

В.Е. Зоткин, Н.Н. Литвинова

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Учебное пособие

Челябинск
2015

УДК 669.018
3-18

Рецензенты:

*д-р техн. наук, проф. С.В. Добаткин (ИМЕТ РАН, г. Москва),
д-р техн. наук, проф. А.И. Батышев (МГМУ, г. Москва)*

Зоткин, В.Е.
3-18 **Специальные стали и сплавы: учебное пособие / В.Е. Зоткин, Н.Н. Литвинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 72 с.**

ISBN 978-5-696-04806-2

В учебном пособии кратко и в доступной форме излагаются основные положения теории и практики легирования сталей и сплавов. В основу пособия положен курс лекций, читаемых авторами по учебной дисциплине «Специальные стали и сплавы».

Ознакомление с пособием позволит студентам составить общее представление об учебной дисциплине, сформировать навыки и умения, необходимые для самостоятельного изучения специальной литературы.

Предлагается для студентов машиностроительных и металлургических специальностей; может быть полезным начинающим инженерам-исследователям. Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия»

УДК 669.018

ISBN 978-5-696-04806-2

© Зоткин В.Е., Литвинова Н.Н., 2015
© Издательский центр ЮУрГУ, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Систематика предварительной информации	
1.1. Определения и понятия.....	5
1.2. Кристаллизация металлов и сплавов.....	6
1.3. Образование твердых растворов.....	8
1.4. Превращение в металлах в твердом состоянии.....	9
1.5. Пластическая деформация металлов.....	10
1.6. Физические основы упрочнения сталей при легировании.....	11
2. Классификация и маркировка легированных сталей и сплавов	
2.1. Классификация.....	12
2.2. Маркировка.....	12
3. Образование химических соединений в сталях и сплавах	
3.1. Карбиды и нитриды.....	15
3.2. Интерметаллические соединения.....	16
4. Основы теории легирования	
4.1. Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа.....	18
4.2. Влияние легирующих элементов на критические точки.....	19
4.3. Распределение легирующих элементов в сталях.....	20
4.4. Влияние легирующих элементов на свойства твердых растворов..	21
5. Основы теории термической обработки легированных сталей	
5.1. Влияние легирующих элементов на превращения в сталях при нагреве.....	24
5.2. Превращения в легированных сталях при охлаждении.....	27
6. Превращения в закаленных легированных сталях при нагреве (отпуск легированных сталей)	
6.1. Распад мартенсита.....	31
6.2. Распад остаточного аустенита.....	32
6.3. Дисперсионное упрочнение (твердение).....	33
6.4. Отпускная хрупкость.....	33
7. Легированные стали и сплавы, применяемые в машиностроении (машиностроительные легированные стали)	
7.1. Стали и сплавы конструкционные (1) ²	35
7.2. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами (2).....	57
7.3. Стали и сплавы инструментальные (3).....	60
Библиографический список.....	64
Приложение.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей современного развития экономики является модернизация и интенсификация промышленного производства на основе последних достижений научно-технического прогресса. Создание технических объектов, отвечающих современным требованиям, невозможно без использования металлов и сплавов, ведущее положение среди которых занимают легированные стали.

Производство сталей во всем мире больше, чем всех металлов вместе взятых, и оно непрерывно растет. Без обеспечения необходимого объема сталей не может развиваться ни одна отрасль промышленности. Объем производства сталей является важнейшим показателем технической и экономической мощи страны.

При изучении теории и практики применения специальных сталей и сплавов в основном используются учебные издания [1, 2], которые в настоящее время становятся библиотечной редкостью; фундаментальные же издания [3, 4] существуют в единичных экземплярах и не могут компенсировать создавшегося дефицита в учебной литературе.

В связи с этим представляется целесообразным подготовить учебное пособие с кратким и доходчивым изложением основных положений учебного курса «Специальные стали и сплавы».

Цель учебного пособия – оказание помощи студентам в профессиональной подготовке, инициировать у них стремление к системному подходу при решении практических задач, связанных с использованием специальных сталей при изготовлении изделий машиностроения.

В пособии обобщена имеющаяся в литературе учебная информация [1–4]. В его основу положен курс лекций, читаемых авторами В.Е. Зоткиным (Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина) и Н.Н. Литвиновой (Колледж индустрии и гостеприимства № 23 г. Москвы) по специальным сталям и сплавам и по материаловедению для студентов, обучающихся по направлению «Металлургия» и специальности «Технология машиностроения».

Авторы выражают благодарность рецензентам – заведующему лабораторией «Металловедения легких и цветных металлов» Института металлургии и материаловедения РАН, д.т.н., профессору С.В. Добаткину и профессору кафедры «Технологии металлов и литейных процессов» МГОУ д.т.н. К.А. Батышеву.

1. СИСТЕМАТИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

1.1. Определения и понятия

При изготовлении изделий машиностроения широко используются технические металлы и сплавы (композиции, получаемые совместным расплавлением металлов).

Специальные стали – сплавы железа с углеродом с дополнительным введением в них химических элементов, которые называются легирующими, с целью получения каких-либо свойств. В связи с этим их называют также легированными сталями.

Все легированные стали содержат также химические элементы, перешедшие в них в процессе производства; такие элементы называются примесями. Содержание примесей в сталях ограничивается определенными пределами:

- $Mn \leq 0,8 \%$; $Si \leq 0,4 \%$ – элементы-раскислители;
- $S \leq 0,015 \%$; $P \leq 0,05–0,040 \%$ – вредные примеси.

Марганец и кремний могут быть и легирующими элементами в случае их содержания выше указанных пределов.

В теории металлы рассматриваются как вещества, состоящие из положительных ионов, окруженных частицами – электронами, слабо связанными с ядром; они непрерывно перемещаются внутри металла и принадлежат всей совокупности атомов.

В плане физических понятий металлами считаются вещества, особенностью которых является высокая электропроводность (теплопроводность), понижающаяся с повышением температуры.

Металлы значительно различаются между собой по внутреннему строению и свойствам. Тем не менее, по некоторым признакам их можно объединить в группы.

Прежде всего, все металлы разделяются на две большие группы:

- черные металлы, имеющие темно-серый цвет, большую пластичность, высокую температуру плавления и относительно высокую плотность; типичным представителем этой группы является железо;
- цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску (красную, желтую, белую), обладают большой пластичностью, малой твердостью и относительно низкой температурой плавления; типичным представителем этой группы являются медь, алюминий и цинк.

Черные металлы в свою очередь подразделяются на:

- железные металлы – железо, никель, кобальт, марганец;
- тугоплавкие металлы с температурой плавления больше, чем у железа (1539°C).

Цветные металлы подразделяются на:

- легкие металлы – бериллий, магний, алюминий;
- благородные металлы – серебро, золото, платина (к ним можно отнести и «полублагородную» медь);
- легкоплавкие металлы – цинк, кадмий, олово, свинец, висмут.

Основную долю в производстве и применении имеют черные металлы, точнее железо и его сплавы с углеродом и другими элементами.

1.2. Кристаллизация металлов и сплавов

Переход металлов из жидкого состояния в твердое сопровождается образованием кристаллов; твердое состояние при низких температурах энергетически более устойчиво, поскольку обладает меньшим запасом свободной энергии:

$$F = U - TS,$$

где U – внутренняя энергия; T – абсолютная температура $^{\circ}\text{K}$; S – энтропия.

При температуре затвердевания свободная энергия в жидком и твердом состояниях одинакова, металл находится в равновесном состоянии (рис. 1.1); процесс кристаллизации начинается только при наличии переохлаждения (рис. 1.2).

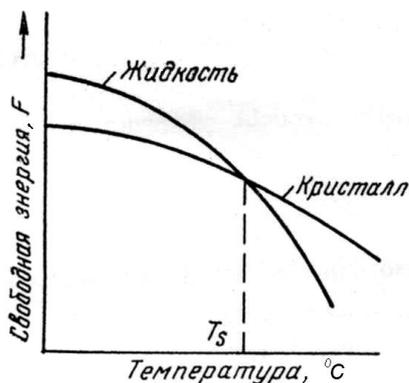


Рис. 1.1. Изменение свободной энергии жидкого и кристаллического состояния в зависимости от температуры

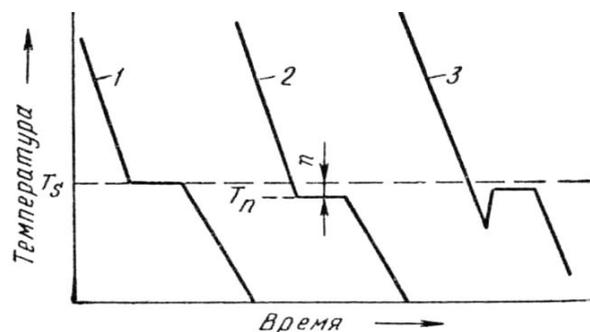


Рис. 1.2. Кривые охлаждения при кристаллизации

Твердые металлы отличаются закономерным расположением атомов в пространстве и условно характеризуются геометрическими фигурами кристаллических решеток. Типичными для металлов является решетки объемно-центрированного куба ОЦК, гранецентрированного куба ГЦК и гексоганально плотноупакованные ГПУ.

