное сопротивление сталей интенсивно возрастает по мере увеличения содержания углерода и достигает максимума при 0,4% С. При низком отпуске механические свойства сталей полностью определяются концентрацией углерода в твердом растворе.

Углерод изменяет технологические свойства стали. При увеличении его содержания снижается способность сталей деформироваться в горячем и холодном состояниях, затрудняется свариваемость.

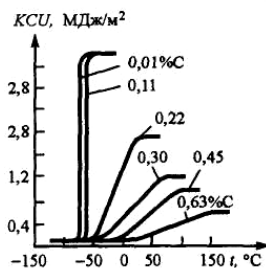


Рис. 3. Влияние содержания углерода на хладноломкость сталей

Постоянные примеси в сталях: Mn, Si, S, P, и газы O₂, N₂, H₂.

Марганец – полезная примесь, вводится в сталь для раскисления и остается в ней в количестве 0,3–0,8%. Марганец уменьшает вредное влияние серы и кислорода.

Кремний – полезная примесь; вводится в сталь в качестве активного раскислителя и остается в ней в количестве до 0,4%, оказывая упрочняющее действие, увеличивает жидкотекучесть.

Сера – вредная примесь, вызывающая красноломкость стали – хрупкость при горячей обработке давлением. Красноломкость связана с наличием сульфидов FeS, которые образуют с железом эвтектику, отличающуюся низкой температурой плавления (988 °C) и располагающуюся по границам зерен. При горячей деформации границы зерен оплаваются и сталь хрупко разрушается.

От красноломкости сталь предохраняет марганец, который связывает серу в сульфид MnS, исключая образование легкоплавкой эвтектики.

Устраняя красноломкость, сульфид MnS так же, как и другие неметаллические включения (оксиды, нитриды и т.п.), служит концентратором напряжений, снижает пластичность и вязкость сталей. Содержание серы в сталях строго ограничивают. Положительное влияние серы проявляется лишь в улучшении обрабатываемости резанием.

Фосфор – вредная примесь. Он растворяется в феррите, упрочняет его, но вызывает хладноломкость – снижение вязкости по мере понижения температуры. Сильное охрупчивающее действие фосфора выражается в повышении

порога хладноломкости (рис. 4). Каждая 0,01% P повышает порог хладноломкости на 25 °С. Хрупкость стали, вызываемая фосфором, тем выше, чем больше в ней углерода.

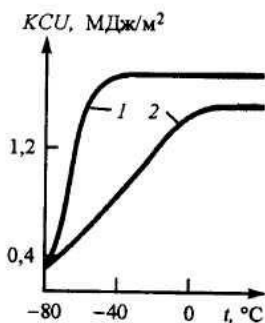


Рис. 4. Влияние фосфора на хладноломкость стали:
1 – 0,008%P; 2 – 0,06%P

Фосфор – крайне нежелательная примесь в конструкционных сталях. Современные методы выплавки и переплавки не обеспечивают его полного удаления, поэтому основной путь его снижения – повышение качества шихты.

Кислород, азот и водород – вредные скрытые примеси. Их влияние наиболее сильно проявляется в снижении пластичности и повышении склонности стали к хрупкому разрушению.

Кислородные включения способствуют красно- и хладноломкости, снижают прочность.

Азот упрочняет сталь, снижает ее пластичность и старение, особенно нежелательное для листовой стали (при содержании углерода $< 0,1\%$ C), предназначенной для холодной штамповки. Последствия старения – разрывы при штамповке или образование на поверхности листов полос скольжения, затрудняющих их отделку.

Водород вызывает хрупкость, которая проявляется тем резче, чем выше прочность стали. Наиболее сильное охрупчивание наблюдается в закаленных сталях с мартенситной структурой и совсем отсутствует в аустенитных сталях.

Повышенное содержание водорода при выплавке стали может приводить к флокенам (внутренние надрывы, образующиеся в результате обработки давлением, которые развивает водород, выделяющийся при охлаждении в по-

ры вследствие понижения растворимости). Флокены в изломе имеют вид белых пятен, а на поверхности – мелких трещин. Этот дефект обычно встречается в крупных поковках хромистых и хромоникелевых сталей. Для его предупреждения стали после горячей деформации медленно охлаждают или длительно выдерживают при 250 °С. При этих условиях водород, имеющий большую скорость диффузии, не скапливается в порах, а удаляется из стали.

Случайные примеси – элементы, попадающие в сталь из вторичного сырья или руд отдельных месторождений. Из скрапа в стали попадает сурьма, олово и ряд других цветных металлов. Стали, выплавленные из уральских руд, содержат медь, из керченских – мышьяк. Случайные примеси в большинстве случаев оказывают отрицательное влияние на вязкость и пластичность сталей.

Назначение легирования

Легирующие элементы вводят с целью повышения конструкционной прочности сталей, что достигается при их использовании в термически упрочненном состоянии – после закалки и отпуска. В отожженном состоянии легированные стали по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых. В связи с этим обеспечение необходимой прокаливаемости – первостепенное назначение легирования. Прокаливаемость стали определяется ее химическим составом. Все легирующие элементы, кроме кобальта, повышают устойчивость переохлажденного аустенита, снижают критическую скорость закалки и увеличивают прокаливаемость.

Для легирования обычно используют Mo, Mn, Cr, Si, Ni, V и микродобавки B(0,002–0,005%). Эффективно повышает прокаливаемость введение элементов в следующих комбинациях: хрома и молибдена; хрома и никеля; хрома, никеля и молибдена и т.д. При комплексном легировании высокие механические свойства можно получить практически для деталей любого размера, поэтому комплексно-легируемые стали применяют для крупных изделий сложной формы. Возможность менее резкого охлаждения при закалке таких деталей уменьшает в них напряжение и опасность образования трещин.

Маркировка легированных сталей

В России принята буквенно-цифровая система маркировки легированных сталей. Каждая марка стали содержит определенное сочетание букв и цифр. Легирующие элементы обозначаются буквами русского алфавита: Х – хром, Н – никель, В – вольфрам, М – молибден, Ф – ванадий, Т – титан, Ю – алюминий, Д – медь, Г – марганец, С – кремний, К – кобальт, Ц – цирконий, Р – бор, Б – ниобий. Буква А в середине марки стали показывает содержание азота, а в конце марки – высокое качество стали.

Для конструкционных марок сталей первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Если содержание легирующего элемента больше 1,0%, то после буквы указывается его среднее значение в целых процентах. Если содержание легирующего элемента около 1,0% или меньше, то после соответствующей буквы цифра не ставится.

В качестве основных легирующих элементов в конструкционных сталях применяют хром до 2,0%, никель – 1,0–4,0%, марганец – до 2,0%, кремний – 0,6–1,2%. Такие легирующие элементы, как Мо, W, V, Ti обычно вводят в сталь в сочетании с Cr, Ni с целью дополнительного улучшения тех или иных физико-механических свойств. В конструкционных сталях эти элементы обычно содержатся в следующих количествах, %: Мо – 0,2–0,4; W – 0,5–1,2; V – 0,1–0,3; Ti – 0,1–0,2.

Например, сталь 18ХГТ содержит: 0,17–0,23% С, 1,0–1,3% Cr, 0,8–1,1% Mn, около 0,1% Ti; сталь 38ХНЗМФА – 0,33–0,40% С, 1,2–1,5% Cr, 3,0–3,5% Ni, 0,35–0,45% Мо, 0,1–0,18% V; сталь 30ХГСА – 0,32–0,39% С, 1,0–1,4% Cr, 0,8–1,1% Mn, 1,1–1,4% Si.

В инструментальных сталях цифра в начале марки стали показывает содержание углерода в десятых долях процента. Начальную цифру опускают, если содержание углерода около 1,0% или более.

Например, сталь 3Х2В8Ф содержит: 0,3–0,4% С, 2,2–2,7% Cr, 7,5–8,5% W, 0,2–0,5% V; сталь 5ХНМ – 0,5–0,6% С, 0,5–0,8% Cr, 1,4–1,8% Ni, 0,19–0,30% Мо; сталь ХВГ – 0,90–1,05% С, 0,9–1,2% Cr, 1,2–1,6% W, 0,8–1,1% Mn.

Для некоторых групп сталей принимают дополнительные обозначения. Марки автоматных сталей начинаются с буквы А, подшипниковых – Ш, быстрорежущих – с буквы Р, электротехнических – Э, магнитотвердых – Е.

При маркировке электротехнических сталей (1211, 1313, 2211 и т.д.) первая цифра обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, вторая – содержание кремния, третья – потери на гистерезис, четвертая – группу по основной нормируемой характеристике. Вместе три первые цифры означают тип стали, а четвертая – порядковый номер этого типа стали.

Марки стали для строительных конструкций обозначают С235, С245, С255, С345, С590К и т.д., где буква С означает сталь строительную, цифры – предел текучести проката, а буква К – вариант химического состава. Если в конце обозначения стоит буква Д, это значит, что сталь дополнительно легирована 0,15–0,30% Сu, например, С345Д.

Для изготовления рельсов широкой колеи типов Р75, Р65, Р50 применяют стали марок М76, М74, где буква М указывает мартеновский способ выплавки, а цифры – среднее содержание углерода в сотых долях процента.

В конце обозначения марок особо высококачественных сталей могут стоять буквы, показывающие способы ее дополнительного переплава. Буквы ВД означают, что с целью улучшения качества сталь была подвергнута вакуумно-дуговому переплаву, буква Ш – электрошлаковому, ПД – плазменно-дуговому, ВИ – вакуумно-индукционной выплавке.

Нестандартные легированные стали, выпускаемые заводом «Электросталь», обозначаются сочетанием букв ЭИ (электросталь исследовательская) или ЭП (электросталь пробная). Легированную сталь, выпускаемую Златоустовским металлургическим заводом, маркируют буквами ЗИ, заводом «Днепро-спецсталь» – ДИ. Во всех случаях после сочетания букв идет порядковый номер стали, например, ЭИ417, ЭП767, ЗИ8, ДИ8 и т.д. После освоения марки металлургическими и машиностроительными заводами условные обозначения заменяет общепринятая маркировка, отражающая химический состав стали.

Литейные стали маркируются той же буквенно-цифровой системой, как и деформируемые. Но в конце марки дополнительно ставится буква Л, что означает литейную сталь.

Жесть в зависимости от назначения, качества поверхности и свойств делится на марки ЧЖК, ЧЖР, ГЖГ, ГЖР, ЭЖК, ЭЖК-Д, ЭЖР-Д. Буквы в обозначении марок означают: ЖК – жесть консервная, ЖР – жесть разного назначения, кроме тары для пищевых продуктов, Ч – черная, Г – горячего лужения, Э – электротехнического лужения, Д – жесть с дифференциальным покрытием.

Влияние легирующих элементов на механические свойства сталей

Влияние легирующих элементов на механические свойства стали зависит от ее структурного состояния, которое определяется термической обработкой. Рассмотрим это влияние для двух структурных состояний стали:

1. После закалки на мартенсит и низкого отпуска свойства легированной стали определяются концентрацией углерода в мартенсите. Чем она выше, тем больше прочность и твердость, ниже ударная вязкость, выше склонность к хрупкому разрушению стали. Максимальное упрочнение достигается при 0,4% С (рис. 5). При большей концентрации углерода происходит хрупкое разрушение стали, о чем свидетельствуют низкие значения ударной вязкости.

Легирующие элементы влияют на механические свойства косвенно, увеличивая или уменьшая концентрацию углерода в мартенсите.

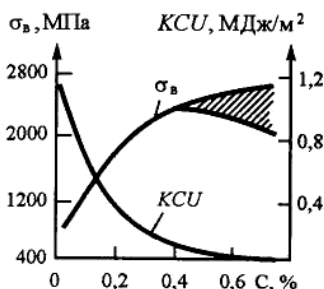


Рис. 5. Влияние концентрации углерода на механические свойства закаленных низколегированных сталей

Карбидообразующие элементы (Cr, Mo, W, V) увеличивают прочность связи атомов углерода с атомами твердого раствора, снижают термодинамическую активность (подвижность) атомов углерода, способствуют увеличению его концентрации в мартенсите, т.е. упрочнению.

Некарбидообразующие элементы (Ni, Si, Cu, Co), наоборот, увеличивают термодинамическую активность атомов углерода, снижая тем самым концентрацию углерода в твердом растворе. Особенно активно действует никель, предупреждая излишнюю хрупкость мартенсита.

2. После закалки и высокого отпуска (улучшения) структура стали представляет собой сорбит – ферритно-карбидную смесь с зернистой формой карбидной фазы. Высокие механические свойства сорбита обусловлены влиянием легирующих элементов на прочность феррита, а также дисперсность и количество карбидной фазы.

Феррит – основная структурная сталей, во многом определяющая их свойства. Легирующие элементы, растворяясь в феррите, упрочняют его. Свойства феррита зависят от непосредственного и косвенного влияния легирующих элементов. Непосредственное влияние связано с искажением кристаллической решетки феррита.

Наиболее сильно повышают твердость медленно охлажденного (нормализованного) феррита (рис. 6, а) Si, Mn, Ni, т.е. элементы, имеющие отличную от α -Fe кристаллическую решетку. Слабее влияют Mo, V и Cr, решетки которых изоморфны α -Fe.