Реальные кристаллы-зерна обычно имеют небольшие размеры и неправильную форму. Характер и степень нарушения правильности (совершенство) кристаллического строения в значительной мере определяют свойства металлов.

Основными видами несовершенств кристаллического строения являются точечные дефекты – вакансии и линейные дефекты – дислокации. Вакансии непрерывно (хаотично) перемещаются в решетке, дислокации же начинают перемещаться при небольших напряжениях вдоль некоторых плоскостей, которые называются плоскостями скольжения.

Зерно не является монокристаллом, оно состоит из отдельных блоков, повернутых относительно друг друга на небольшой угол (несколько минут). Такая структура называется мозаичной. Блоки мозаики часто объединяются в фрагменты, разориентированные относительно друг друга на несколько градусов. Реальный металлический кристалл имеет атомно-кристаллические и структурные несовершенства.

Процесс кристаллизации происходит в две стадии:

1) Зарождение мельчайших частиц кристаллов, которые Д.К.Чернов называл зачатками центров кристаллизации (число центров) Ч.С.

2) Рост кристаллов из центров (скорость роста) С.Р.

Количественно обе стадии процесса кристаллизации зависят от степени переохлаждения (рис. 1.3.), которая определяется скоростью охлаждения.

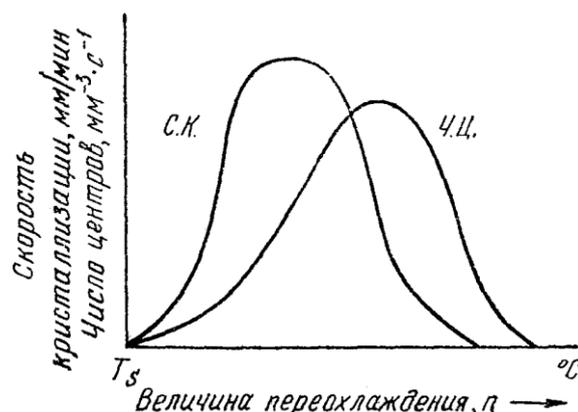


Рис. 1.3. Скорость роста кристаллов (с. к.) и скорость зарождения центров кристаллизации (ч. ц.) в зависимости от степени переохлаждения

При температуре плавления переохлаждение равно нулю и процесс кристаллизации не идет. С увеличением переохлаждения процесс кристаллизации вначале ускоряется, число центров и скорость роста возрастает, достигая максимума; затем вследствие столкновения растущих кристаллов и их срастания скорость роста замедляется. Таким образом, изменением переохлаждения (скорости охлаждения) можно управлять степенью зернистости сталей в твердом состоянии. Для получения мелкозернистых сталей надо выбрать такие переохлаждения (скорости охлаждения), при которых образуется много центров кристаллизации при сравнительно малых скоростях роста.

1.3. Образование твердых растворов

Расплавленные металлы представляют собой однородные жидкости – жидкие растворы. При переходе в твердое состояние во многих сталях однородность сохраняется. Образующиеся в результате кристаллизации однофазные состояния называются твердыми растворами. Твердые растворы образуются в соответствии с общими физико-химическими закономерностями. Они состоят из одного вида кристаллов, имеют одну кристаллическую решетку; они существуют в интервале концентрации и характеризуются беспорядочным размещением атомов растворенного компонента в решетке растворителя.

Если атомы растворимого компонента частично замещают атомы растворителя, то образующийся твердый раствор называется твердым раствором замещения. Если же атомы растворимого располагаются между атомами растворителя, то образующийся раствор называется твердым раствором внедрения, рис. 1.4.

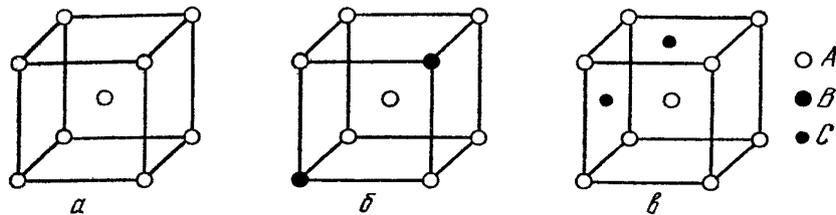


Рис. 1.4. Кристаллическая решетка о.ц.к.: *a* – чистый металл; *b* – твердый раствор замещения; *c* – твердый раствор внедрения

Изменение же параметров кристаллической решетки имеет определяющее влияние на изменение свойств. Относительное изменение свойств при образовании твердых растворов пропорционально относительному изменению параметров решетки. При одновременном легировании атомами нескольких элементов их влияние может быть просуммировано:

$$\Delta \sigma_T = \sum_{i=1}^n K_i C_i,$$

где K_i – коэффициент упрочнения (по пределу текучести).

Указанный коэффициент упрочнения для наиболее часто применяемых легирующих элементов имеет следующие значения:

Химические элементы	Si	Ti	Al	Cu	Mn	Ni
K_i	85	80	60	40	35	30

Изменение свойств металлов при растворении в них химических элементов называют твердорастворным (растворным) упрочнением.

1.4. Превращение в металлах в твердом состоянии

1.4.1. Полиморфные превращения

Некоторые металлы при понижении температуры после затвердевания меняют кристаллическую решетку. Например, у железа и титана в различных температурных интервалах существуют различные кристаллические формы (модификации). Образующиеся формы обозначаются буквами греческого алфавита α , β , γ . Так, железо при температуре ниже $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ существует в форме α -Fe с ОЦК решеткой; при более высокой температуре до $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в форме γ -Fe с ГЦК решеткой; при дальнейшем нагреве эта модификация превращается в высокотемпературную с ОЦК решеткой, которая обозначается δ -Fe.

При полиморфных превращениях изменяется микроструктура металлов; образуются новые зерна, отличающиеся по форме и размерам от зерен исходной фазы (фазовая перекристаллизация). Число центров и скорость роста кристаллов при этом в значительно большей степени, чем при кристаллизации из жидкого состояния, зависит от переохлаждения.

В ходе превращения возникает множество мелких частиц новой фазы, и скачкообразно изменяются все свойства. Наличие полиморфных превращений в металлах является физической основой получения различных структурных состояний при термической обработке сталей (структурное упрочнение).

1.4.2. Дисперсионное твердение

Дисперсионным твердением называют повышение твердости (прочности) металлов вследствие распада пересыщенного твердого раствора с выделением большого числа дисперсных частиц легирующих компонентов. Состояние пересыщения твердого раствора достигается быстрым охлаждением от температуры существования твердого раствора. Распад твердого раствора происходит в области температур устойчивого гетерогенного состояния (рис. 1.5). В некоторых случаях изменение свойств может происходить во времени при атмосферных условиях (естественное старение); чаще всего, однако, твердение происходит при повышенных температурах (искусственное старение или дисперсионное твердение).

Дисперсионное твердение, таким образом, является одним из возможных видов упрочняющей обработки металлов и сплавов (дисперсионное упрочнение); упрочнение возможно и при искусственном введении высокодисперсных частиц (дисперсное твердение).

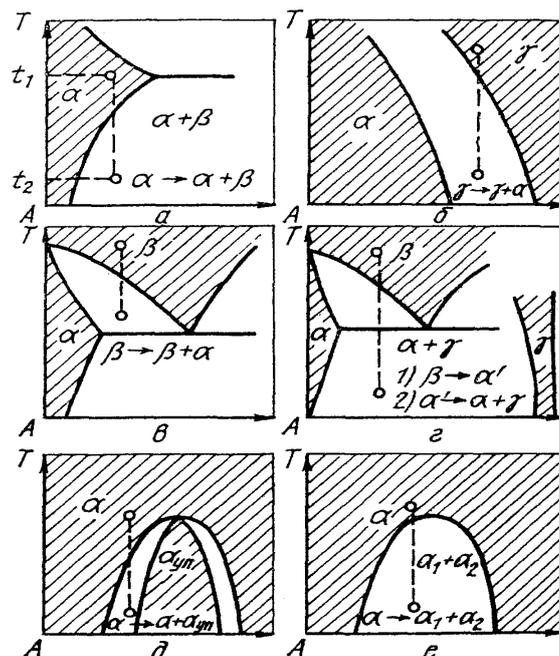


Рис. 1.5. Диаграммы равновесия для сплавов, в которых происходят процессы выделения: *a* – уменьшение растворимости компонента *B* в металле *A*; *b* – сужение области гомогенности промежуточной фазы; *в, г* – металл-растворитель претерпевает полиморфное превращение; *д* – упорядочение в сплаве нестехиометрического состава; *е* – расслоение твердого раствора

1.5. Пластическая деформация металлов

Пластическая деформация – это деформация, остающаяся после снятия нагрузки. При пластической деформации одна часть кристалла сдвигается относительно другой; после снятия нагрузки смещенная часть кристалла на прежнее место не возвращается.

Пластическая деформация сопровождается дроблением блоков мозаики внутри зерен, меняется их форма и расположение в пространстве.

Наличие дислокаций в металлах снижает их прочность вначале; при увеличении же плотности дислокации до определенной величины прочность начинает повышаться, поскольку они начинают мешать перемещению друг относительно друга.

Таким образом, пластическая деформация (наклеп) помимо изменения зерен, вызывает искажение кристаллической решетки, затрудняет движение дислокации и, как следствие этого, вызывает упрочнение металлов (деформационное упрочнение).

В этой связи напомним, что легирование стали сопровождается появлением несовершенств в кристаллических решетках; при образовании твердых растворов это также обуславливает упрочнение, которое называется твердорастворным или просто растворным упрочнением.

1.6. Физические основы упрочнения сталей при легировании

Легирование сталей оказывает значительное влияние на их свойства. Применительно к конструкционным сталям наибольший интерес представляет влияние на сопротивление деформированию (упрочнение сталей).

Различают следующие виды упрочнения сталей и сплавов.

1. Структурное упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{п}}$) – определяется степенью дисперсности и содержанием перлитной составляющей; инициируется термической обработкой.

2. Твердорастворное (растворное) упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{тр}}$) – определяется концентрацией легирующих элементов в твердом растворе; инициируется введением растворимых в феррите легирующих элементов.

3. Дисперсионное упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{ду}}$) – определяется наличием дисперсных частиц карбидов и нитридов (расстоянием между ними); инициируется введением в сталь легирующих элементов с ограниченной растворимостью с последующей термической обработкой на старение.

4. Зернограничное упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{зг}}$) – определяется зернистостью структуры сталей (действительным размером зерна феррита); инициируется измельчением зерна аустенита.

5. Деформационное упрочнение ($\Delta\sigma_{\text{д}}$) – определяется наклепом при холодной пластической деформации нестабильного аустенита (НТМО) и частичной рекристаллизацией при охлаждении (ВТМО).

Влияние каждого из механизмов упрочнения можно оценить по существующим аналитическим зависимостям [1]; совместное же влияние аддитивно и может быть оценено как сумма:

$$\sigma_{\text{т}} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{п}} + \Delta\sigma_{\text{тр}} + \Delta\sigma_{\text{ду}} + \Delta\sigma_{\text{зг}} + \Delta\sigma_{\text{д}},$$

где: σ_0 – напряжение трения решетки,

α – железа.

Практически же воздействие всех видов упрочнения оценивается экспериментально с определением прочностных характеристик.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

2.1. Классификация

Классификация сталей – это упорядочение информации по их назначению и эксплуатационным характеристикам.

Существуют различные признаки классификации; остановимся на получивших наибольшее распространение.

1. По химическому составу стали и сплавы черных металлов подразделяются на низколегированные, легированные и высоколегированные.

В низколегированных сталях суммарное содержание легирующих элементов не превышает 2,5 %, в легированных – от 2,5 до 10 %, в высоколегированных – более 10 %; содержание железа при этом во всех случаях не менее 45 %.

В зависимости от наличия тех или иных легирующих элементов стали называются хромистыми, марганцовистыми, никелевыми и др., а также – хромоникелевыми, хромокремнистыми и т. п. сталями.

2. По качеству все стали разделяются на категории в зависимости от содержания вредных примесей в процентах:

Показатель качества стали	P	S
Обыкновенного качества	0,040	0,050
Качественные	0,035	0,035
Высококачественные	0,025	0,025
Особовысококачественные	0,025	0,015

3. По назначению¹ все стали подразделяются на:

– конструкционные – для изготовления деталей машин, механизмов и конструкций в машиностроении;

– инструментальные – для обработки материалов резанием или давлением.

4. По структуре в равновесном состоянии стали могут быть доэвтектоидными, эвтектоидными и заэвтектоидными; по структуре, получаемой при охлаждении на воздухе – перлитные, мартенситные, аустенитные и ферритные.

2.2. Маркировка

Напомним, что конструкционные углеродистые стали обозначаются числом из двух цифр, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, стали 08, 10, 20, содержащие 0,08; 1,0; 0,20 % углерода. Инструментальные же углеродистые стали обозначаются буквой У и

¹Более подробно о классификации по назначению (применению) см. п. 7.

цифрами, указывающими среднее содержание углерода в десятых долях процента, например, стали У8, У10, У12 содержат в среднем 0,8; 1,0 и 1,2 % углерода.

Марочные обозначения во всех легированных сталях начинается с указания содержания углерода, подобно тому, как это делается в углеродистых сталях. Легирующие же элементы обозначаются буквами: Н – никель, Х – хром, М – молибден, В – вольфрам, К – кобальт, Т – титан, Ц – цирконий, Ф – ванадий, Ю – алюминий, Г – марганец, Б – ниобий, Д – медь, П – фосфор, Р – бор, Е – селен. После буквы указывается среднее содержание соответствующего элемента с округлением до целого числа; содержание технологических примесей не указывается. Например, конструкционная сталь 45ХН2МФ содержит: 0,42–0,50 % С; 0,8–1,0 % Cr; 1,3–1,8 % Ni; 0,2–0,3 % Мо и 0,10–0,18 % V.

Инструментальная же сталь (штамповая) 4Х5МФС содержит: 0,32–0,40 % С; 4,5–5,5 % Cr; 1,2–1,5 % Мо; 0,3–0,5 % V; 0,8–1,2 % Si.

Если в инструментальных сталях содержание углерода 1 % и более, то цифра (число) в начале марочного обозначения не указывается. Например, стали марок Х; ХВГ; Х12 содержат около 1 % углерода.

Если буква А стоит в конце марки, то это означает, что сталь относится к категории высококачественных (30ХГСА); если также буква указана в середине марки, то это означает легированность азотом (16Г2АФ) и, наконец, если буква А указывается в начале марки, то это означает ее принадлежность к группе автоматных сталей с повышенной обрабатываемостью резанием (А35Г2).

Особо высококачественные конструкционные легированные стали обозначаются добавлением к марочному обозначению буквы Ш через дефис (30ХГС-Ш).

Однако в интересах сокращения числа знаков в марочном обозначении допускаются некоторые отступления от изложенной схемы обозначения:

1. В инструментальных сталях содержащих углерода 1 % и более, цифра в обозначении марки не указывается (Х, ХГ, ХВГ).

2. Наличие буквы М в марочном обозначении конструкционных сталей означает ее содержание 0,2–0,3 % молибдена, вводимого в сталь для устранения отпускной хрупкости.

3. Многознаковые марочные обозначения иногда заменяются упрощенными, например, сталь 18Х2Н4МА на практике часто называется сталью 18ХНМА.

Кроме того, существуют условные обозначения некоторых групп легированных специальных сталей:

Р – быстрорежущие стали;

Ш – шарикоподшипниковые стали;

Е – магнитные стали;

Э – электротехнические стали.

В марочных обозначениях этих сталей указывается лишь название и содержание основного элемента.

Марочное обозначение быстрорежущей стали начинается с буквы Р, за которой следует цифра (число), указывающая содержание вольфрама; вместе с тем в них содержится 4 % хрома и от 1 до 5 % ванадия. В марках быстрорежущей стали не указывается содержание углерода; оно всегда близко к единице. В качестве примера приведем содержание легирующих элементов быстрорежущей стали Р18: 0,7–0,8 % С; 3,8–4,4 % Cr; 17–18 % W, 1,0–1,4 % V.

На практике варианты сталей сложного состава часто обозначают условными индексами ЭИ или ЭП. Например, ЭП658.

Марочные обозначения сплавов формируются из названий всех химических элементов с указанием содержания базового (сплавообразующего) элемента. Так, сплав ХН35ВТ (ЭИ612) содержит 35 % никеля, 10–16 % хрома, 2,5–2,8 % вольфрама, 1,0–1,8 % титана.

3. ОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ

3.1. Карбиды и нитриды

Карбиды и нитриды являются важными структурными составляющими в сталях; их поведение во многом определяет свойства сталей.

Карбиды и нитриды образуются между d-переходными металлами, углеродом и азотом соответственно.

Образующиеся фазы сохраняют металлический характер связи. Прочность связи (силы межатомного взаимодействия) в них определяется соотношением s- и d-электронных оболочек; количественно она характеризуется стандартным значением величины свободной энергии ΔG_{298} .

По родству карбидов и нитридов к углероду и азоту, прочности и стойкости переходные металлы располагаются в следующем возрастающем порядке: Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Ta, Ti, Zr, Hf; все они характеризуются высокими температурами плавления и большой твердостью.

Наиболее значительными характеристиками указанных свойств обладают карбиды металлов IV и V переходных групп TiC, ZrC, HfC, VC, TaC; они характеризуются простой кристаллической решеткой ГЦК типа NaCl.

У карбидов и нитридов VI группы Cr_7C_3 , Mo_2C , WC, W_2C преобладают гексагональные решетки; карбид же $Cr_{23}C_6$ и карбиды элементов VII и VIII групп Mn_3C , $Mn_{23}C_6$, Fe_3C имеют сложные границентрированные и ромбические решетки.

Как видим, по мере продвижения элементов в периодической системе слева направо наблюдается тенденция к усложнению решетки и многообразию форм карбидов.

Карбиды IV и V групп не имеют строгого стехиметрического состава и характеризуются формулой MeC_x ($x \leq 1$), например, VC_{0,96-0,75}, NbC_{1-0,7}, в частности V_4C_3 и Nb_4C_3 соответственно.