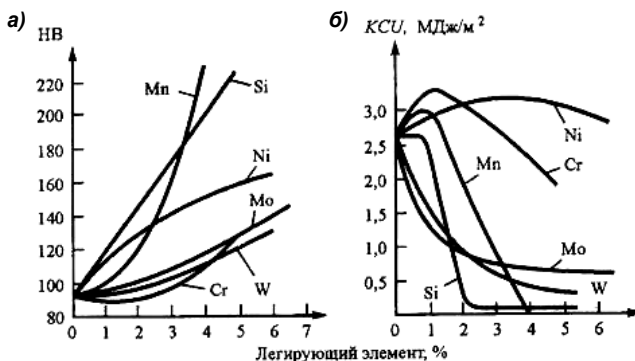


Рис. 6. Влияние легирующих элементов на твердость (а) и ударную вязкость (б) феррита

Косвенное влияние связано с увеличением концентрации углерода в феррите отпущенной стали. Сильное упрочняющее действие оказывают кремний и карбидообразующие элементы, которые затрудняют распад мартенсита и выделение из него углерода в виде дисперсных частиц карбидов. Чем сильнее выражена склонность легирующего элемента к карбидообразованию, тем позднее выделяется углерод из феррита и сильнее его упрочняющее действие. По степени увеличения косвенного влияния на прочность феррита легирующие элементы располагаются в следующей последовательности: Cr, Mo, W, Nb, V, Ti. При совместном легировании упрочняющий эффект возрастает.

Карбидообразующие элементы упрочняют феррит через карбидную фазу. Ее упрочняющее влияние растет по мере увеличения концентрации углерода и карбидообразующих элементов в стали.

Упрочняя феррит и мало влияя на пластичность, большинство легирующих элементов снижают его ударную вязкость, особенно если их концентрация выше 1% (см. рис. 6, б). Исключение составляет никель. Марганец и хром при содержании до 1% повышают ударную вязкость; при большей концентрации она снижается, достигая уровня нелегированного феррита примерно при 3% Cr и 1,5% Mn.

Большинство легирующих элементов измельчают зерно, что способствует повышению работы развития трещины и снижению порога хладноломкости. Наиболее сильно понижает порог хладноломкости и увеличивает сопротивление распространению трещины никель. Введение 1,0% Ni снижает порог хладноломкости после термического улучшения стали на 60–80 °С. Остальные элементы, за исключением небольших добавок хрома, марганца и молибдена, повышают порог хладноломкости.

Таким образом, для обеспечения высокой конструкционной прочности количество легирующих элементов в стали должно быть рациональным.

Хром вводят в количестве до 2,0%. Растворяясь в феррите и цементите, он оказывает благоприятное влияние на механические свойства стали, что предопределяет его широкое применение в конструкционных сталях.

Никель – наиболее ценный и в то же время наиболее дефицитный легирующий элемент. Его добавляют в количестве от 1,0 до 5,0%.

Марганец вводят в количестве до 1,5% и часто используют как заменитель никеля. Он заметно повышает предел текучести стали, однако делает ее чувствительной к перегреву, поэтому для измельчения зерна вместе с марганцем вводят карбидообразующие элементы.

Кремний – некарбидообразующий элемент, количество которого ограничивают до 2,0%. Кремний сильно повышает предел текучести, несколько затрудняет разупрочнение стали при отпуске; снижает вязкость и повышает порог хладноломкости при содержании Si свыше 1,0%.

Молибден и вольфрам – дорогие и остродефицитные карбидообразующие элементы, которые большей частью находятся в карбидах. Основная цель введения 0,2–0,4% Mo и 0,8–1,2% W – уменьшение склонности к отпускной хрупкости, улучшение свойств комплексно-легированных сталей в результате измельчения зерна, повышение стойкости к отпуску, увеличение прокаливаемости.

Ванадий и титан – активные карбидообразователи. Их добавляют в стали, содержащие хром, марганец, никель, в небольшом количестве (до 0,3% V и 0,1% Ti) для измельчения зерна. Повышенное содержание этих элементов (также, как Mo и W) недопустимо из-за образования специальных труднорастворимых при нагреве карбидов. Избыточные карбиды снижают прокаливаемость и, располагаясь по границам зерен, способствуют хрупкому разрушению.

Бор добавляют в микродозах (0,002–0,005%) для увеличения прокаливаемости. Микролегирование бором эквивалентно введению 1,0% Ni; 0,5% Cr или 0,2% Mo.

Стали, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность

Детали машин и приборов, передающих нагрузку, должны обладать жесткостью и прочностью, достаточными для ограничения упругой и пластической деформации, при гарантированной надежности и долговечности. Из многообразия материалов в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют сплавы на основе железа – чугу-

ны и особенно стали. Стали обладают высоким, наследуемым от железа, модулем упругости.

Высокую жесткость стали сочетают с достаточной статической и циклической прочностью, значение которой можно регулировать в широком диапазоне изменением концентрации углерода, легирующих элементов и технологии термической и химико-термической обработки.

Кроме комплекса этих важных для работоспособности деталей свойств стали могут обладать и рядом других ценных качеств, делающих их универсальным материалом. При соответствующем легировании и технологии термической обработки сталь становится либо износостойкой, либо коррозионностойкой, либо жаростойкой и жаропрочной, а также приобретает особые магнитные, тепловые или упругие свойства. Сталям свойственны также хорошие технологические свойства. К тому же они сравнительно недороги.

Благодаря этим достоинствам стали – основной металлический материал промышленности. Разработано около 2000 марок сталей и сплавов на основе железа.

Практическая работа №2

ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ СТАЛИ

По назначению конструкционные стали подразделяют на строительные, используемые для металлоконструкций и сооружений; машиностроительные, предназначенные для изготовления деталей машин и механизмов.

Конструкционные строительные стали

Низколегированные строительные стали используют для изготовления металлических конструкций и сооружений из профилей, листов и труб. Из них производят рамы машин и вагонов, металлоконструкции промышленных зданий, пролеты мостов и эстакад, магистральные нефте- и газопроводы. Стали должны обладать достаточной прочностью и пластичностью, малой склонностью к хрупким разрушениям, хорошей технологичностью (сваривае-

мостью, способностью к гибке, правке и т.п.) и хладостойкостью.

Основными расчетными характеристиками металлоконструкций являются временное сопротивление и предел текучести. В соответствии с ГОСТ 27772–88 строительные стали подразделяют на несколько классов прочности. Маркируют их буквой С и числом, выражающим значение предела текучести в мегапаскалях: С235, С285, ..., С590. В конце могут стоять буквы К, Т или Д, обозначающие:

- К – отличие химического состава стали от состава стали того же класса прочности, например, С345К отличается от С345 наличием 0,08...0,15% А1;

- Т – упрочнение проката термической обработкой (для листов из сталей С390, С390К, С440 используют нормализацию или улучшение, для листов из сталей С590 и С590К – только улучшение);

- Д – введение в сталь 0,15–0,30% Сu для повышения сопротивления атмосферной коррозии.

Механические свойства строительных сталей зависят от толщины проката: чем больше толщина проката (начиная с 4 мм), тем меньше значение σ_b , σ_m и KCU . Тем самым учитываются различия механических свойств из-за разных условий превращения переохлажденного аустенита. Основным требованием для всех видов проката и любых толщин является обеспечение хладостойкости: KCU должна быть не менее 29 Дж/см при температурах $-20 \dots -70$ °С и при 20 °С после механического старения.

Низколегированные строительные стали разделяют на стали повышенной прочности ($\sigma_m \geq 285$ МПа) и высокопрочные стали ($\sigma_m \geq 440$ МПа). Использование этих сталей вместо углеродистой Ст3 (сталь нормальной прочности $\sigma_m \geq 234$ МПа) обеспечивает повышение предела текучести в 1,3–1,8 раза. Благодаря этому достигается снижение массы металлоконструкции и сокращение расхода металла на 30–50%. Низкий порог хладноломкости (от -70 до -40 °С) этих сталей дает возможность использовать их в районах с низкими климатическими температурами (в Сибири, на Крайнем Севере), где из-за хладноломкости не применимы углеродистые стали.

Низколегированные стали содержат до 0,2% С, 2–3% легирующих элементов (Si, Mn) и микродобавки V, Nb, Ti, Al, N. Стали используют в основном в горячекатаном состоянии с ферритно-перлитной структурой. Особенность сталей с такой структурой состоит в том, что высокие прочностные свойства обеспечиваются на стадии производства.

По сравнению с углеродистой сталью Ст3 прочность низколегированных сталей выше благодаря упрочнению вследствие растворения в феррите Si и Mn, а также Ni, Cr, Cu и малых добавок V, Ti, Nb, Al и упрочнению в результате охлаждения проката или при термической обработке.

Строительные стали повышенной прочности производят и поставляют в соответствии с ГОСТ 19281–89 и ГОСТ 27772–88. Основными легирующими элементами в них являются недефицитные марганец и кремний (табл. 1). Некоторые стали дополнительно содержат небольшое количество ванадия или ниобия, а также медь (0,15–0,30%).

Структура сталей состоит из феррита и 10–15% перлита.

Таблица 1

**Химический состав и механические свойства
низколегированных строительных сталей
повышенной прочности**

Марка стали	Содержание элементов, %				σ_b	σ_m	δ	KCU, МДж/м ² при t, °C	
	C	Si	Mn	V				МПа	%
09Г2	≤0,12	0,17–0,37	1,4–1,8	–	450	310	21	0,30	–
09Г2С	≤0,12	0,5–0,8	1,3–1,7	–	480	330	21	0,35	0,3
10Г2С1	≤0,12	0,8–1,1	1,3–1,6	–	490	340	21	0,30	0,25
14Г2	0,12–0,18	0,17–0,37	1,2–1,6	–	460	330	21	0,30	–
17ГС	0,14–0,20	0,4–0,6	1,0–1,5	–	500	340	23	0,35	–
15ГФ	0,12–0,18	0,17–0,37	0,9–1,2	0,05–0,12	520	360	21	0,30	–
15Г2СФ	0,12–0,18	0,4–0,7	1,3–1,7	0,05–0,10	560	400	18	0,35	–

Примечания: 1) указаны механические свойства (не менее) при толщине проката до 20 мм; 2) во всех сталях содержание P < 0,035%; S < 0,040%.

Низколегированные стали обладают хладостойкостью, несмотря на высокую прочность.

Среди низколегированных сталей существуют *атмосферостойкие стали*. Использование их в металлоконструкциях позволяет обойтись без применения антикоррозионных покрытий. Атмосферостойкость обеспечивают малые количества Cu, P, Ni, Cr, Si и других элементов, модифицирующие слой ржавчины на поверхности металла. Образующиеся продукты коррозии имеют более высокую плотность и прочность, лучшее сцепление с поверхностью, чем антикоррозионные покрытия. Защитный слой из продуктов окисления образуется постепенно (через 1,5–3 года), после чего коррозия практически прекращается.

Химический состав отечественных *атмосферостойких* сталей 10ХНДП (изготавливают в виде проката толщиной < 12 мм) и 12ХГДАФ (прокат < 50 мм) представлен в табл. 2. Атмосферостойкие стали имеют $\sigma_s > 325$ МПа.

Таблица 2

Химический состав атмосферостойких сталей, %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
10ХНДП*	<0,12	0,3–0,6	0,17–0,37	0,5–0,8	0,3–0,6	0,3–0,5
12ХГДАФ**	0,09–0,15	0,6–1,0	0,17–0,37	0,8–1,1	–	0,25–0,5
15ХСНД***	0,12–0,15	0,40–0,7	0,4–0,7	0,6–0,9	0,30–0,60	0,2–0,4
10ХСНД***	<0,12	0,5–0,8	0,8–1,1	0,6–0,9	0,50–0,80	0,4–0,6

* Сталь также содержит 0,07–0,12% P.

** Сталь имеет повышенную хладостойкость и содержит также 0,07–0,12% V и 0,015–0,025% N.

*** Стали, применяемые для мостов (ГОСТ 6713–91).

Строительные стали высокой прочности (табл. 3) производят и поставляют в соответствии с ГОСТ 19281–89 и ГОСТ 27772–88.

Высокая прочность этих сталей, содержащих ванадий и алюминий, и повышенное количество азота (до 0,03%), достигается карбонитридным упрочнением, термическим упрочнением и контролируемой прокаткой.

Термическое упрочнение этих сталей заключается в закалке от 850–920 °С и высоком отпуске при 600–680 °С. Этому упрочнению подвергают прокат толщиной до 40–50 мм из сталей 12Г2СМФ, 14Г2МФ, 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФАЮ.

После высокого отпуска получается высокодисперсная смесь продуктов распада мартенсита и нижнего бейнита. Однако наибольшая прочность достигается у сталей с карбонитридным упрочнением благодаря дисперсионному твердению при отпуске ($\sigma_m = 600\text{--}730$ МПа).

Таблица 3

Химический состав и механические свойства низколегированных строительных высокопрочных сталей

Марка стали	Содержание элементов, %						σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCU, МДж/м ² , при t, °C		Состояние поставки*
	C	Si	Mn	N	V	Прочие				-40	-70	
14Г2АФ	0,12–0,18	0,3–0,6	1,2–1,6	0,015–0,025	0,07–0,12		550	400	20	0,4	0,3	Н
16Г2АФ	0,14–0,20	0,3–0,6	1,3–1,7	0,015–0,025	0,08–0,14	–	600	450	20	0,4	0,3	Н
18Г2АФ _{пс}	0,18–0,22	0,4–0,7	1,3–1,7	0,015–0,030	0,08–0,15	–	600	450	19	0,4	0,3	Н или ТУ
12Г2СМФ	0,09–0,15	0,4–0,7	1,3–1,7	–	0,07–0,15	0,15–0,25 Mo	700	600	14	0,35	–	ТУ
12ГН2МФАЮ	0,09–0,16	0,4–0,6	0,9–1,3	0,02–0,03	0,05–0,10	1,4–1,7 Ni 0,15–0,25 Mo 0,05–0,10 Al	700	600	14	–	0,3	ТУ

* Н – нормализованное, ТУ – термически упрочненное.

Уровень свойств сталей зависит от сочетания легирующих элементов и микродобавок. Наиболее широкое распространение получила сталь 16Г2АФ. После нормализации она имеет мелкое зерно (10–20 мкм), высокую прочность в сочетании с низким порогом хладноломкости.

Стали с карбонитридным упрочнением применяют для ответственных металлоконструкций, пригодных для эксплуатации при температурах ниже –40 °С, а также для магистральных газопроводных труб северного исполнения.

Особую группу среди высокопрочных строительных сталей образуют малоперлитные (5–10% перлита) стали с карбонитридным упрочнением при низком содержании углерода. Наибольшее применение получили 09Г2ФЮ и 09Г2ФБ. Сталь 09Г2ФБ содержит до 0,12% С; 0,05% Nb; 0,08% V и до 0,015% N. Следствием снижения концентрации углерода является повышенная ударная вязкость и

пластичность, низкий порог хладноломкости этих сталей. Основное их назначение – магистральные нефте- и газопроводные трубы большого диаметра (до 1420 мм) северного исполнения.

При низком содержании углерода высокий уровень прочности достигается применением прокатки – высокотемпературной пластической деформации, она включает нагрев до 1200 °С для растворения легирующих элементов в аустените и последующее деформирование в три стадии. Первая стадия протекает при температуре не ниже 950 °С и сопровождается развитием рекристаллизации и измельчением зерна. Вторая стадия происходит при температуре, близкой к нижней границе аустенитной области, и предусматривает высокие степени деформации. Третья стадия осуществляется при 800–850 °С, где дополнительно измельчается зерно. После охлаждения сталь приобретает структуру феррита с ячеистой субструктурой и дисперсными частицами карбонитридов. В результате упрочнения стали 09Г2ФБ и 09Г2ФЮ после прокатки имеют $\sigma_s \geq 560$ МПа, $\sigma_m \geq 460$ МПа, $KCU_{-60\text{ °C}} = 0,6$ МДж/м².

Цементуемые стали

Для изготовления деталей, работающих под действием динамических нагрузок в условиях поверхностного износа, применяют низкоуглеродистые стали, содержащие обычно не более 0,2% С, подвергаемые цементации, закалке и низкому отпуску (табл. 4).

Таблица 4

Характеристика цементуемых легированных сталей после закалки и низкого отпуска (ГОСТ 1050–88, ГОСТ 4543–71)

Марка стали	Содержание элемента, %				Прочие легирующие элементы	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_s , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
	C	Mn	Ni	Cr						
15X	0,12–0,18	0,4–0,7	–	0,7–1,0	–	490	690	12	45	0,7
20X	0,17–0,23	0,5–0,8	–	0,7–1,0	–	635	780	11	40	0,6
15XФ	0,12–0,18	0,4–0,7	–	0,8–1,1	0,06–0,12 V	540	740	13	50	0,8
20XН	0,17–0,23	0,4–0,7	1,0–1,4	0,45–0,75	–	590	780	14	50	0,8
18ХГТ	0,17–0,23	0,8–1,1	–	1,0–1,3	0,03–0,09 Ti	885	980	9	50	0,8
12ХН3А	0,09–0,16	0,3–0,6	2,75–3,15	0,6–0,9	–	685	930	11	55	0,9
12Х2Н4А	0,09–0,151	0,3–0,6	3,25–3,65	1,25–1,65	–	930	1130	10	50	0,9

Твердость поверхности готовой детали должна составлять около 20–40 HRC. В отличие от слабопрокаливающихся углеродистых сталей при цементации и термообработке легированных сталей происходит дополнительное упрочнение сердцевины. Это упрочнение тем больше, чем больше легирована сталь.

В зависимости от степени упрочняемости сердцевины различают две группы цементируемых легированных сталей со слабоупрочняемой и сильноупрочняемой сердцевиной (см. табл. 4).

Первую группу составляют низколегированные хромистые стали марок 15X, 20X, имеющие слабоупрочняемую сердцевину. Дополнительное легирование малыми добавками ванадия (сталь 15XФ) позволяет получить более мелкое зерно, что улучшает пластичность и вязкость стали.

Стали второй группы используют для изготовления деталей, испытывающих значительные ударные нагрузки, имеющих большое сечение или сложную конфигурацию, или для деталей, подвергающихся действию больших знакопеременных напряжений. В состав этих сталей вводят никель: 20ХН, 12ХН3А, 12Х2Н4А. Вследствие его дефицитности никель иногда заменяют марганцем, вводя небольшое количество титана или ванадия для измельчения зерна (18ХГТ).

Легирование хромоникелевых сталей вольфрамом или молибденом (например, сталь марки 18Х2Н4ВА или 18Х2Н4МА) дополнительно стабилизирует переохлажденный аустенит, а следовательно, еще больше увеличивает прокаливаемость стали. В результате закалки в масле сердцевина деталей приобретает структуру мартенсита. Такие стали применяют для крупных тяжелонагруженных деталей типа зубчатых колес, осей и др. Эти детали устойчивы к динамическим нагрузкам (см. приложение).

Улучшаемые стали

Улучшаемыми конструкционными сталями называют среднеуглеродистые стали (0,3–0,5% С), содержащие не более 5,0% легирующих элементов, используемые после операции так называемого улучшения, состоящей из закалки и высокого отпуска. Закалку таких сталей обычно проводят в масле. Температуру отпуска составляет 550–650 °С.

После термообработки улучшаемые стали имеют структуру сорбита, хорошо воспринимающего ударные нагрузки.

Улучшаемые стали имеют высокую прочность, вязкость, малую чувствительность к концентраторам напряжений и хорошую прокаливаемость.

В случае сквозной прокаливаемости после одинаковой термообработки свойства различных марок улучшаемых сталей близки между собой. Поэтому выбор той или иной марки улучшаемой стали в каждом конкретном случае обусловлен прокаливаемостью стали, сечением детали и сложностью ее конфигурации, наличием концентраторов напряжений.

Улучшаемые стали могут быть условно разбиты на пять групп. С увеличением номера группы растет степень легирования и размер сечения, в котором достигается сквозная прокаливаемость (табл. 5). В данной таблице порог хладноломкости указывает температура, при которой в изломе ударных надрезанных образцов имеется не менее 50% волокнистой составляющей.

Таблица 5

Характеристика улучшаемых конструкционных сталей после термообработки (ГОСТ 4543-71)

Группа	Марка стали	Содержание элемента, %					Прочие легирующие элементы	Порог хладноломкости $T_{50}, ^\circ\text{C}$	Критический диаметр $D_{50}, \text{мм}$
		C	Mn	Si	Cr	Ni			
I	40	0,37–0,44	–	–	–	–	–	–20	10
II	40X	0,36–0,44	–	–	0,8–1,1	–	–	–40	15
III	30XM	0,26–0,34	–	–	0,8–1,1	–	0,15–0,25 Mo	–50	25
	40XГ	0,36–0,45	0,9–1,2	–	0,9–1,2	–	–	–20	25
	30XГC	0,28–0,35	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	–	–	–20	25
IV	40XН	0,36–0,44	–	–	0,45–1,75	1,0–1,4	–	–60	35–40
	40XНМ	0,37–0,44	–	–	0,6–0,9	1,2–1,6	0,15–0,25 Mo	–70	50
V	38XНЗМ	0,30–0,42	–	–	1,2–1,5	3,0–3,4	0,35–0,45 Mo	100	100

Обычное содержание кремния в улучшаемых сталях составляет 0,17–0,37%, марганца – 0,5–0,8%, фосфора и серы – менее 0,035%.

К *группе I* относятся углеродистые стали марок 35, 40, 45, имеющие критический диаметр D_{95} до 10 мм, при котором достигается сквозная прокаливаемость, и содержащие в структуре не менее 95% мартенсита.

Группа II представлена хромистыми сталями марок 30X, 40X. Критический диаметр $D_{95} = 15-20$ мм. Недостатком сталей этой группы является склонность к отпускной хрупкости второго рода. Для них необходимо быстрое охлаждение после отпуска (в масло, воду).

В *группу III* входят хромистые стали, дополнительно легированные еще одним или двумя элементами 30XM, 40XГ, 30XГТ ($D_{95} = 20-25$ мм).

Для увеличения прокаливаемости в хромистые стали дополнительно вводят марганец (40XГ) и бор (40XP); молибден (30XM) вводят для снижения отпускной хрупкости второго рода.

Высокими свойствами обладают принадлежащие к этой группе стали, называемые хромансилями: 20XГС, 30XГС. Эти стали хорошо свариваются при высокой прочности $\sigma_6 = 1200$ МПа и $KCU = 0,4$ МДж/м². Их недостатком является склонность к отпускной хрупкости второго рода.

К *группе IV* относятся хромоникелевые стали, содержащие до 1,5% Ni: 40XН, 40XНМ. Их критический диаметр $D_{95} = 40$ мм.

Эти стали при пониженной температуре эксплуатации обладают большим запасом вязкости, чем стали предыдущих групп.

Группу V составляют комплекснолегированные стали, содержащие 3,0–4,0% Ni: 38XНЗМ, 38XНЗМФА. Эти стали, хотя и сравнительно дороги, относятся к лучшим маркам улучшаемых сталей. Критический диаметр D_{95} составляет 100 мм и более при низкой склонности к хрупкому разрушению. Из сталей этой группы изготавливаются сложные по конфигурации детали, подвергаемые ударным нагрузкам. Их недостаток состоит в склонности к флокенообразованию и трудности обработки резанием.

Высокопрочные стали

Высокопрочными называют стали с временным сопротивлением более 1500 МПа. Высокопрочное состояние может быть достигнуто при использовании средне- и вы-

сокоуглеродистых комплекснолегированных сталей после закалки и низкого отпуска. Однако при этом снижаются пластичность и вязкость стали, что может привести к хрупким разрушениям деталей и конструкций. Применение низкоотпущенных высокопрочных сталей возможно лишь в тех случаях, когда по условиям работы отсутствуют динамические нагрузки.

Современными направлениями достижения высокопрочного состояния без снижения работоспособности конструкций являются такие методы упрочняющей обработки стали, как термомеханическая обработка, и использование таких новых высокопрочных материалов, как мартенситно-стареющие стали (МСС) и ПНП-стали (ПНП – пластичность, наведенная превращением).

Высокопрочные мартенситно-стареющие стали характеризуются высокими значениями прочности $\sigma_s \geq 2000$ МПа в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью ($\psi \geq 50\%$, $KCU \geq 5$ МДж/м²). Опасность хрупких разрушений уменьшается благодаря минимальному содержанию углерода (не более 0,03%).

Упрочнение сталей достигается совмещением двух механизмов упрочнения: мартенситного превращения ($\gamma \rightarrow \alpha$), сопровождающегося фазовым наклепом, и старения мартенсита. Основным легирующим элементом является никель, содержание которого составляет 17,0–26,0%. Для более эффективного протекания процесса старения мартенсита стали дополнительно легируют титаном, алюминием, молибденом, ниобием, а также кобальтом (табл. 6).

Таблица 6

Химический состав и механические свойства мартенситно-стареющих сталей

Марка стали	Содержание элементов, %	σ_s	σ_b	δ	ψ	KCU	KCT
		МПа		%			
03Н18К9М5Т	18 Ni; 9 Co; 5Mo; 0,9 Ti	2100	1900	8	50	0,5	0,20
03Н12К15М10	12 Ni; 15 Co; 10 Mo	2500	2400	6	30	0,3	–
03Х11Н10М2Т	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,9 Ti; 0,2 Al	1600	1550	8	50	0,5	0,2

Широкое распространение имеет сталь 03Н18К9М5Т, содержащая не более 0,03% С, 17,0–19,0% Ni, 7,0–9,0% Со, 4,0–6,0% Мо, 0,5% Ti.

Сталь 03Н18К9М5Т подвергают закалке на воздухе при 800–850 °С. После закалки сталь имеет структуру безуглеродистого мартенсита со следующими свойствами: $\sigma_s = 1200$ МПа; $\sigma_{02} = 1000$ МПа; $\delta = 20\%$; $\psi = 75\%$; $KCU = 2,0$ МДж/м². В закаленном состоянии сталь хорошо обрабатывается давлением, резанием и хорошо сваривается.

Мартенситно-старяющая сталь получает основное упрочнение при старении, т.е. отпуске при 450–500 °С. Упрочнение при старении связано с выделением из мартенсита дисперсных частиц интерметаллидов. Легирование кобальтом увеличивает эффект старения. Механические свойства после старения: $\sigma_s = 2000$ МПа, $\sigma_{02} = 1800$ МПа, $\delta = 12\%$, $\psi = 50\%$, $KCU = 0,50$ МДж/м². При высокой прочности сталь сохраняет высокое сопротивление хрупкому разрушению. Вязкость разрушения K_{Ic} мартенситно-старяющих сталей составляет 50–70 МПа·м^{1/2}. При том же значении предела текучести вязкость разрушения обычных легированных сталей не превышает 30 МПа·м^{1/2}. При температуре –196 °С сталь имеет свойства: $\sigma_s = 2400$ МПа, $\delta = 10\%$, $KCU = 0,30$ МДж/м². Сталь 03Н18К9М5Т теплоустойчива до 450 °С.

Мартенситно-старяющие стали применяют в самолето- и ракетостроении, т.е. в тех отраслях, в которых важна удельная прочность, а также в криогенной технике, где они нашли применение благодаря высокой пластичности и вязкости при низких температурах.

Высокопрочные ПНП-стали относятся к классу аустенитных сталей. Одна из применяемых марок содержит 0,3% С, 8,0–10,0% Cr; 8,0–10,0% Ni; 4,0% Мо; 1,0–2,5% Mn; до 2,0% Si. После закалки от 1000–1100 °С и получения при комнатной температуре аустенитной структуры сталь подвергают деформации при 450–600 °С. При деформации происходит наклеп аустенита, выделение из него углерода и легирующих элементов с образованием дисперсных карбидов (дисперсионное упрочнение). В результате такой обработки ПНП-стали приобретают высокую проч-

ность ($\sigma_s \geq 1800$ МПа, $\sigma_{02} \geq 1400$ МПа) при высокой пластичности ($\delta > 30\%$).