Почти все монокарбиды и мононитриды вследствие однотипности связи и наличия в решетках вакансий образуют многокомпонентные твердые растворы (комплексные фазы), например, (V, Nb) (C, N) или (V, Nb, Ti) (C, N).

Переходные металлы VI–VII групп, как уже указывалось, образуют 2–3 карбида сложной кристаллической структуры; возможно также образование сложных карбидов, содержащих два или несколько элементов.

Карбиды железа менее стойкие по сравнению с карбидами легирующих элементов; основным из них является цементит Fe_3C со сложной ромбической решеткой с хорошим структурным соответствием γ -Fe; промежуточным карбидам в сталях является ϵ -карбид $Fe_{2-3}C$ со сложной гексагональной решеткой, лучше сопряженной с решеткой мартенсита, чем цементита; в высокоуглеродистых же сталях ($C > 0,6\%$) могут образовываться промежуточные карбиды: η -карбид (Fe_2C) и χ -карбид (Fe_5C_2). Атомы железа в этих карбидах могут замещаться атомами Mn и Cr.

Нитриды железа образуются в сталях при легировании их азотом; они могут выделяться также при старении обычных сталей, содержащих остаточный азот $\sim 0,010$ %. В сталях могут образовываться в основном два нитрида Fe_4N (γ' – фаза) и $Fe_{16}N_{1-2}$ (α'' – фаза).

В общем виде данные о карбидах и нитридах, образующихся в сталях и сплавах, приведены в табл. 3.1.

3.2. Интерметаллические соединения

Интерметаллические (электронные) соединения – это фазы, образующиеся в сталях при взаимодействии основного компонента с легирующими элементами или легирующими элементами между собой. Структура этих фаз определяется электронной концентрацией (отношением числа валентных электронов к числу атомов). Они характеризуются новой кристаллической решеткой и обладают металлическими свойствами.

Таблица 3.1

Карбиды и нитриды металлов различных групп периодической системы элементов

Виды химических соединений			Формулы химических соединений		
Карбиды	Нитриды	Карбонитриды	Карбиды	Нитриды	Карбонитриды
IV и V группы (T_i ; N_b ; V ; Z_r ; H_f ; T_a)					
TiC; NbC	TiN		MeC		
Nb ₄ C ₃	NbN		MeC _x		
VI группа (Cr; Mo; W)					
Cr ₇ C ₃ ; Cr ₂₃ C ₆	CrN	Cr ₇ (CN) ₃	Me ₇ C ₃	MeN	Me ₇ (C,N) ₃
(Cr; Fe) ₇ C ₃			Me ₂₃ C ₆		
MoC; WC	MoN		MeC	MeN	Fe ₂ W ₄ C
Mo ₂ C; W ₂ C	WN		Me ₂ C	Me ₂ N	
Mo ₆ C			Me ₆ C		
VII и VIII группы (Fe, Mn)					
Fe ₃ C	Fe ₄ N		Me ₃ C	MeN	(Fe, Mn ₃)C
Mn ₃ C	Fe ₁₆ N ₁₋₂				Fe _x
	MnN				

В сталях и сплавах различают следующие группы электронных соединений: сигма-фазы, фазы Лавеса и геометрические плотноупакованные фазы.

Сигма-фазы образуются переходными металлами; они имеют сложные кристаллические решетки, которые характеризуются наличием плотноупакованных слоев атомов. Для них невозможно установить определенный состав; характерным является лишь определенное значение электронной концентрации 6,5–7,4.

В сталях и сплавах наряду с сигма-фазами простого состава типа Fe-Cr встречаются и более сложные композиции. В жаропрочных сплавах, например, они имеют состав $(Cr,Mo)_x$, $(Ni,Co)_y$, где x и y могут изменяться от 1 до 7.

Помимо сигма-фаз в сталях встречаются более сложные фазы с определенной электронной концентрацией. Во всех случаях присутствие их в структуре стали вредно сказывается на их свойствах.

Фазы Лавеса – это соединения типа A_2B с кубической или гексагональной решетками. Они могут образовываться в любом месте периодической системы, если выдерживается указанное стехиометрическое соотношение. Наиболее часто образуются соединения: Fe_2Al , Fe_2Mo , Ni_2Ta или $(Fe, Si)_2Mo$.

Присутствие этих фаз сопровождается охрупчиванием сталей при комнатной температуре; вместе с тем, они менее опасны при повышенных температурах.

Геометрически плотноупакованные фазы – это соединения типа A_3B . Они образуются в результате упорядочения твердых растворов с ГЦК (γ'), ОЦК (γ'') решетками.

Эффект выделения этих фаз используется в жаропрочных сталях и сплавах в качестве фактора упрочнения при повышенных температурах. При этом элементами A могут быть: Fe, Co, Ni, а элементами B – Al, Ti, Nb. Основными упрочнителями являются соединения вида Ni_3Ti , в составе которого могут быть и другие элементы.

На практике встречаются и другие интерметаллические соединения с высокой прочностью, в том числе при высоких температурах; на их основе в настоящее время разрабатываются высокопрочные материалы для новой техники.

4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛЕГИРОВАНИЯ

Теория легирования сталей является составной частью теории термической обработки металлов и сплавов, которая изучается как самостоятельная учебная дисциплина, поэтому остановимся лишь на некоторых аспектах влияния легирующих элементов на свойства сталей, на процессы их превращения при нагреве и охлаждении.

4.1. Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа

Наличие полиморфных превращений в железе является физической основой упрочняющих видов термической обработки сталей и сплавов. Все элементы, растворяющиеся в железе, оказывают влияние на температурный интервал существования полиморфных составляющих (модификаций) (рис. 4.1).

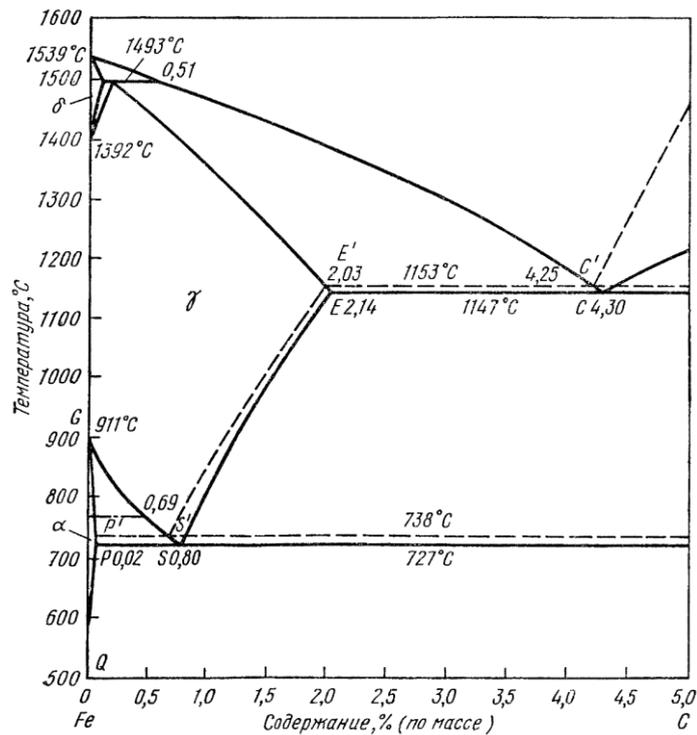


Рис. 4.1. Диаграмма состояния системы Fe-C

По характеру своего влияния легирующие элементы разделяются на два больших класса.

1. Легирующие элементы, расширяющие γ -область (понижающие точку A_3 и повышающие точку A_4) (рис. 4.2, а).

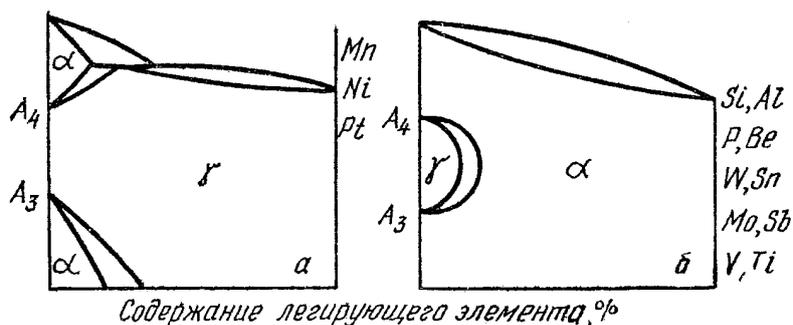


Рис. 4.2. Схема диаграмм состояний железо – легирующий элемент

2. Легирующие элементы, суживающие (выклинивающие) γ -область (повышающие точку A_3 и понижающие точку A_4) (рис. 4.2, б).

Помимо двух основных существуют и промежуточные классы с ограниченной растворимостью легирующих элементов в γ -области. Типичным представителем такого класса является система железо–углерод.

Характер влияния легирующих элементов на полиморфизм определяется общими физико-химическими закономерностями взаимной растворимости элементов: изоморфность, различие атомных радиусов, энергия меж-атомного взаимодействия.

Легирующие элементы, имеющие решетку изоморфную решетке γ -Fe и малоразличающиеся по атомному радиусу, расширяют γ -область; при определенном содержании точка A_3 снижается настолько, что полиморфное превращение исчезает и в сталях сохраняется γ -область вплоть до комнатной температуры. Такие стали называются аустенитными, а элементы аустенитообразующими (Mn, Ni, Co).

Легирующие же элементы, имеющие решетку подобную α -Fe и обладающие близкими с ним атомными радиусами, при содержании выше определенного предела полностью предотвращают полиморфные превращения. Образующиеся при этом стали называются ферритными, а легирующие элементы – ферритообразующими (Si, W, Mo, V, Ti).

С диаграммами состояния по многим системам железо-легирующий элемент можно ознакомиться в специальной литературе (см. [6]).

4.2. Влияние легирующих элементов на критические точки

Легирующие элементы смещают положение критических точек сталей, поскольку влияют на фазовые α - γ превращения и на растворимость углерода в феррите (диссоциацию карбидов).

Карбидообразующие элементы, как правило, сильно повышают, а некарбидообразующие элементы несколько снижают точку A_{c1} (рис. 4.3). Эта закономерность в основном сохраняется и в сталях, легированных несколькими элементами.

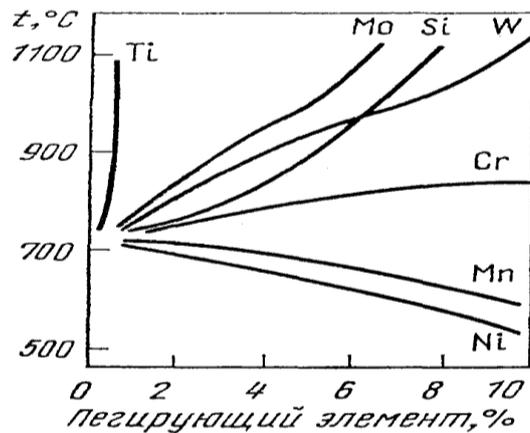


Рис. 4.3. Влияние легирования на положение точки A_{c1} в стали

Одновременно меняется положение эвтектоидной точки S. Некарбидообразующие элементы, замещая часть атомов железа в феррите, смещают точку S в сторону меньшего содержания углерода (рис. 4.4). Аналогично влияют и растворяющиеся в феррите карбидообразующие элементы (Mn, Cr); молибден и вольфрам сначала уменьшают, а затем увеличивают содержание углерода в эвтектоиде.

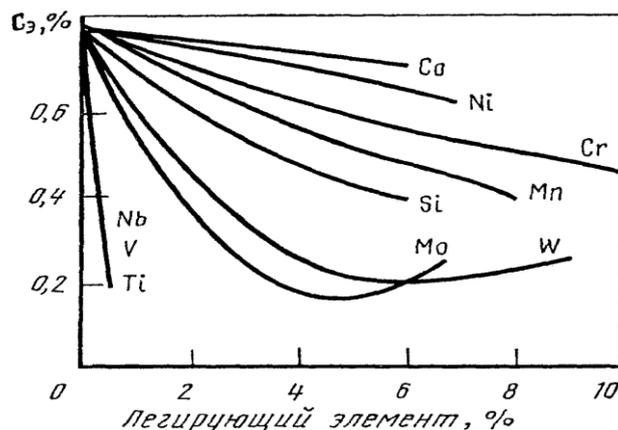


Рис. 4.4. Влияние легирования на содержание углерода в эвтектоиде (C_3)

4.3. Распределение легирующих элементов в сталях

В легирующие элементы в сталях, являющихся многокомпонентными системами, могут находиться в виде:

- твердых растворов в железе;
- карбидов и нитридов;
- интерметаллических соединений;
- окислов, сульфидов и других неметаллических включений;
- в свободном состоянии как составляющие механической смеси с основными фазами.

Наибольшее практическое значение имеют первые три вида взаимодействия; окислы, сульфиды и другие неметаллические включения имеются

в сталях в количествах, обусловленных способом выплавки. В свободном состоянии в них могут находиться лишь свинец и медь; свинец вводится для улучшения обрабатываемости резанием (автоматные стали).

4.4. Влияние легирующих элементов на свойства твердых растворов

Растворившиеся в железе легирующие элементы образуют однофазные структурные составляющие – феррит и аустенит.

4.4.1. Влияние легирующих элементов на свойства феррита

Феррит во многих сталях является одной из основных фазовых составляющих; изменение его свойств в значительной мере влияет на свойства сталей. При введении в железо легирующих элементов происходит частичное замещение атомов железа атомами вводимых элементов. Вследствие различия в размерах и строении возникают напряжения, изменяется период кристаллической решетки. В первом приближении эти изменения пропорциональны концентрации растворившегося компонента (рис. 4.5).

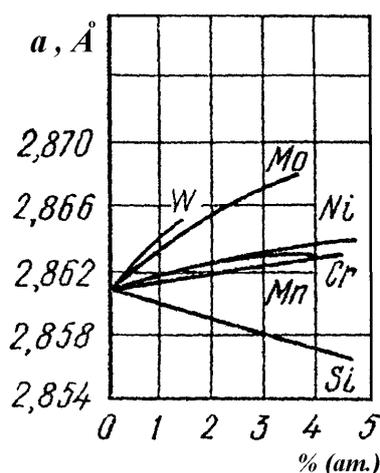


Рис. 4.5. Параметр твердых растворов (замещения), образующихся при растворении различных элементов в железе

Искажение решетки и возникновение напряжений, как указывалось ранее, вызывают упрочнение пропорционально относительному изменению периоду решетки. Характеристики прочности при этом повышаются, а пластичности и вязкости – понижаются (рис. 4.6).

Как видно, в большей мере упрочняют феррит кремний, марганец, никель; в значительно меньшей степени – молибден, вольфрам и хром (твердорастворное упрочнение).

Важное значение имеет и влияние легирующих элементов на порог хладноломкости; только один из легирующих элементов – никель – понижает порог хладноломкости (рис. 4.7); остальные легирующие элементы его повышают.

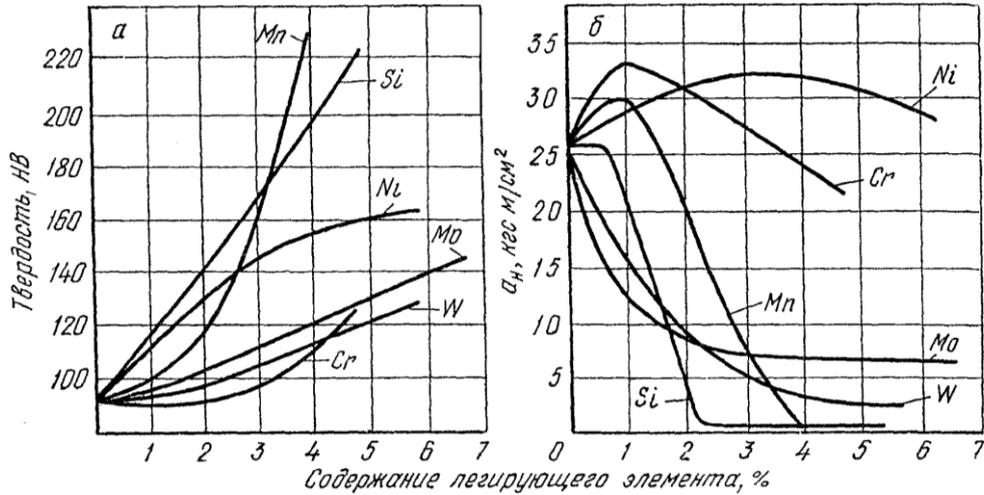


Рис. 4.6. Влияние легирующих элементов на свойства феррита (автор):
а – твердость; б – ударная вязкость

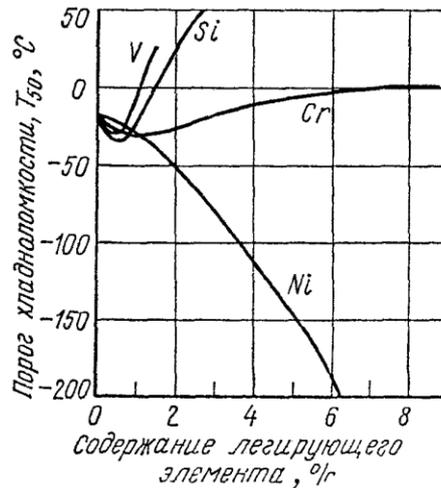


Рис. 4.7. Влияние легирующих элементов на порог хладноломкости железа

Таким образом, из шести наиболее распространенных легирующих элементов особенно ценным является никель; интенсивно упрочняя феррит, он не снижает вязкости и понижает порог хладноломкости сталей.

Прочность феррита зависит также от величины зерна; эта зависимость определяется соотношением Холла-Петча:

$$\sigma_{0.2} = \sigma_i + k_y d^{-1/2},$$

где σ_i – предел текучести монокристалла; k_y – коэффициент, характеризующий влияние границ зерна.

Упрочнение, обусловленное измельчением зерна, наблюдается во всех сталях и называется зернограницным упрочнением.

4.4.2. Влияние легирующих элементов на свойства аустенита

Аустенит в сталях может быть нестабильным и стабильным. Первый существует при температуре выше начала мартенситных превращений (точка M_n); он способен к фазовым превращениям с образованием мартенсита. Стабильный аустенит не претерпевает фазовых превращений, что обуславливается набором легирующих элементов и их количеством.