Рессорно-пружинные стали

Основными требованиями, предъявляемыми к рессорно-пружинным сталям, являются высокое сопротивление малым пластическим деформациям (высокий предел упругости), высокий предел выносливости и повышенная релаксационная стойкость с сохранением упругих свойств в течение длительного времени. В пружинах и рессорах пластическая деформация не допускается, поэтому высокие значения пластичности и вязкости менее существенны.

Высокие упругие свойства обеспечиваются при содержании 0,5–0,7% С и получении трооститной структуры за счет закалки и среднего отпуска при температуре 350–450 °С. Углеродистые пружинные стали после термической обработки на троостит имеют $\sigma_{02} \geq 800$ МПа, легированные – $\sigma_{02} \geq 1000$ МПа.

Стали для пружин и рессор обычно легируют кремнием и марганцем, иногда в сочетании с другими элементами (табл. 7). Введение кремния задерживает распад мартенсита при отпуске. Кремний и марганец упрочняют феррит и увеличивают прокаливаемость стали.

Рессорно-пружинные стали должны обладать хорошей закаливаемостью и прокаливаемостью. Присутствие после закалки в структуре продуктов перлитного превращения или остаточного аустенита ухудшает упругие свойства стали. Для повышения сопротивления пластическим деформациям важную роль играет получение мелкозернистой структуры.

Таблица 7

Химический состав пружинных сталей, % (ГОСТ 14959–79)

Марка стали	С	Mn	Si
65	0,62–0,70	0,5–0,8	0,17–0,37
70	0,67–0,75	0,5–0,8	0,17–0,37
65Г	0,62–0,70	0,9–1,2	0,17–0,37
60С2	0,57–0,65	0,6–0,9	1,5–2,0
70С3А	0,66–0,74	0,6–0,9	2,4–2,8
60СГ	0,57–0,65	0,8–1,0	1,3–1,8
40ХФА	0,37–0,44	0,5–0,8	0,17–0,37

Средние свойства углеродистых рессорно-пружинных сталей после термообработки: $\sigma_{02} = 800$ – 1000 МПа, $\sigma_s = 1000$ – 1200 МПа, $\delta = 5$ – 8% , $\psi = 25$ – 30% , предел вынос-

ливости при изгибающей нагрузке 500–650 МПа, при кручении – 300 МПа. Величина предела выносливости уменьшается при наличии поверхностных дефектов и обезуглероживании. После дробеструйной обработки в поверхностных слоях создаются остаточные сжимающие напряжения, что увеличивает выносливость. Предел усталости в результате поверхностного наклепа повышается в 1,5–2 раза. При легировании рессорно-пружинных сталей кремнием и другими элементами прочность возрастает до $\sigma_s = 1300\text{--}1800$ МПа, $\sigma_{02} = 1100\text{--}1600$ МПа при $\delta = 5\text{--}8\%$, $\psi = 20\text{--}35\%$.

Пружины из углеродистых, марганцевых, кремнистых сталей работают при температурах не более 200 °С. При нагреве до 300 °С используют пружины из стали 50ХФА, а при более высоких температурах – из более теплостойких сталей: до 500 °С – из стали 3Х2В8Ф, до 600 °С – из стали Р18.

Для работы в агрессивных средах пружины изготавливают из хромистых коррозионностойких сталей типа 40Х13, 95Х18 и др. В некоторых случаях для работы в агрессивных средах и в криогенных условиях целесообразно применять мартенситно-старяющие стали.

Подшипниковые стали

Для изготовления шариков, роликов, колец подшипников качения и других деталей (плунжеров, втулок, корпусов распределителей, нагнетательных клапанов и т.д.), от которых требуются высокие износостойкость и выносливость при контактном циклическом нагружении, используют стали четырех типов:

- 1) хромистые с высоким содержанием углерода;
- 2) цементируемые низкоуглеродистые;
- 3) коррозионностойкие высокоуглеродистые с высоким содержанием хрома;
- 4) теплостойкие (хромовольфрамовые).

Работоспособность многих узлов трения зависит от скорости развития поверхностного усталостного выкрашивания (питтинга). Поверхностное выкрашивание характерно для материалов, используемых в узлах трения качения (зубчатые передачи, шарико- и роликоподшипники), которые подвержены высоким циклическим контактными нагрузкам. Эти нагрузки, действующие на малых участках поверхности, обу-

словливают процессы зарождения в приповерхностном слое усталостных трещин, их развитие в глубь слоя и отделение частиц с образованием ямок выкрашивания.

Сопrotивление материала поверхностному выкрашиванию называют **контактной выносливостью**.

По условиям работы подшипники должны выдерживать высокие контактные нагрузки в течение длительного времени, что обуславливает жесткие требования к металлургическому качеству стали. Особенно важным является минимальное количество дефектов, выходящих на поверхность.

Подшипниковые стали должны иметь следующие свойства:

1) способность выдерживать высокие нагрузки без остаточной деформации ($\varepsilon = 0,01\%$); так как давление в области контакта при работе может достигать 2000–4000 МПа, это свойство обеспечивается применением в качестве материала для подшипников азевтектондных легированных хромом сталей, обработанных на высокую твердость ($HRC > 60$);

2) сопротивление контактной усталости, что достигается высокой прочностью и повышенным металлургическим качеством стали: чем меньше в стали неметаллических включений, оксидов и сульфидов, меньше содержание водорода, ниже пористость, меньше металлургических дефектов, тем выше долговечность подшипников.

Подшипниковые стали маркируют буквами Ш и Х (шарикоподшипниковая хромистая). Цифра после буквы Х показывает содержание хрома в десятых долях процента. Содержание углерода составляет около 1,0% .

Химический состав для подшипников общего назначения приведен в ГОСТ 801–78 (табл. 8), а для подшипников специального назначения в соответствующих технических условиях (ТУ).

Детали подшипников подвергают закалке, начиная с 820–850 °С, и низкому отпуску при 150–170 °С. Особенностью термической обработки деталей подшипников является необходимость стабилизации их размеров на период эксплуатации. После закалки в структуре сталей сохраняется 8–15% остаточного аустенита. Он стабилизируется после низкого отпуска при 150–170 °С, и его присутствие в стали не отражается на размерах детали.

**Химический состав высокоуглеродистых
шарикоподшипниковых сталей (ГОСТ 801-78)**

Марка стали	Массовая доля, %*				
	C	Si	Mn	Cr	Другие
ШХ15	0,95–1,05	0,17–0,37	0,20–0,40	1,30–1,65	–
ШХ15СГ	0,95–1,05	0,40–0,65	0,90–1,20	1,30–1,65	–
ШХ4	0,95–1,05	0,15–0,30	0,15–0,30	0,35–0,50	–
ШХ20СГ	0,90–1,00	0,55–0,85	1,40–1,70	1,40–1,70	–
12ХН3А	0,09–0,16	0,17–0,37	0,3–0,6	0,6–0,9	2,75–3,15Ni
20Х2Н4А	0,16–0,22	0,17–0,37	0,3–0,6	1,25–1,65	3,25–3,65Ni
18ХГТ	0,17–0,23	0,17–0,37	0,8–1,1	1,0–1,3	0,03–0,09 Ti

* S ≤ 0,02; P ≤ 0,027; Ni ≤ 0,30; Cu ≤ 0,25; ΣNi + Cu ≤ 0,50.

Для дополнительной стабилизации прецизионные подшипники после закалки обрабатывают холодом от –70 до –80 °С.

Окончательно обработанная подшипниковая сталь имеет структуру мартенсита с включениями мелких карбидов и высокую твердость (HRC 60–64).

Детали крупногабаритных роликовых подшипников диаметром 0,5–2,0 м (для прокатных станков, электрических генераторов) изготавливают из сталей 12ХН3А, 12Х2Н4А (после цементации).

Подшипники, работающие в условиях агрессивных сред, изготавливают из высокохромистых сталей, содержащих около 1,0% углерода (табл. 9). Эти стали имеют высокую твердость в сочетании с коррозионной стойкостью. Их обычно подвергают электрошлаковому переплаву.

Коррозионностойкая хромистая сталь 95Х18–Ш мартенситного класса используется для подшипников средних и крупных размеров, работающих в агрессивных средах.

Молибденсодержащая коррозионностойкая сталь 11Х18М–ШД предназначена для малогабаритных и миниатюрных подшипников, эксплуатируемых при температурах до 350 °С.

Состав теплостойких подшипниковых сталей, работающих при температуре до 500–600 °С, приведен в табл. 9.

Высокая теплостойкость достигается в сталях 8Х4В9Ф2–Ш и 8Х4М4В2Ф1–Ш с одновременным легированием вольфрамом и молибденом.

Нагрев колец и тел качения под закалку проводят в две стадии: предварительный нагрев до 800 °С, окончательный – до 1220–1240 °С (до 1130–1160 °С для стали 8Х4М4В2Ф1–Ш); охлаждение в масле.

Таблица 9

Химический состав коррозионностойких и теплостойких подшипниковых сталей

№	Марка стали	Массовая доля, %								
		С	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	S	P	Прочие элементы
						Не более	Не более	Не более	Не более	
1	95Х18–Ш	0,9–1,0	17,0–19,0	≤0,7	≤0,8	0,3	0,25	0,025	0,030	Mo = 0,5–0,8
2	11Х18М–ШД	1,0–1,2	16,5–18,0	0,5–1,0	0,53–0,93	0,3	0,3		0,015	
3	8Х4В9Ф2–Ш	0,7–0,8	4,0–4,6	≤0,25	≤0,25	0,3	0,25	0,030	0,030	Mo < 0,3 W = 8,5–9,5 V = 1,4–1,7 Co ≤ 0,25
4	8Х4М4В2Ф1–Ш	0,75–0,85	3,9–4,4	≤0,4	≤0,4	0,35	–	0,030	0,015	Mo = 3,9–4,4 W = 1,5–2,0 V = 0,9–1,2

Сталь 8Х4В9Ф2–Ш является дисперсионно-твердеющей, поэтому отпуск колец и тел качения проводят при температуре 560–580 °С три раза по 2 ч каждый раз с охлаждением на воздухе. Окончательная твердость стали 59–64 НRC.

Для подшипников, работающих при температуре свыше 500 °С, детали отпускают при температуре 600–650 °С.

Экономнолегированная вольфрамом сталь 8Х4М4В2Ф1–Ш не уступает стали 8Х4В9Ф2–Ш по износостойкости, контактной усталости, теплостойкости до 500 °С, а по вязкости превосходит ее в 1,5 раза.

Долговечность сферических подшипников определяется отклонением от сферической формы, приводящей к биениям. Эти отклонения тщательно контролируются.

Полые шары более выносливы, так как способны упруго деформироваться под нагрузкой без разрушения. Их долговечность может быть в 5–8 раз больше, чем сплошных.

Износостойкие стали (ГОСТ 977–88, ГОСТ 21357–87)

Классификация и виды износа

Износ характеризуется потерей массы детали, уменьшением ее объема или линейных размеров. Если износ относится к пути трения, его называют **интенсивностью изнашивания**.

ния. Износ, отнесенный ко времени, в течение которого он проявляется, определяется **скоростью изнашивания.**

Различают допустимый и предельный износ. При *допустимом износе* сохраняется работоспособность детали. *Предельный износ* характеризуется такими изменениями формы и размеров, при которых дальнейшая эксплуатация детали становится невозможной.

В соответствии с ГОСТ 27574–88 различают механическое, коррозионно-механическое и электроэрозионное виды изнашивания.

Наиболее общим видом изнашивания является механическое в результате механических воздействий. В зависимости от характера механического воздействия различают следующие виды механического изнашивания:

1) абразивное – результат режущего или царапающего действия свободных или закрепленных твердых частиц; износостойкость при абразивном изнашивании чистых металлов пропорциональна их твердости;

2) усталостное – результат многократного деформирования участков поверхности контакта твердых тел;

3) эрозионное – под действием потоков жидкости или газа, движущихся с большими скоростями;

4) кавитационное – результат многочисленных микрогидравлических ударов, воспринимаемых поверхностью твердого тела, когда вблизи нее захлопываются пузырьки пара жидкости.

Потоки жидкости или газа со взвешенными абразивными частицами являются причиной гидро- и газоабразивного изнашивания.

Коррозионно-механическое изнашивание происходит при одновременном механическом и химическом воздействии окислительной среды, например, фреттинг-коррозия стальных деталей.

Электроэрозионное изнашивание проявляется в разрушении поверхности контакта и переносе массы материала под действием электрических разрядов.

Различные виды изнашивания по закономерностям протекания существенно различаются между собой. Многообразии причин изнашивания, одновременное воздействие многих факторов, определяющих скорость изнаши-

вания, быстрая смена условий трения на шероховатых соприкасающихся поверхностях значительно осложняют выбор конструкционных материалов и вид их обработки для обеспечения надежной работы узлов трения, рабочих органов машин.

Скорость изнашивания и износ зависят от времени. Существуют три периода износа:

1) начальный период или период приработки, при котором изнашивание протекает с постоянно замедляющейся скоростью;

2) период установившегося (нормального) износа, для которого характерна небольшая и постоянная скорость изнашивания;

3) период катастрофического износа.

Обеспечение износостойкости связано с предупреждением катастрофического износа, уменьшением скоростей начального и установившегося изнашивания.

Влияние химического состава на износостойкость стали

Растворенный при температуре закалки углерод определяет твердость закаленной стали и количество остаточного аустенита. Нерастворившаяся часть углерода в закаленной или незакаленной матрице присутствует в износостойких сталях в виде карбидов, поэтому увеличение содержания углерода способствует улучшению износостойкости сталей за счет как упрочнения матрицы, так и увеличения содержания карбидов. Обычно при этом прочность и вязкость стали снижаются.

При повышении содержания легирующих элементов прокаливаемость стали, твердость карбидов и теплостойкость улучшаются. В отличие от никеля и кремния, карбидообразующие элементы (Cr, Mo, V) улучшают прокаливаемость сталей только при условии растворения карбидов при повышенной температуре закалки. При определенном соотношении концентраций углерода и карбидообразующего элемента последний может растворяться в карбиде железа Fe_3C , который в этом случае называют карбидом типа M_3C .

Высокомарганцовистые аустенитные стали

Высокомарганцовистые аустенитные стали (табл. 10) используются в условиях ударно-абразивного изнашивания и повышенного давления. Основным условием повышенной износостойкости является высокая поверхностная твердость. Однако существует группа сталей, которые при низкой твердости 200–250 НВ в условиях ударной нагрузки или высокого удельного давления приобретают высокую износостойкость.

Первооткрывателем этой группы сталей был Р.А. Гадфильд. В 1883 г. он разработал и запатентовал сталь, названную его именем, содержащую 1,2% С и 13,0% Мн.

Таблица 10

Химический состав высокомарганцовистых аустенитных сталей (ГОСТ 977–88, ГОСТ 2157–87)

Марка стали	Массовая доля, %					
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
110Г13Л	0,90–1,50	0,30–0,90	11,50–15,00	≤1,0	≤1,0	–
110Г13Х2БРЛ	то же	0,30–1,00	11,50–14,50	1,0–2,0	≤0,5	–
110Г13ХБРЛ	0,90–1,30	0,30–0,90	то же	0,8–1,5	≤0,3	–
110Г13ФТЛ	то же	0,40–0,90	–	–	–	–
130Г14ХМФАЛ	1,20–1,40	≤0,60	12,50–15,00	1,0–1,5	≤1,0	0,2–0,3
120Г10ФЛ	0,90–1,40	0,20–0,90	8,50–12,00	≤1,0	≤1,0	–

Благодаря высокому содержанию углерода и марганца стали обладают относительно стабильной аустенитной структурой. Их обычно применяют в литом, реже в деформированном состоянии.

Сталь 110Г13Л содержит 0,9–1,4% С; 11,5–15,0% Мн; 0,5–1,0% Si. После литья структура состоит из аустенита и избыточных карбидов марганца в железе. При нагреве карбиды растворяются в аустените, поэтому после закалки от температуры 1100 °С в воде сталь получает чисто аустенитную структуру с малой твердостью 200 НВ.

Примерные механические свойства закаленной на аустенит стали 110Г13Л следующие: $\sigma_s = 780–980$ МПа; $\sigma_{02} = 255–390$ МПа; $\delta = 40–50\%$; $\psi = 40–50\%$, твердость 180–220 НВ.

Марганцевый аустенит хорошо наклепывается, особенно при ударных нагрузках, и после деформации в про-

цессе эксплуатации приобретает твердость до 50–55 HRC и дальнейшая резка становится невозможной.

При чисто абразивном износе (например, трении по песку) эффективного наклепа стали 110Г13Л не происходит, что приводит к повышенному износу детали. Кроме того, недостатком стали 110Г13Л является плохая обрабатываемость резанием, поэтому детали из нее чаще всего изготавливают литьем без механической обработки. В случае необходимости обработки резанием используют твердосплавный инструмент.

Высокомарганцовистые аустенитные стали используют для изготовления крестовин железнодорожных стрелок, зубьев ковшей экскаваторов, конусов и щек дробилок, звеньев гусеничных машин, бронефутеровочных плит различных мельниц.

Судостроительные стали (ГОСТ 5521–93)

Корпусные стали для судов применяются для изготовления сварных конструкций, эксплуатируемых в интервале температур от –60 до 150 °С в условиях коррозионного воздействия морской воды, повторно-статических и динамических нагрузений.

В настоящее время (ГОСТ 5521–93) за счет применения легированных сталей и совершенствования обработки прочностные характеристики возросли до 350–750 МПа по пределу текучести при относительном удлинении 19–22%.

Повышенные требования к качеству судостроительного материала из-за резкого увеличения водоизмещения судов, помимо перехода на сварку вместо клепки, обусловили применение всего комплекса новых технологических процессов, разработанных к настоящему времени: микролегирование, внепечное рафинирование, контролируемая прокатка и спреерное охлаждение в потоке стана. Изменилась само понятие «судостроительная сталь». В данную категорию теперь входят не только металлы для корпусов надводных судов, но и материалы для эксплуатируемых при низких температурах прибрежных сооружений, а также стали для подводных кораблей и устройств, работающих на больших глубинах. К ним относятся морские плавучие буровые установки, стационарные морские платформы, глубоководные аппараты и др.

Практическая работа №3

МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Стали с улучшенной обрабатываемостью резанием

Обработка резанием – основной способ изготовления большинства деталей машин и приборов. С улучшением обрабатываемости сталей возрастает производительность их обработки. Особое значение это имеет для массового производства, где широко применяются автоматические линии.

Обрабатываемость оценивают несколькими показателями, главный из которых – интенсивность изнашивания режущего инструмента. Количественная характеристика этого показателя – максимально допустимая скорость резания, соответствующая определенной степени износа или заданной стойкости инструмента. К дополнительным показателям относят чистоту поверхности резания, форму стружки и легкость ее отвода.

Обрабатываемость стали зависит от ее механических свойств, теплопроводности, микроструктуры и химического состава.

Связь между обрабатываемостью и механическими свойствами неоднозначная. Допустимая скорость резания снижается с увеличением твердости и прочности стали, поскольку возрастают усилия резания и температура нагрева инструмента, вызывающая разупрочнение его режущей кромки и снижение стойкости. Между тем обработка слишком пластичных сталей затруднена вследствие образования сплошной трудноломающейся стружки, которая, непрерывно скользя по передней поверхности инструмента, нагревает и интенсивно изнашивает ее. Кроме того, на режущей кромке инструмента из-за налипания металла возникает нарост, в результате чего поверхность получается шероховатой с задирами.

Повышение обрабатываемости резанием достигается технологическими и металлургическими приемами. К технологическим относятся термическая обработка и наклеп. Заготовки среднеуглеродистых сталей подвергают нормализации, так как при этом формируется наиболее благо-

приятная для обработки структура, состоящая из феррита и пластинчатого перлита. Нормализацию проводят с высоких температур нагрева для укрупнения зерна, что несколько увеличивает допустимую скорость резания.

Обрабатываемость низкоуглеродистых сталей повышают холодной пластической деформацией, которая, снижая пластичность сталей, способствует получению сыпучей, легкоотделяющейся стружки.

Более эффективны металлургические приемы, предусматривающие введение в конструкционную сталь серы, селена, теллура, кальция, изменяющих состав и количество неметаллических включений; свинца, создающего собственные металлические включения; фосфора, изменяющего свойства металлической основы.

Эти добавки и образуемые ими включения создают внутреннюю смазку, которая в зоне резания снижает трение между инструментами и стружкой, а также облегчают измельчение стружки.

Стали с увеличенным содержанием серы или дополнительно легированные указанными выше элементами относятся к *автоматным сталям*. В соответствии с ГОСТ 1414–75 их маркируют буквой А (автоматная); присутствие свинца обозначает буква С, селена – Е, кальция – Ц (автоматные стали, содержащие кальций, производят по техническим условиям). Двухзначная цифра после букв А, АС или АЦ – это среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Автоматные *сернистые* стали А11, А20, А30, А35, А40Г являются углеродистыми, содержат 0,08–0,30% S и 0,05–0,15% P. Для того чтобы не проявлялась красноломкость, в них увеличено количество марганца (0,70–1,55%).

Повышенное количество серы и фосфора снижает качество стали. Автоматным сернистым сталям свойственна анизотропия механических свойств – снижение вязкости, пластичности и особенно низкое сопротивление усталости.

Низкая коррозионная стойкость ограничивает применение этих сталей для изготовления ответственных деталей машин. Стали А11, А20 используют для крепежных деталей, а также малонагруженных деталей сложной формы, к которым предъявляются требования высокой точно-

сти размеров и чистоты поверхности. Стали А30, А40Г предназначены для деталей, испытывающих более высокие напряжения.

Автоматные *свинцовосодержащие* (0,15–0,35% Pb) стали подразделяют на углеродистые с повышенным содержанием серы (АС14, АС40, АС35Г2, АС45Г2) и легированные, среди которых имеются низкоуглеродистые (АС12ХН, АС14ХГН, АС20ХГНМ) и среднеуглеродистые (АС30ХМ, АС38ХГМ, АС40ХГНМ). По обрабатываемости эти стали заметно превосходят сернистые. Свинец не растворяется в стали и находится в виде дисперсных частиц, которые вместе с сульфидами действуют как эффективные измельчители стружки. Кроме того, от теплоты резания свинец плавится, растекаясь в виде пленки по обрабатываемой поверхности, и эффективно снижает трение между инструментом и деталью.

Введение свинца повышает скорость резания на 30–40% без снижения стойкости инструмента и в 2–7 раз увеличивает стойкость инструмента при сохранении принятой скорости резания.

Свинец не ухудшает прочностных свойств, вызывая некоторую анизотропию пластичности и вязкости. Свинцовосодержащие стали широко применяют на автомобильных заводах для изготовления многих деталей двигателя.

Автоматные *селеносодержащие* стали подразделяют на углеродистые (А35Е, А45Е) и хромистую (А40ХЕ). Они содержат 0,04–0,10% Se и 0,06–0,12% S. Повышение обрабатываемости связано с образованием селенидов и сульфоселенидов. Они обволакивают твердые оксидные включения и тем самым устраняют их истирающее действие. Применение селеносодержащих сталей позволяет в 2 раза снизить расход инструмента и до 30% повысить производительность обработки.

В отличие от серы селен практически не снижает коррозионных свойств. Его вводят в аустенитную хромоникелевую коррозионностойкую сталь. Так, 12Х18Н10Е (ГОСТ 5632–72) содержит 0,15–0,30% Se и по обрабатываемости приближается к простой углеродистой стали.

Автоматные *кальцийсодержащие* (0,002–0,008% Ca) стали (АЦ20, АЦ30, АЦ40Х, АЦ30ХН и др.) с добавлением

свинца и теллура предназначены для изготовления термически упрочненных деталей, обрабатываемых твердосплавным инструментом при высоких (100 м/мин. и более) скоростях резания. Необходимость использования высоких скоростей обработки диктуется тем, что тугоплавкие кальцийсодержащие включения, образующиеся в этих сталях, способны размягчаться и проявлять смазывающее действие лишь при высоких температурах в зоне резания.

Стали с высокой технологической пластичностью и свариваемостью

Технологическая пластичность – способность стали подвергаться горячей и холодной пластической деформации.

В горячем (аустенитном) состоянии большинство сталей обладают высокой пластичностью, что позволяет получать фасонный прокат и поковки без дефектов (трещин, разрывов и т.п.). Более того, горячей обработкой давлением (в сочетании с последующим отжигом) измельчают микроструктуру, устраняют литейные дефекты и, формируя волокна вдоль контура поковок, создают благоприятно ориентированную макроструктуру. В результате этого горячедеформированный металл в отличие от литого имеет примерно в 1,5 раза более высокую конструкционную прочность.

Высокий запас технологической пластичности необходим листовым сталям, предназначенным для холодной штамповки.

Листовая сталь для холодной штамповки должна обладать способностью к глубокой вытяжке и иметь хорошее качество поверхности для последующего нанесения покрытия. Способность к вытяжке зависит от многих факторов: химического состава и концентрации углерода, структуры и механических свойств стали. Чем меньше концентрация углерода, тем легче идет технологический процесс вытяжки. Для глубокой вытяжки содержание углерода в стали ограничивают 0,1%; при 0,2–0,3% С возможны только гибка и незначительная вытяжка, а при 0,35–0,45% С – изгиб большого радиуса.

Для глубокой, сложной и особо сложной вытяжки используют малопрочные ($\sigma_s = 280\text{--}330$ МПа) высокопластич-

ные ($\delta = 33\text{--}45\%$) низкоуглеродистые стали. Их поставляют в виде тонкого холоднокатаного листа, подвергнутого рекристаллизационному отжигу при $650\text{--}690\text{ }^\circ\text{C}$.

Для деформации применяют следующие стали: кипящую 08Фкп, микролегированную ванадием ($0,02\text{--}0,04\%$); спокойную 08Ю и 10ЮА с присадкой алюминия ($0,02\text{--}0,05\%$); спокойную (08ГСЮФ) с присадками алюминия и ванадия.

Основное применение имеет сталь 08Ю, которая допускает все четыре категории вытяжки.

Для штампованных деталей и изделий, которые должны иметь повышенную прочность (например, диски колес), применяют стали 12ХМ, 18ХГ2ФТЮДР, которые достаточно легко штампуются, но при этом сильно упрочняются (после штамповки $\sigma_m = 450\text{--}600\text{ МПа}$).

Свариваемость – способность получения сварного соединения, равнопрочного с основным металлом. Свариваемость металла характеризуется коэффициентом равнопрочности сварного соединения, количеством допускаемых способов и простотой технологии.

Большинство неразъемных соединений получают сваркой плавления с использованием мощного теплового источника – электрической дуги, при этом основной металл и электрод плавятся, образуя жидкую ванну. Температуры сварочной ванны и примыкающего металла достигают высоких значений. После кратковременного нагрева следует достаточно быстрое охлаждение, т.е. возникает своеобразный термический цикл, который определяет строение сварного шва и околошовной зоны.

Ширина участков зоны термического влияния зависит от режима сварки и толщины свариваемого металла. Свариваемость стали тем выше, чем меньше в ней углерода и легирующих элементов. Влияние углерода является определяющим. С увеличением его концентрации усиливается склонность к образованию горячих и холодных трещин.

Горячие трещины образуются непосредственно в сварном шве в процессе кристаллизации, когда металл находится в двухфазном состоянии. Причинами их возникновения являются кристаллизационные усадочные напряжения, а также образование сегрегации примесей (серы, фосфора, кислорода), ослабляющих связи между

формирующимися зернами. Углерод расширяет интервал кристаллизации и усиливает склонность стали к возникновению горячих трещин.