Здесь будем рассматривать влияние легирующих элементов на свойства стабильного аустенита; фазовые же превращения в нестабильном аустените будут рассмотрены позже (см. п. 5).

Поведение аустенита в сталях обуславливается общими закономерностями, присущими влиянию легирующих элементов на свойства твердых растворов, которые были проиллюстрированы при характеристике свойств феррита; естественно, что при этом изменяются и свойства сталей.

Эффект влияния легирующих элементов различен; наибольший вклад в упрочнение аустенита вносят элементы, образующие фазы внедрения, особенно азот. Главными аустенитообразующими элементами являются марганец и никель; полученный с их использованием аустенит называют марганцевым (Г 38) и никелевым (Н 36) соответственно.

5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

5.1. Влияние легирующих элементов на превращения в сталях при нагреве

При нагреве стали до аустенитного состояния в ней происходят:

- $\alpha - \gamma$ превращения;
- растворение цементита и специальных карбидов, нитридов и интерметаллидов;
- рекристаллизация аустенита.

5.1.1. Перекристаллизация стали

Механизм $\alpha - \gamma$ превращения с образованием аустенита при нагреве стали зависит от степени упорядочения ее исходной структуры.

При исходной структуре в виде феррито – карбидной смеси реализуется неупорядоченный механизм, а при исходной структуре мартенсита и бейнита – упорядоченный механизм превращения.

В первом, наиболее характерном для практики случае, происходит изменение величины и ориентации образовавшейся γ -фазы по отношению к исходной α -фазе (рис. 5.1).

При переходе через критическую точку образуются мелкие зерна аустенита; процесс фазовой перекристаллизации при этом совпадает с рекристаллизацией наклепанного при фазовом переходе аустенита; дальнейший нагрев будет приводить к росту зерна.

Во втором случае, при определенных условиях, сталь теряет способность к перекристаллизации при $\alpha \rightarrow \gamma$ превращениях с образованием мелкого зерна; нагрев выше точки A_{c3} будет вызывать образование зерен аустенита той же формы и размера, что и исходное зерно стали (рис. 5.2).

Такое восстановление исходного зерна называют структурной наследственностью (В.Д. Садовский); она наблюдается лишь при повышенной степени легированности стали и определенных скоростях повторного нагрева; чем более легирована сталь, тем шире диапазон скоростей нагрева, при которых появляется структурная наследственность.

При быстром (сотни градусов в секунду) нагреве закаленной и неотпущенной стали реализуется упорядоченный механизм образования аустенита, сходный с обратным мартенситным превращением; в результате происходит восстановление зерна исходной структуры.

При нагреве до более высоких температур, выше температуры рекристаллизации, происходит измельчение зерна аустенита.

Структурная наследственность проявляется на конструкционных сталях типа 37ХН3А, 20Х2Н4А; однако более вероятно ее появление при термической обработке высоколегированных быстрорежущих и мартенситно-стареющих сталей.

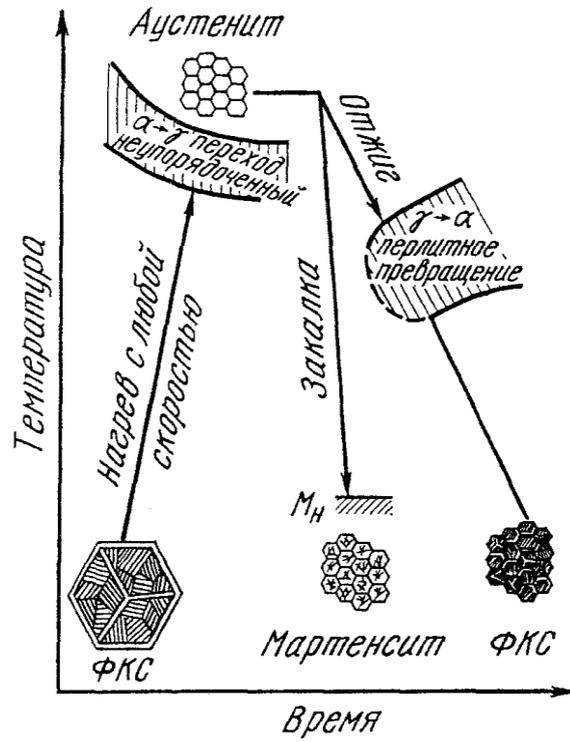


Рис. 5.1. Схема перекристаллизации стали с исходной неупрочненной структурой при нагреве и охлаждении

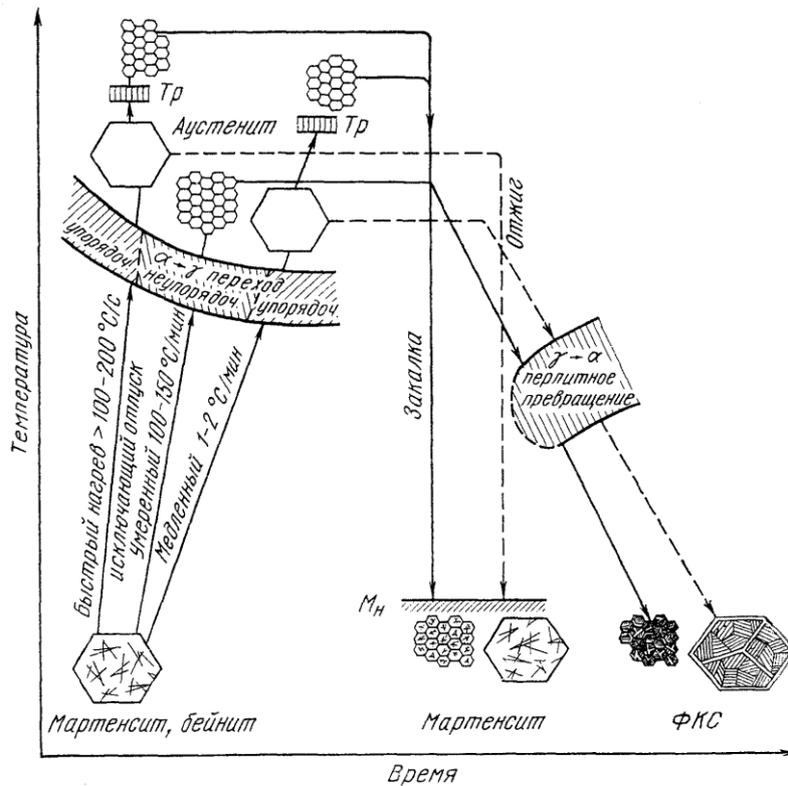


Рис. 5.2. Схема перекристаллизации стали с исходной упорядоченной структурой при нагреве и охлаждении

5.1.2. Растворение карбидов и нитридов в аустените

Растворение карбидов и нитридов при термической обработке существенно влияет на многие свойства сталей (прокаливаемость, разупрочнение при отпуске и др.).

Термодинамические условия равновесия карбидов и нитридов в аустените определяются произведением растворимости:

$$\ln N_{\text{Me}} N_x^n = \Delta G_{\text{MeX}} / \ln \gamma_{\text{Me}} \gamma_x^n, \quad (1)$$

где N_{Me} и N_x – мольные доли легирующего элемента и углерода соответственно; ΔG_{MeX} – свободная энергия образования соединения; γ_{Me} и γ_x – коэффициенты термодинамической активности компонентов.

Для слабых растворов (низколегированные стали) можно использовать произведение растворимости в виде:

$$\log L_{\text{MeX}_n} = \log[\text{Me}][\text{X}] = -Q/T + C, \quad (2)$$

где L_{MeX_n} – произведение растворимости (константа равновесия); $[\text{Me}][\text{X}]$ – концентрация в аустените (по массе); Q , T и C – постоянные характеризующие карбиды (нитриды) и стали.

По наиболее характерным для сталей, карбидам и нитридам такие зависимости известны (см. 1). В качестве примера приведем уравнение, характеризующее равновесие карбида титана:

$$[\text{Ti C}][\text{C}] = -10475 / T + 5,33. \quad (3)$$

Построенные по ним кривые равновесия приведены на рис. 5.3. С использованием этих зависимостей обычно и решаются практически вопросы назначения режимов термической обработки.

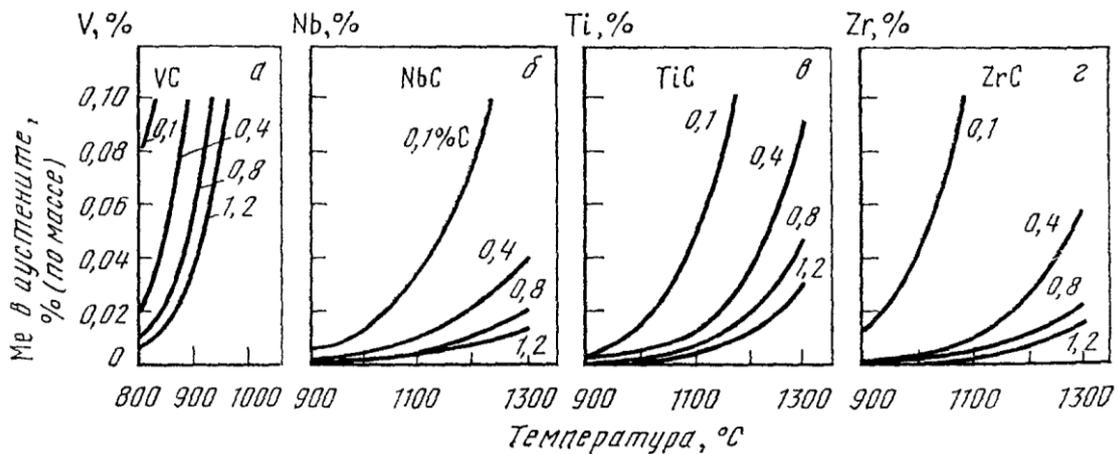


Рис. 5.3. Растворимость карбидов ванадия (а), ниобия (б), титана (в), циркония (г) в аустените при разных температурах в зависимости от содержания углерода (указано в % кривых) в стали.