Холодные трещины образуются при охлаждении сварного шва ниже 200–300 °С преимущественно в зоне термического влияния. Это наиболее распространенный дефект при сварке легированных сталей. Причина их образования – внутренние напряжения, возникающие при структурных превращениях в результате местной закалки (подкалки). Увеличивая объемный эффект мартенситного превращения, углерод способствует появлению холодных трещин.

Для оценки склонности стали к образованию холодных трещин используют значение углеродного эквивалента:

$$C_{\text{экв}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/40 + \text{Cr}/5 + \\ + \text{Mo}/4 + \text{V}/14 + \text{Cu}/13 + \text{P}/2,$$

где символы легирующих элементов обозначают их массовые доли в данной марке стали, а числа – их коэффициенты активности.

Высокой свариваемостью обладают стали, у которых углеродный эквивалент не превышает 0,45–0,48%, т.е. содержащие до 0,25% С. В эту группу входят углеродистые стали Ст1 – Ст4, 05, 08, 10, 15, 20, 25; низколегированные стали 09Г2(Д), 09Г2С, 14Г2, 15ГФ(Д), 16ГС, 17ГС и др., применяемые для изготовления различных металлоконструкций (трубопроводов, мостов, вагонов, судов), а также стали с карбонитридным упрочнением 14Г2АФ(Д), 15Г2СФ(Д), 16Г2АФ и др., применяемые для изготовления металлоконструкций (мостов, цехов, кранов, резервуаров). Все они содержат небольшие добавки ванадия в сочетании с повышенным содержанием азота до 0,025%.

Сварка этих сталей при толщине до 15 мм не вызывает затруднений. Сварка при больших толщинах и в термически упрочненном состоянии требует подогрева и термической обработки. При сварке углеродистых и низколегированных сталей, содержащих более 0,3% С, возникают затруднения из-за возможности закалки и охрупчивания околошовной зоны; сварка полуфабрикатов из высокохромистых и хромоникелевых сталей в связи с неизбежными фазовыми превращениями в металле требует специальных

технологических приемов – снижения скорости охлаждения, применения защитных атмосфер и последующей термической обработки.

Литейные стали

Для изготовления стальных фасонных отливок применяются литейные стали, отличительными чертами которых являются удовлетворительные литейные свойства – жидкотекучесть, заполняемость, трещиностойкость (стойкость против образования горячих трещин), склонность к образованию усадочных пороков. Удовлетворительные литейные свойства стали позволяют получать сложные фасонные, часто тонкостенные отливки без дефектов – незаливов, горячих трещин, усадочных пороков.

Обеспечение надлежащего качества отливок – важное, но не определяющее условие разработки и применения для их изготовления специальной группы сталей – литейных.

Классификация и маркировка литейных сталей.

В машиностроении для изготовления стального фасонного литья в соответствии с ГОСТ 977–88 применяются три группы литейных сталей: *нелегированные* (углеродистые), *конструкционные легированные* и *легированные со специальными свойствами*.

Углеродистые литейные стали обозначаются так: 15...55Л, где цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента, а буква Л указывает на принадлежность к литейным сталям. В этих сталях, как правило, содержится марганец в количестве 0,3–0,9% и кремний в количестве 0,2–0,52%. Хром, никель и медь допускаются в этих сталях в количестве не более 0,3% каждого. Содержание серы и фосфора ограничивается значениями 0,45 и 0,04% соответственно.

Легированные литейные стали маркируются аналогично деформируемому легированному конструкционному сталям, за исключением того, что в конце литейной марки стоит буква Л. Например, сталь 30ХГСА аналогична деформируемой стали 30ХГСА.

В группу конструкционных легированных литейных сталей входят марганцовистые (35ГЛ), марганцекремнистые (20ГСА), хромистые (40ХЛ), хромоникелевые (35ХНЛ), хромомарганцекремнистые (30ХГСА), хромомарганцекрем-

нистованадиевые (23ХГС2МФЛ), медистые стали (08ГДНФЛ и 12ДН2ФЛ), в которые дополнительно специально введена медь Д, а также литейные высокопрочные экономнолегированные стали (17Х7Г3СМА, 23ХГС2МФЛ, 25Х2ГНМА, 17Х5Г5С2МА, 30Х3С3ГМА).

Практическая работа №4

МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Коррозионностойкие стали

Конструкционные материалы при эксплуатации в коррозионной среде должны обладать также высокой коррозионной стойкостью. Процессу коррозии наиболее подвержены металлы и сплавы, что объясняется их большой химической активностью и высокой электропроводимостью.

Коррозией металлов называют самопроизвольное разрушение металлических материалов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с окружающей средой. **Коррозионностойкими** называют металлы и сплавы, в которых процесс коррозии развивается с малой скоростью. Отмечают два вида коррозии: электрохимическую и химическую.

Устойчивость против коррозии повышается при введении в состав стали хрома, алюминия, кремния. Эти элементы образуют непрерывную прочную оксидную пленку и повышают электродный потенциал. Алюминий и кремний повышают хрупкость стали и применяются реже хрома.

Коррозионностойкие стали являются высоколегированными и содержат более 13% Cr, что обеспечивает образование на поверхности металла пассивирующей защитной пленки. Их разделяют на классы в зависимости от структуры, которая образуется после высокотемпературного нагрева и охлаждения на воздухе: мартенситный, мартенситно-ферритный (при содержании феррита не менее 10%), ферритный, аустенитно-ферритный (при содержании феррита не менее 10%), аустенитный и аустенитно-мартенситный (ГОСТ 5632–72). Суммарное влияние фер-

рито- и аустенитообразующих элементов характеризуют эквиваленты хрома $Cr_{экв}$ и никеля $Ni_{экв}$:

$$Cr_{экв} = Cr + 2Si + 1,5Mo + 5V + 5,5Al + 1,75Nb + 1,5Ti + 0,75W;$$
$$Ni_{экв} = Ni + 0,5Mn + 30C + 30N + 0,3Cu,$$

где символы легирующих элементов обозначают их массовые доли в данной марке стали, а числа – коэффициенты активности.

В настоящее время разработано несколько групп высокоазотистых коррозионностойких сталей с низким содержанием углерода.

Повышение прочности и снижение стоимости коррозионностойких сталей наиболее эффективно достигается путем использования азота в качестве легирующего элемента.

Азот – доступный практически в неограниченном количестве из воздуха легирующий элемент – отличается повышенной аустенитообразующей и упрочняющей способностью. Он эффективно заменяет дефицитный и дорогой никель и интенсивно упрочняет сталь. Для введения азота необходимо большое давление и наличие в стали нитридообразующих элементов (Ti, Nb, V, Cr, Mn). Сталь выплавляют в индукционной печи и раскисляют. Процесс кристаллизации идет при высоком давлении, масса получаемых слитков – до 2 т.

Растворимость азота в жидкой стали значительно увеличивает хром – необходимый элемент коррозионностойких сталей. Эти факторы обусловили возможность сверхравновесных (1,0–1,3%) концентраций азота именно в коррозионностойких сталях. В обычных конструкционных коррозионностойких сталях содержание азота составляет 0,15–0,25%.

Аустенитные стали – наиболее важный класс коррозионностойких сталей по масштабам использования и универсальности применения. По химическому составу эти стали разделяют на хромоникелевые и хромомарганцевые стали (табл. 11).

**Состав и свойства закаленных коррозионностойких сталей
аустенитного класса (ГОСТ 5632–81)**

Сталь	Массовая доля элементов, %						Механические свойства	
	С	Cr	Ni	Mn	Ti	прочие	σ_b , МПа	δ , %
04X18H10	<0,04	17–19	9–11	–	–	–	500	45
08X18H10	<0,08	17–19	9–11	–	–	–	520	45
12X18H10Т	<0,12	17–19	9–11	–	0,7	–	520	40
17X18H9	0,13–0,21	17–19	8–10	–	–	–	600	35
10X17H13M2Т	<0,1	16–18	12–14	–	0,3–0,6	1,8–2,5Mo	520	40
10X14Г14Н4Т	<0,1	13–15	2,8–4,5	13–15	0,6	–	650	35
12X17Г9АН4	<0,12	16–18	3,5–4,5	8–10,5	–	0,15–0,25N	700	40

Преимуществами аустенитных сталей, кроме коррозионной стойкости, являются высокая пластичность и вязкость. Изделия, включая тонкую ленту и фольгу, легко получают всеми способами пластического деформирования; стали имеют хороший комплекс литейных свойств и свариваемость. Исключением является обработка резанием – стали обрабатываются хуже углеродистых и низколегированных из-за высокой пластичности и упрочнения при резании. Сталь 12X18H10E с добавкой 0,18–0,36% Se является автоматной.

К недостаткам аустенитных сталей относят низкие значения предела текучести, а также подверженность опасным видам местной коррозии – коррозионному растрескиванию и межкристаллитной коррозии (МКК).

Структура аустенита обеспечивается при определенном соотношении между феррито- и аустенитообразующими элементами. Так, у хромоникелевых сталей достаточно иметь 9–11% Ni при 17,0–19,0% Cr; у хромомарганцевых сталей из-за пониженной аустенитообразующей активности марганца необходимо дополнительное легирование никелем (до 4–5%) и азотом (до 0,5%) или одновременно обоими элементами при увеличении содержания хрома до 20%.

Оптимальной термической обработкой для всех аустенитных сталей является закалка с 1050–1150 °С в воде (или на воздухе для тонких сечений толщиной 5–10 мм). После за-

калки механические свойства характеризуются максимальной пластичностью и вязкостью, невысокими прочностью и твердостью. Хромомарганцевые стали несколько прочнее хромоникелевых.

При холодном деформировании аустенитные стали интенсивно наклепываются и после закалки с однофазной аустенитной структурой проявляют максимальную коррозионную стойкость в большинстве агрессивных сред. Исключения составляют солянокислые и сернокислые растворы, которые разрушают защитную пассивирующую пленку, в особенности при нагреве.

Недостатком аустенитных сталей является восприимчивость к опасным видам местной коррозии (МКК), коррозионному растрескиванию и точечной коррозии.

Причиной МКК является электрохимическая неоднородность пограничных участков по сравнению с самими зернами. Из-за этой неоднородности пограничные участки являются анодами и быстро подвергаются коррозионному разрушению.

Для предупреждения МКК аустенитные стали дополнительно легируют титаном или ниобием.

Аустенитные стали с содержанием не более 0,03% С не восприимчивы к МКК, но даже у них после длительной эксплуатации при 500–600 °С теряется стойкость против МКК из-за увеличения концентрации примесей на границах аустенитных зерен. Опасным является содержание свыше 0,01% Р, 0,1% Si, а также 0,001% В.

Разновидностью МКК является ножевая коррозия сварных соединений, когда основной металл разрушается на узких полосках шириной около 0,1 мм по обе стороны от шва металла. Понижение содержания углерода в стали затрудняет развитие этого вида коррозии. Лучшей стойкостью против ножевой коррозии обладает сталь 08Х18Н12В.

Хромомарганцевые стали, содержащие азот, нельзя легировать титаном или ниобием для защиты от МКК. Оба элемента, в первую очередь, будут взаимодействовать с азотом, образуя нитриды. В этих сталях для повышения стойкости против МКК уменьшают содержание углерода до 0,03%.

Коррозионное растрескивание появляется в результате одновременного действия активной среды и растягивающих напряжений. Коррозионные трещины в металле возникают без заметной деформации. Повышение концентрации никеля в аустенитных сталях увеличивает сопротивление растрескиванию, начиная с 30–40% Ni, стали становятся стойкими к этому виду коррозии.

Точечная (питтинг) и щелевая коррозия имеют сходные механизмы коррозионного разрушения: нарушается сплошность защитной пленки и в электролите не хватает кислорода для ее восстановления. Типичной средой для развития точечной коррозии является морская вода. Нагрев электролита ускоряет коррозию, ее скорость максимальна при температуре около 80 °С и более чем в 100 раз больше скорости равномерной коррозии. В результате разрушения на поверхности металла появляются ямки глубиной и диаметром несколько миллиметров. Шероховатость поверхности ($R_a > 1,5$ мкм) также ускоряет коррозию. Щелевая коррозия развивается в узких зазорах, в местах отслаивания защитных покрытий, под шайбами при слабой затяжке крепежных деталей, в тупиковых зонах из-за неудачной конструкции деталей или ошибок сборки.

В аустенитных сталях стойкость против точечной коррозии повышают дополнительным легированием (2–3%) Mo, уменьшением шероховатости поверхности, повышением структурной и химической однородности.

Особую группу образуют безникелевые стали с аустенитной структурой, содержащие 18–24% Cr и 1,0–1,3% N. Эти стали подвергают закалке с 1200 °С, которая обеспечивает практически полное растворение нитридов при сохранении мелкозернистой структуры, и отпуску при 400 °С для уменьшения закалочных напряжений. Стали сочетают высокую прочность с высокой пластичностью. По уровню предела текучести эти стали в 3–4 раза превосходят хромоникелевую сталь 08X18H10. Дополнительно прочностные свойства можно повысить холодным пластическим деформированием со степенью обжатия до 50%.

Аустенитно-ферритные стали (078X22H6T, 08X21H6M5T, 08X18Г8H2T) имеют оптимальный комплекс свойств при практически равном содержании

аустенита и феррита, которое обеспечивается закалкой с 1000–1100 °С. Эти стали дешевле аустенитных, так как содержат меньше никеля, прочнее их в 1,5–2 раза и имеют почти такое же сопротивление коррозии, как сталь 12Х18Н10Т. Во избежание МКК стабилизируют титаном. Изделия из аустенитно-ферритных сталей рекомендуется эксплуатировать при температурах не выше 350 °С во избежание охрупчивания из-за структурных изменений.