5.1.3. Рост зерна аустенита

С повышением температуры нагрева стали и увеличением времени выдержки в аустенитной области происходит рост зерна аустенита, по-

сколько это сопровождается уменьшением протяженности границ зерен (понижением поверхностной энергии).

На практике нередко возникает необходимость получения мелкого зерна аустенита, обеспечивающего высокое сопротивление хрупкому разрушению (высокопрочные стали). Карбиды и нитриды легирующих элементов тормозят рост зерна аустенита, поскольку являются готовыми центрами кристаллизации. Сдерживающее влияние частиц карбидов и нитридов на рост зерна аустенита называют барьерным действием.

Таким образом, чем больше объемная доля нерастворенных частиц сохраняется в стали при нагреве и чем меньше их размеры, тем более мелкозернистым будет аустенит; при легировании стали двумя и более карбидо- или нитридообразующими элементами барьерное действие усиливается.

Обратим внимание, что углерод, азот и алюминий, несвязанные в карбиды и нитриды, будучи в твердом растворе, способствуют росту зерна; склонность к росту зерна усиливается также при легировании стали бором, марганцем и кремнием.

5.2. Превращения в легированных сталях при охлаждении

5.2.1. Влияние легирующих элементов на устойчивость переохлажденного аустенита

При охлаждении стали в определенном интервале температур аустенит теряет устойчивость. Особенности распада переохлажденного аустенита, как известно, характеризуются изотермическими (термодинамическими) диаграммами. Напомним вид изотермических диаграмм углеродистых сталей (рис. 5.4).

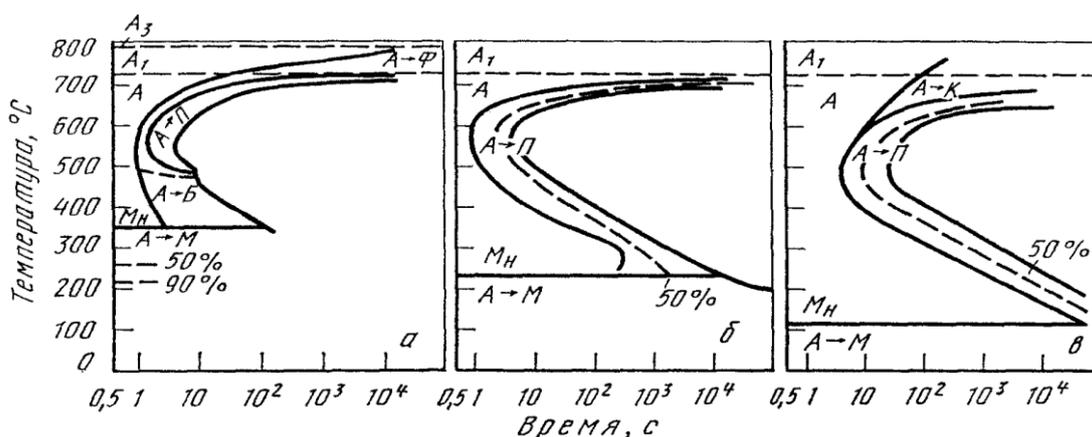


Рис. 5.4. Диаграммы изотермического распада аустенита в углеродистых сталях:
а – доэвтектоидная сталь (0,45 % С); *б* – эвтектоидная сталь (0,8 % С);
в – заэвтектоидная сталь (1,2 % С)

Введение легирующих элементов в сталь (растворение их в аустените) существенно изменяет вид диаграмм и кинетику превращения; разделяют-

ся промежуточные и перлитные превращения с появлением областей устойчивости аустенита (рис. 5.5).

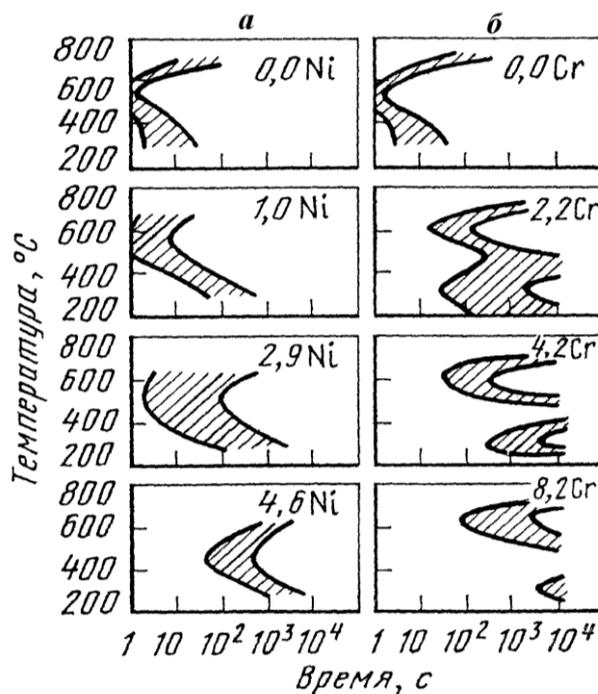


Рис. 5.5. Влияние никеля и хрома на характер диаграмм изотермического распада аустенита стали с 0,5 % С

Как видим, некарбидообразующие элементы, не меняя вид С-диаграмм, смещают их вправо и увеличивают устойчивость аустенита (исключение составляет только кобальт).

Карбидообразующие элементы также увеличивают устойчивость аустенита, но заметно влияют на характер превращения, что естественно сказывается на виде диаграмм.

В области перлитных превращений все легирующие элементы, за исключением кобальта, увеличивают устойчивость аустенита, особенно эффективно в этом плане влияние молибдена и марганца, несколько меньше – хрома и никеля.

В промежуточной области наиболее сильно увеличивают устойчивость аустенита углерод и азот.

Все легирующие элементы увеличивают инкубационный период и количество остаточного аустенита, однако полного распада не происходит.

Влияние легирующих элементов на устойчивость аустенита не аддитивно, их воздействие не суммируется; в наибольшей степени устойчивость аустенита повышается при одновременном легировании Cr–Ni, Cr–Ni–Mo, Cr–Mn, Cr–Mn–W.

Легирующие элементы сильно влияют на мартенситные превращения, прежде всего, на температуру начала превращения (рис. 5.6). Большинство легирующих элементов понижают эту температуру.

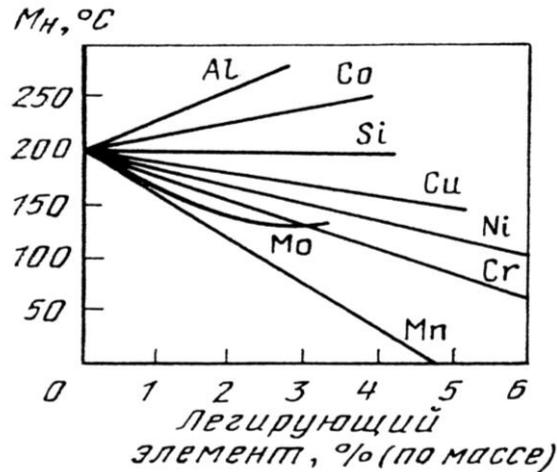


Рис. 5.6. Влияние содержания легирующих элементов на температуру начала мартенситного превращения M_n стали с 0,9 % C

Из карбидообразующих элементов особенно сильно влияет марганец, несколько слабее – хром, ванадий, никель и молибден; кремний и медь в количествах, обычно применяемых в стали, влияют слабо; повышают мартенситную точку лишь кобальт и алюминий.

Элементы, понижающие температуру мартенситного превращения, одновременно увеличивают количество остаточного аустенита (кремний и кобальт его уменьшают).

5.2.2. Перлитные превращения

В легированных сталях перлитное превращение состоит из полиморфного Г.Ц.К. → О.Ц.К. перехода и диффузионного перераспределения углерода и легирующих элементов. В результате образуются специальные карбиды и феррито-цементитная смесь (перлит).

Полиморфный переход в стали происходит уже при малом охлаждении путем неупорядоченного смещения атомов легирующих элементов. Особенно заметно переход замедляется при комплексном легировании (Cr, Ni, Mo). Наличие в стали карбидообразующих элементов обуславливает появление специальных карбидов, тип и форма которых (прерывистые или непрерывистые) зависит от состава аустенита, которые существенно влияют на свойства сталей.

Таким образом, перлитное превращение в легированных сталях определяется скоростями полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и диффузионного перераспределения легирующих элементов; поскольку коэффициенты диффузии карбидообразующих элементов в аустените на 4–5 порядков ниже, чем у углерода, с понижением температуры до 500–600 °C образование специальных карбидов прекращается.