Аустенитно-мартенситные стали (07Х16Н6; 09Х15Н9Ю, 08Х17Н5МЗ) по сравнению с аустенитными имеют высокую прочность, которая достигается сложной термической обработкой, включающей закалку для получения аустенита, обработку холодом при –70 °С для превращения аустенита в мартенсит и старения мартенсита при 350–500 °С. Обработка холодом может быть заменена пластическим деформированием. Химический состав сталей отличается малым содержанием углерода (< 0,1%), пониженным количеством никеля (5,0–8,0%) и добавками Al, Ti, Cu, Mo. При таком уровне прочности эти стали особенно склонны к коррозионному растрескиванию.

Ферритные стали (08Х13, 12Х17, 08Х17Т, 15Х25Т, 15Х28) не упрочняются термической обработкой. Они содержат 0,08–0,15% С и 13,0–30,0% Cr. Чем больше хрома в стали, тем выше ее сопротивление коррозии. Стали, содержащие 25,0–28,0% Cr, коррозионностойки в кипящих растворах 40%-й и более HNO₃. Стали с концентрацией хрома 25–28% в горячих растворах щелочей имеют лучшую стойкость, чем стали типа 12Х18Н10Т. После отжига они характеризуются умеренной прочностью и пластичностью, уступая аустенитным сталям по комплексу механических свойств и превосходя их только по сопротивлению коррозионному растрескиванию.

По техническим свойствам ферритные стали хуже аустенитных. Главный их недостаток – резкое охрупчивание после нагрева выше 1000–1100 °С. Это затрудняет сварку ферритных сталей, так как для частичного уменьшения хрупкости сварные соединения должны подвергаться отжигу при 750–800 °С. По завершении отжига требуется ускоренное охлаждение, чтобы не допустить охрупчивание. Ферритные стали после высокотемпера-

турного нагрева подвержены МКК. Склонность к охрупчиванию ферритных сталей ограничивает их применение, несмотря на меньшую стоимость по сравнению с аустенитными сталями.

Мартенситные стали (20X13, 30X13, 40X13, 20X17H2, 95X18) используют для деталей и инструментов, подвергающихся воздействию слабоагрессивных сред: воды, атмосферы, разбавленных растворов кислот и солей и т.д. Структура отожженных сталей представляет собой легированный феррит с частицами карбида хрома. Отожженные стали имеют удовлетворительную стойкость против коррозии, но их прочность невысока, она увеличивается после закалки и отпуска. Закалку проводят с 1050–1100 °С для растворения карбида хрома. Изделия после закалки (нормализации для тонких сечений) подвергают либо низкому (200–400 °С), либо высокому (600–700 °С) отпуску. Максимальное сопротивление коррозии стали имеют после низкого отпуска. Шлифование и полирование поверхности дополнительно повышают стойкость изделий (табл. 12).

Таблица 12

Химический состав (ГОСТ 5632–72) и механические свойства хромистых коррозионностойких сталей

Марка стали	Класс	Содержание элементов (остальное Fe), %		σ_s , МПа, после			δ , %, после		
		С	Cr	отжига	закалки и высокого отпуска	закалки и низкого отпуска	отжига	закалки и высокого отпуска	закалки и низкого отпуска
20X13	Мартенситный	0,16–0,25	12,0–14,0	500	660	–	20	16	–
30X13		0,26–0,35	12,0–14,0	500	700	1600	15	12	3
40X13		0,36–0,45	12,0–14,0	600	800	1680	15	9	3
20X17H2*		0,17–0,20	16,0–18,0	875	1000	1400	20	18	15
95X18		0,9–1,0	17,0–19,0	–	–	2000	–	–	<2
12X13	Ферритно-мартенситный	0,09–0,15	12,0–14,0	400	600	–	20	20	–
08X13	Ферритный	<0,08	12,0–14,0	420	–	–	22	–	–
12X17		<0,12	16,0–18,0	400	–	–	17	–	–
15X25T**		<0,15	24,0–26,0	450	–	–	12	–	–

*В стали также содержится 1,7–2,5 Ni.

**0,5–0,8% Ti.

Сталь 95X18 является износостойкой подшипниковой, после закалки и низкого отпуска она характеризуется высокой твердостью

Мартенситные стали после отжига удовлетворительно обрабатываются резанием, горячая обработка давлением и сварка этих сталей затруднены из-за образования мартенсита.

К азотсодержащим сталям мартенситного класса относится сталь 05X16H4AB, содержащая 0,10–0,15% N, для обеспечения мелкозернистой структуры в нее введен ниобий (0,08%). Сталь подвергают закалке с 1000 °С и отпуску при 400 °С, поэтому она при высокой прочности и повышенной пластичности обладает высокой коррозионной стойкостью.

Жаростойкие и жаропрочные стали

Основными характеристиками материалов, работающих при высоких температурах, являются жаростойкость и жаропрочность.

Жаропрочные и жаростойкие материалы применяют для изготовления деталей установок, которые подвергаются механическим нагрузкам при высоких температурах. Например, тепловые электростанции, установки нефтехимических предприятий и нефтеперерабатывающей промышленности, промышленные нагревательные печи, газовые турбины и авиационные двигатели.

Современные ТЭЦ используют пар, нагретый до 500–560 °С, а в некоторых случаях – до 650 °С. Стационарные газовые турбины и воздухонагреватели работают при температуре более 700 °С. Наиболее высокие рабочие температуры в авиационных двигателях и химических установках достигают 1100 °С и более (табл. 13).

Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные (ГОСТ 5632-72)

Марка стали	Состояние металла	$t_{зак},$ °С	Среда охлаждения	$t_{отп},$ °С	Назначение
20X13	Сопло горелки машины огневой зачистки после закалки и высокого отпуска	950–1050	Масло	700	Клапаны гидравлических прессов, предметы домашнего обихода, детали труб, трубы, детали котлов, лопатки паровых турбин, арматура крекинг-установок, штоки, валы, поплавки бензобаков. Рекомендуемая температура эксплуатации до 500 °С
14X17H2	Локатор (деталь самолета), литые после закалки и отпуска	950–975	Масло	250–350	Химическая, авиационная и другие отрасли промышленности, а также предметы домашнего обихода
08X18H10T	Горячекатаный металл толщиной 15 мм				Трубы, детали печной арматуры, теплообменники, муфелы, реторты, патрубки коллекторы выхлопных систем, электроды искровых зажигательных систем. Температура эксплуатации не более 800 °С. Неустойчива в серосодержащей среде
12X18H10T	Заклепки, прутки диаметром 8,0 мм после закалки (длительная эксплуатация в агрессивной среде)	1100–1150	Вода	–	Неустойчива в серосодержащей среде
20X23H18	Литой металл	–	–	–	Детали установок в химической и нефтяной промышленности, газопроводы, камеры сгорания, может применяться для нагревательных элементов сопротивления. Рекомендуемая температура эксплуатации до 1000 °С
	Горячекатаный металл толщиной 10 мм				
	После закалки (длительная эксплуатация детали в агрессивной среде)	1050–1100	Вода	–	

Жаростойкие стали

Способность металла сопротивляться химической коррозии в сухой газовой среде при высоких температурах называется **жаростойкостью** или **окалиноустойчивостью**. Железо с кислородом может образовывать оксиды трех видов: FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 . До 560–600 °С окалина состоит преимущественно из плотного слоя оксидов Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , что затрудняет диффузию атомов кислорода и металла. Выше 600 °С происходит растрескивание этих оксидов и вместо них защита металла осуществляется лишь рыхлым оксидом FeO , что облегчает доступ кислорода к поверхности металла. Нагрев более 600 °С приводит к интенсивному окислению сплавов на основе железа.

Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав металла, определяющий защитные свойства оксидной пленки. В табл. 14 приведена сравнительная оценка жаростойкости ряда чистых металлов, определенная по 5-бальной шкале скорости окисления в воздушной среде в интервале рабочих температур.

Таблица 14

Жаростойкость металлов на воздухе при рабочих температурах

Балл	Металл	Оценка жаростойкости		Определяющий фактор
		качественная	температурный интервал, °С	
1	Mg	Очень плохая	500–600	Рыхлая оксидная пленка
2	Nb, Mo, W, Ti, Zr	Плохая	700–800	Разрушение (деградация) оксидной пленки
3	Cu, Fe, Ni, Co	Удовлетворительная	500–600 700–800	Высокая дефектность сравнительно плотной оксидной пленки
4	Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Be	Хорошая	400–600 700–800	Плотная оксидная пленка
5	Ag, Au, Pt	Отличная	–	Низкое сродство к кислороду

Учитывая, что высокое содержание алюминия и кремния способствует охрупчиванию и ухудшает технологическую пластичность при обработке давлением, основным легирующим элементом в жаростойких сталях является хром. Жаростойкие свойства растут с увеличением его содержания в стали. Сталь, содержащая 5,0% Cr, сохраняет окалиностойкость до 600 °С (15X5), 9,0% (40X9C2) – до 800 °С, 17,0% (08X17T) – до 900 °С. Хромистые марки сталей относятся к сталям ферритного класса.

Для изготовления деталей печного оборудования применяют стали 20X23N18, 20X25N20C2, имеющие окалиностойкость до 1100 °С (табл. 15). Эти марки относятся к аустенитному классу и характеризуются не только высокой жаростойкостью, но и высокой жаропрочностью. Хотя уровень жаростойкости стали и ее максимальная рабочая температура в основном определяются содержанием хрома, повышение температуры эксплуатации обуславливает одновременный рост концентрации никеля, что связано с необходимостью стабилизации аустенитной структуры.

**Химический состав (ГОСТ 5632–72)
и механические свойства жаростойких сталей**

Марка	Содержание элементов, %				Свойства	
	C	Cr	Ni	Si	σ_s , МПа	δ , %
08X17T*	< 0,08	16,0–18,0	0,7	0,8	400	20
15X28*	< 0,15	27,0–29,0	0,8	1,0	450	20
20X23H18**	< 0,2	22,0–25,0	17,0–20,0	1,0	500	35
20X25H20C2**	< 0,2	24,0–27,0	18,0–21,0	2,0–3,0	600	35

* Сплав 08X17T содержит также 0,4–0,8% Ti. Свойства приведены в отожженном состоянии.

** То же в закаленном состоянии.

Жаропрочные стали

При длительной работе под нагрузкой, не превышающей предела текучести, и нагреве до температур около 0,4–0,5 $T_{пл}$ сталь испытывает медленную пластическую деформацию, которая называется **ползучестью** или **крипом**.

В качестве температурного критерия удобно рассматривать не заданную абсолютную температуру T , а ее отношение к абсолютной температуре плавления $T/T_{пл}$. Эту безразмерную величину называют *гомологической температурой*.

При деформации нагретого металла в нем развиваются два противоположных процесса: упрочнение за счет наклепа при пластической деформации и разупрочнение в результате рекристаллизации.

Жаропрочностью называется способность материала сопротивляться деформации и разрушению при высоких температурах (0,4–0,5 $T_{пл}$).

Срок службы, на который рассчитана машина или механизм, определяет выбор критерия жаропрочности и материала для их изготовления.

В соответствии с некоторыми рекомендациями срок службы ряда жаропрочных конструкций в зависимости от назначения составляет (ч):

- ракеты и их силовые установки 1;
- силовые установки самолетов-истребителей 100;
- силовые установки гражданских самолетов 1000;
- газовые турбины локомотивов и судов 10000;
- газовые турбины стационарных силовых установок 30000;
- паровые турбины стационарных силовых установок 100000.

При рабочих температурах ниже 400–450 °С нет необходимости использовать жаропрочные материалы. В этих условиях могут успешно работать обычные конструкционные стали. Для работы в условиях высоких температур используют жаропрочные стали (табл. 16).

Таблица 16

Свойства жаропрочных сталей и никелевых сплавов

Марка	Группа	Содержание легирующих элементов, %	Температура, °С	
			максимальная рабочая	начала интенсивного окисления
12Х1МФ	Перлитные стали	0,12 С; 1,1 Cr; 0,3 Мо; 0,2 V	570–585	600
25Х2М1Ф		0,25 С; 2,3 Cr; 1,0 Мо; 0,4 V	520–550	600
15Х5М	Мартенситные стали	До 0,15 С; 5,2 Cr; 0,5 Мо	600	650
40Х10С2М		0,4 С; 10,0 Cr; 2,2 Si; 0,8 Мо	650	850
15Х11МФ		0,5 С; 11,0 Cr; 0,7 Мо; 0,3 V	550–580	750
11Х11Н2В2МФ		0,11 С; 11,0 Cr; 1,7 Ni; 1,8 W; 0,4 Мо; 0,25 V	600	750
12Х18Н10Т	Аустенитные стали	До 0,2 С; 18,0 Cr; 10,0 Ni; 0,5 Ti	600	850
45Х14Н14В2М		0,45 С; 14,0 Cr; 14,0 Ni; 2,4 W; 0,3 Мо	650	850
10Х11Н20ТЗР		До 0,1 С; 11,0 Cr; 20,0 Ni; 2,6 Ti; 0,02 В	700	850
ХН77ТЮР	Никелевые сплавы	До 0,07 С; 20,0 Cr; 2,6 Тt; 0,8 Al; до 0,01 В	750	1050
ХН55ВМТКЮ		0,1 С; 10,0 Cr; 5,0 Мо; 4,9 W; 14,0 Со; 4,5 Al; 1,6 Ti	950	1050

Различают следующие виды жаропрочных конструкционных сталей:

1. *Перлитные стали* используют для изготовления крепежа, труб, паропроводов, пароперегревателей и коллекторов энергетических установок, длительно работающих при температурах 500–550 °С. Перлитные стали содержат относительно малые количества углерода и обычно легированы хромом, молибденом и ванадием (марки 12ХМ, 12Х1МФ). Стали этого класса используют в закаленном или нормализованном и высокоотпущенном состоянии.

2. *Мартенситные стали* используют для изготовления деталей энергетического оборудования (лопатки, диафрагмы, турбинные диски, роторы), длительно работающих при температурах 600–620 °С. Стали более значительно легированы хромом, вольфрамом, молибденом, ванадием (марки 15Х11МФ, 15Х12ВНМФ). Высокая жаропрочность

этих сталей достигается при закалке от 1000–1050 °С в масле на мартенсит с последующим отпуском на сорбит или троостит.

Клапаны выхлопа двигателей внутреннего сгорания небольшой и средней мощности изготавливают из силхромов – хромокремнистых сталей мартенситного класса типа 40X9C2, 40X10C2M. Клапаны более мощных двигателей изготавливают из аустенитных сталей.

3. *Аустенитные стали* используют для изготовления роторов, дисков, лопаток газовых турбин, клапанов дизельных двигателей, работающих при температурах 600–700 °С. Хромоникелевые аустенитные стали для увеличения жаропрочности дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием, ниобием, бором и другими элементами. К жаропрочным сталям аустенитного класса относятся стали 09X14H16Б, 09X14H19B2БР, 45X14H14B2М.

Термообработка этих сталей состоит из закалки и старения при температурах выше эксплуатационных. При старении происходит выделение из аустенита мелкодисперсных избыточных фаз, что дополнительно увеличивает сопротивление стали ползучести.

Более высокие рабочие температуры (до 1000–1100 °С и более) выдерживают так называемые суперсплавы, выплавленные на основе элементов VIII группы периодической системы Д.И. Менделеева – никелевые, кобальтовые, железоникелевые сплавы. Их применяют при изготовлении газотурбинных двигателей для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Для работы при еще более высоких температурах применяют тугоплавкие металлы и керамические материалы.

Магнитные и электротехнические стали

В зависимости от знака и степени магнитной восприимчивости материалов различают диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетики обладают отрицательной магнитной восприимчивостью. Они намагничиваются противоположно приложенному магнитному полю и таким образом ослабляют его. К диамагнетикам относятся полупроводники (Si, Ge), диэлектрики (полимеры), ряд таких металлов, как Be, Cu, Ag, Pb.

Парамагнетики характеризуются слабой намагниченностью под действием внешнего поля. К парамагнетикам относятся K, Na, Al, а также такие переходные металлы, как Mo, W, Ti.

Ферромагнетики обладают высокой магнитной восприимчивостью. Из всех металлов только железо, кобальт, никель и гадолиний обладают высокими ферромагнитными свойствами.

Магнитотвердые стали

Эта группа сталей должна обладать высокими значениями коэрцитивной силы и остаточной индукции, сохраняя высокий уровень этих свойств в течение длительного времени.

Для постоянных магнитов применяют высокоуглеродистые стали со структурой мартенсита, содержащие около 1,0% C, дополнительно легированные хромом (3,0%) EX3, а также одновременно хромом и кобальтом EX5K5, EX9K15M2. Например, сталь EX6K6 содержит 1,0% C, 6,0% Cr и 6,0% Co. Легирующие элементы повышают магнитные характеристики, одновременно улучшая механическую и температурную стабильность постоянных магнитов. Эти стали подвергают нормализации, закалке и низкому отпуску.

Важнейшим легирующим элементом магнитных сплавов, способствующим максимальным значениям коэрцитивной силы, отсутствию размагничивания под действием вибрации и высоких температур, является кобальт.

Магнитомягкие стали

Основными требованиями к магнитомягким материалам являются низкие значения коэрцитивной силы и высокая магнитная проницаемость, а также малые потери при перемагничивании и на вихревые токи. Для удовлетворения этих требований металл должен обладать однородной структурой, быть чистым от примесей и включений, иметь крупнозернистое строение, свободное от внутренних напряжений, вызываемых наклепом.

В качестве магнитомягкого материала применяют технически чистое железо, в котором все примеси, особенно углерод, являются вредными. Содержание углерода не должно

быть более 0,025%. Для устранения наклепа и получения крупного зерна листовой металл подвергают высокотемпературному отжигу в безокислительной атмосфере. Технически чистое железо применяют для изготовления реле, сердечников, электромагнитов постоянного тока. Низкое удельное электрическое сопротивление увеличивает потери при перемагничивании, поэтому его применение ограничивается устройствами с постоянным магнитным полем.

Более высокое электрическое сопротивление имеют электротехнические низкоуглеродистые стали, дополнительно легированные 0,8–4,8% кремния, который образует с α -железом легированный твердый раствор. Благодаря более высокому электрическому сопротивлению снижаются потери на вихревые токи. Введение кремния одновременно повышает магнитную проницаемость; благодаря росту зерна снижаются потери на гистерезис. Однако при содержании около 4,0% Si происходит охрупчивание стали, что затрудняет деформацию.

Листовую электротехническую сталь после прокатки подвергают высокотемпературному отжигу в вакууме или в атмосфере сухого водорода при 1100–1200 °С. Для уменьшения тепловых потерь сердечники из кремнистой стали изготавливают из тонких (менее 1 мм) листов с прослойками из изоляционных материалов. Магнитные свойства кремнистой электротехнической стали приведены в табл. 17.

Таблица 17

Магнитные свойства легированной электротехнической тонколистовой стали (ГОСТ 21427–75)

Сталь	Толщина листа, мм
Горячекатаная изотропная	
1311	0,50
1411	0,50
1511	0,50
Холоднокатаная изотропная	
2011	0,65
2111	0,65
2211	0,65
2311	0,65
2411	0,50
Холоднокатаная анизотропная	
3411	0,50
3416	0,28

В России принята цифровая маркировка электротехнической стали. Первая цифра определяет структуру и вид проката: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с кристаллической структурой направления. Вторая цифра в марке определяет содержание кремния: 0 – < 0,4%; 1 – 0,4–0,8%; 2 – 0,8–1,8 %; 3 – 1,8–2,8%; 4 – 2,8–3,8%; 5 – 3,8–4,8%. Третья цифра определяет потери на гистерезис и тепловые потери Четвертая цифра – код числового значения нормируемого параметра. Чем больше цифра, тем меньше удельные потери.

Из сопоставления сталей 1411, 2411, 3411 (см. табл. 17) следует, что при одинаковой толщине листа и химическом составе наибольшие удельные потери имеет горячекатаная изотропная сталь, а наименьшие – холоднокатаная анизотропная.

После технологических операций, необходимых для изготовления деталей магнитопровода (резка, штамповка и др.), магнитные свойства сталей ухудшаются, т.е. увеличивается коэрцитивная сила, а, следовательно, и потери на гистерезис. Для восстановления магнитных свойств применяют отжиг при температуре ниже температуры фазового превращения (880–900 °С) в среде, предохраняющей от окисления и науглероживания. Если отжиг ведут в водородно-азотной атмосфере, то это очищает сталь от вредных примесей и ее магнитные свойства улучшаются.

Легированные электротехнические стали применяют в электротехнических изделиях, рассчитанных на работу при частотах до $f < 400$ Гц. Стали 2011, 2211 с более низким содержанием кремния используют для сердечников, работающих при частотах до 100 Гц. Стали с повышенным содержанием кремния (2311, 2411 1311, 1411) используют при частотах до 400 Гц, но в более слабых полях.

Современная технология производства высших сортов электротехнической стали предусматривает ее выплавку с минимальным содержанием углерода и заданным содержанием кремния, прокатку листа в горячем состоянии на толщину около 2,5 мм, отжиг при 800 °С и холодную прокатку на толщину 0,35–0,50 мм. При большей холодной деформации (45–60%) сталь получает текстуриро-

ванную до 90% структуру, при деформации около 10% – малотекстурированную структуру. Если прокатка проводится только в горячем состоянии, то текстура не образуется и магнитные свойства вдоль и поперек прокатки будут одинаковы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Примеры назначения легированных конструкционных сталей и их термической обработки (ГОСТ 4543–71)

Марка стали	Состояние металла	Температура нормализации, °С	Температура цементации, °С	Температура закали, °С	Среда охлаждения	Температура отжига, °С	Назначение	
1	2	3	4	5	6	7	8	
15Г	Горячекатаная труба диаметром 65 мм, толщина стенки 5 мм	–	–	–	–	–	Сварные строительные конструкции, штирпы для труб, болты, гайки и т.д.	
13Н5А	Заклепки ротора напнетателя, горячекатаный пруток диаметром 10 мм	С нагревом конца прутка под форму головки заклепки						Заклепки ротора, распределительные валы двигателя внутреннего сгорания
12ХНЗА	Шестерня после цементации, закали и отпуска	–	900–920	780–800	масло	180–200	Шестерни коробок скоростей, редукторов, станков, автомобилей, тракторов, механизмов, металлургического оборудования, шаровые пальцы автомобилей и т.д.	
	Шестерня после цементации, закали и отпуска	–	880–900	760–800	масло	150–180		
	Шестерня после закали с нагрева под цементацию и отпуска	–	880–910	880–910	масло	180–200		
30ХГСА	Пластины компрессора азотно-тукового производства, толщиной 1,5 мм после нормализации и высокого отпуска	880	–	–	–	540	Пластины компрессоров, оси, крепежные детали (болты, гайки) сварные конструкции из листов и труб, детали шасси самолетов и т.д.	
	Ось подшипника диаметром 80 мм конвертера после длительной эксплуатации при высокой температуре	–	–	–	–	–		
30ХГТ	Шлицевой валик трактора диаметром 60 мм после цементации, закали и низкого отпуска	–	900–910	860	масло	180	Валы главные и промежуточные, каретки, шестерни, оси, полуоси, крестовины кардана, валики переключения коробок передач, шлицевые валики и т.д.	
	Шлицевой валик после нормализации цементованной и закаленной детали	850–880	–	–	–	–		
	Вал коробки передач после закали и низкого отпуска	–	–	860	масло	200		

Окончание приложения

1	2	3	4	5	6	7	8
38ХА	Косозубая шестерня после улучшения (закалки с высоким отпуском)	–	–	850-870	масло	540	Клапаны двигателей внутреннего сгорания, ролики прокатных станков, шестерни коробок скоростей, валы, оси и полуоси, кулачки поворотные и рычаги, шпиндели, установочные кольца, втулки, муфты, шлицевые валы, вал-шестерни и другие детали станков, автомобилей, тракторов, крепежные детали: болты, гайки и т.д.
40Х	Вал-шестерня после закалки в масле, диаметр образца 15/20 мм	–	–	860	масло	–	
	Вал-шестерня после закалки в воде, диаметр образца 20 мм	–	–	850-870	вода	–	
	Образец размером 23x25x28 мм после закалки и низкого отпуска	–	–	830-850	вода	180–200	
	Вал-шестерня после закалки и высокого отпуска, диаметр образца 26/30 мм	–	–	850-870	масло	540	
	Шестерня редуктора разливочного крана после закалки с высоким отпуском	–	–	830-850	масло	650	
38Х2Н2МА	Ролик черновой клетки стана диаметр 70 мм, после закалки и низкого отпуска	–	–	865	масло	200–250	Транспортирующие и поддерживающие ролики прокатных и сталеплавильных цехов
	Ролик черновой клетки стана после закалки и высокого отпуска. Образец с флокенами	–	–	865	масло	550, масло	–
40ХН	Шестерня после закалки и высокого отпуска, закалки зуба ТВЧ	–	–	820–840	масло	600–620	Шестерни коробок, главные и промежуточные валы коробки передач, клапаны двигателей внутреннего сгорания, крепежные детали: болты, гайки
	Шестерня послековки	–	–	–	–	–	
40ХМФА	Ось барабана моталки после закалки с высоким отпуском	–	–	860	масло	580, масло	Клапаны и шатуны двигателей внутреннего сгорания, оси, полуоси, валы, бандажи зубчатых колес и т.д.
40ХН2МА	Ось барабана моталки после закалки с высоким отпуском	–	–	850	масло	600–620, масло	
70ХЛ	Корпус водяного насоса, литье до термообработки	–	–	–	–	–	Корпуса насосов, редукторов
	Корпус водяного насоса после электронно-лучевой закалки внутренней поверхности детали	–	–	–	–	–	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солнцев, Ю.П. Материаловедение [Текст]: учебник для вузов/ Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2004. – 788 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение [Текст]: учебник для вузов/ Б.Н. Арзамасов, В.И. Маракарова, Г.Г. Мухин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 648 с.
3. Стали и сплавы. Марочник [Текст] / под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с.
4. Фраценюк, И.В. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов [Текст] / И.В. Фраценюк, Л.И. Фраценюк. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 192 с.
5. Зарапин, Ю.Л. Стали и сплавы в металлургическом машиностроении [Текст]: справочник / Ю.Л. Зарапин, В.Д. Попов, Н.А. Чиченов. – М.: Металлургия, 1980. – 144 с.
6. Тылкин, М.А. Справочник термиста ремонтной службы [Текст] / М.А. Тылкин. – М.: Металлургия, 1981. – 647 с.
7. Металловедение и термическая обработка стали [Текст]: справочник / под ред. М.Д. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – Т. 3. – 215 с.
8. Марочник сталей и сплавов [Текст] / под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 638 с.
9. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 646 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Практическая работа №1. Классификация и свойства легированных конструкционных сталей	3
Практическая работа №2. Легированные конструкционные машиностроительные стали.....	20
Практическая работа №3. Материалы с особыми технологическими свойствами.....	40
Практическая работа №4. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды.....	47
Приложение	64
Библиографический список	66

Компьютерная верстка Т.В. Телелева

Темплан ФГБОУВО «ЗГУ» 2023 г., поз. 56. Подписано в печать 01.02.2023.
Формат 60x84 1/16. Бум. для копир.-мн.ап. Гарнитура *Bookman Old Style*.
Печать плоская. Усл.п.л. 4,3. Уч.-изд.л. 4,3. Тираж 30 экз. Заказ 18.

663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: RIO@norvuz.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе ЦИТ ФГБОУВО «ЗГУ»