5.2.3. Мартенситные превращения

Мартенситные превращения, развивающиеся при больших степенях переохлаждения, при которых полностью подавляются диффузионные процессы. Поэтому по своему механизму они являются бездиффузионными. Такие превращения свойственны не только сталям, но и безуглеродистым сплавам железа с легирующими элементами. В результате мартенситного превращения образуется пересыщенный твердый раствор на основе α -железа либо с углеродом, либо с легирующими элементами. Оно протекает при условии, что мартенситная точка M_H лежит ниже комнатной температуры. Возможна стабилизация аустенита при выдержке стали в мартенситном интервале температур.

На мартенситные превращения оказывают влияние внешние факторы. Так, деформация аустенита в упругой области при температурах выше точки M_H может приводить к образованию мартенсита; образующуюся при этом структуру называют мартенситом напряжения в отличие от мартенсита, получаемого при деформации в пластической области, которую называют мартенситом деформации.

Верхней температурной границей образования мартенсита деформации является точка M_D ; она всегда ниже температуры, соответствующей равенству свободных энергий аустенита и мартенсита.

Мартенсит, образующийся при непрерывном охлаждении в и интервале мартенситных температур, называют мартенситом охлаждения.

Таким образом, мартенситные превращения заключаются в закономерной скачкообразной перестройке аустенита с Г.Ц.К. в мартенсит с О.Ц.К.; структура мартенсита зависит от температуры превращения, от положения мартенситных точек M_H и M_D .

5.2.4. Промежуточные превращения

Промежуточные (бейнитные) превращения носят черты как диффузионных, так и бездиффузионных превращений. Они характеризуются совмещением диффузионного перераспределения углерода в аустените с бездиффузионными $\alpha - \gamma$ -переходом и образованием карбидов.

Отличительной особенностью – увеличение продолжительности инкубационного периода – неполнота превращения аустенита в изотермических условиях. Получающаяся структура называется бейнитом; различают верхний (перистый) и нижний (игольчатый) бейнит, подобный структуре низкоотпущенного мартенсита. Нижний бейнит имеет хороший комплекс механических свойств.

6. ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЗАКАЛЕННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ ПРИ НАГРЕВЕ (ОТПУСК ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ)

Отпуск легированных сталей, как и углеродистых, является завершающей операцией упрочняющей термической обработки, формирующей свойства сталей в изделии. При отпуске реализуется процессы распада мартенсита с образованием цементита, специальных карбидов и появлением остаточного аустенита.

6.1. Распад мартенсита

На начальной стадии (150–200 °С) распад мартенсита протекает практически также, как в углеродистых сталях.

Карбидообразующие элементы в интервале температур 400–500 °С замедляют распад мартенсита с выделением углерода, что обусловлено увеличением силы связи атомов углерода в более прочных карбидах.

Некарбидообразующие элементы (исключение – Si) и слабый карбидообразующий элемент Mn практически не задерживают выделение углерода из мартенсита. Это означает, что карбиды цементитного типа начинают формироваться при одной и той же температуре ($t_{ц}$), независимо от легирования (рис. 6.1).

Значение этой температуры зависит от карбидообразующей способности элементов, растворенных в мартенсите. Если в мартенсите растворены два карбидообразующих элемента с различной температурой карбидообразования, то обозначается второе интенсивное выделение углерода из мартенсита ($t_{к2}$). Значение этой температуры зависит от состава сталей: для хромистых сталей – 400–500 °С, для ванадиевых и молибденовых – 500–550 °С и для вольфрамовых – 550–600 °С.

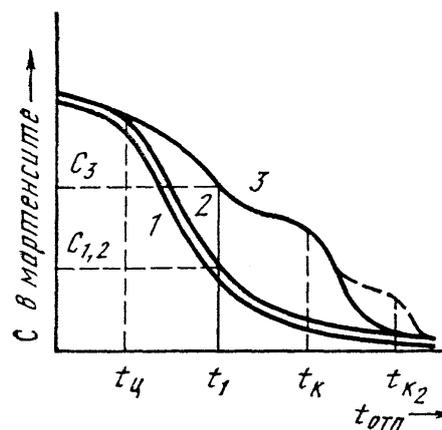


Рис. 6.1. Схема выделения углерода из мартенсита в углеродистых (1), легированных некарбидообразующими элементами, кроме кремния (2) и карбидообразующими элементами (3) сталях (обобщение по литературным данным)

С повышением температуры отпуска, зародившиеся карбиды коагулируют. Так, если в углеродистой стали коагуляция цементита начинается при 350–400 °С, то в легированных сталях с карбидообразующими элементами – при 450–600 °С.

6.2. Распад остаточного аустенита

В закаленных легированных сталях всегда сохраняется заметное количество остаточного аустенита (10–15 % – в конструкционных сталях, 20–40 % – в быстрорежущих сталях, 60–80 % – в высокохромистых инструментальных сталях).

При отпуске остаточный аустенит либо распадается на промежуточные структуры, либо превращается в мартенсит при более глубоком охлаждении. Если в углеродистых сталях остаточный аустенит распадается при температурах отпуска 200–300 °С, то в легированных сталях это происходит в зависимости от степени легирования при 400–600 °С. Превращение аустенита в бейнит происходит практически без инкубационного периода. Появляющийся при отпуске бейнит по свойствам и структуре близок к продуктам распада мартенсита при соответствующей температуре.

Превращению остаточного аустенита в мартенсит в высоколегированных сталях может предшествовать выделение избыточных специальных карбидов, рис. 6.2 (штриховая линия). Иногда для полного превращения остаточного аустенита в мартенсит требуется 2–4 кратный отпуск.

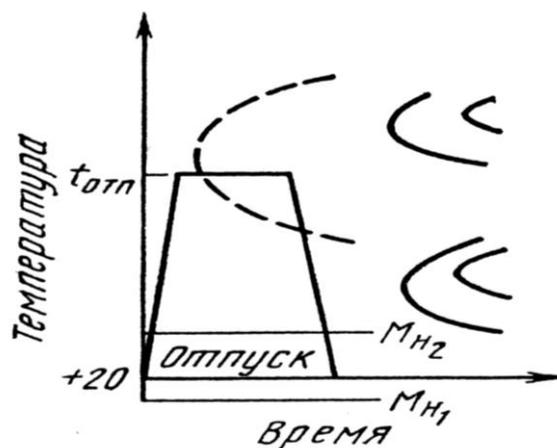


Рис. 6.2. Схема превращения остаточного аустенита в мартенсит в высоколегированных сталях:

$M_{н1}$ – мартенситная точка остаточного аустенита до отпуска;

$M_{н2}$ – то же, после отпуска

Распад остаточного аустенита с повышением твердости называют вторичной закалкой или вторичной твердостью.

6.3. Дисперсионное упрочнение (твердение)

При отпуске закаленных легированных сталей протекают два противоположных по влиянию на свойства стали процесса – разупрочнение вследствие распада мартенсита и упрочнение вследствие выделения специальных карбидов.

Образовавшиеся дисперсные частицы карбидов препятствуют движению дислокаций и повышают прочностные характеристики сталей, рис. 6.3.

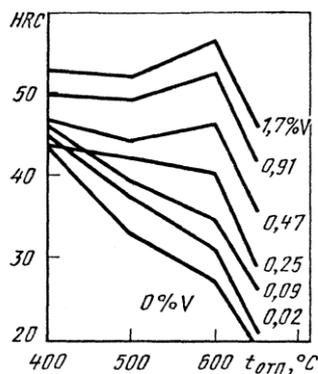


Рис. 6.3. Влияние температуры отпуска на твердость стали 40 с разным содержанием ванадия

С повышением содержания легирующих элементов происходит замедление в изменении прочности (дисперсионное упрочнение); при образовании же большого количества дисперсных частиц наблюдается максимум твердости (дисперсионное твердение).

Такой характер изменения твердости наблюдается в сталях с сильными карбидообразующими элементами (Cr, Mo, W, V, Ti), а также и в сталях, упрочняющими фазами в которых являются нитриды и интерметаллиды.

6.4. Отпускная хрупкость

В некоторых легированных конструкционных сталях после улучшающей термической обработки появляется склонность к хрупкому разрушению (повышению температуры вязко-хрупкого перехода – порога хладноломкости); во многих сталях охрупчивание сопровождается снижением ударной вязкости.

Различают два рода отпускной хрупкости. Отпускная хрупкость I рода (необратимая) проявляется при отпуске около 300 °C. Отпускная хрупкость II рода (обратимая) появляется после отпуска выше 500 °C с последующим медленным охлаждением.

Необратимая отпускная хрупкость в интервале температур 200–400 °C присуща всем сталям; повторный отпуск при более высоких температурах (400–500 °C) ее устраняет, и сталь становится несклонной к хрупкости.

Отпускная же хрупкость II рода может быть устранена повторным высоким отпуском с быстрым охлаждением.

Легирование сталей хромом, никелем, марганцем, особенно хромом и никелем, хромом и марганцем и хромом, марганцем и кремнием усиливает склонность стали к хрупкому разрушению. Введение же в сталь молибдена (0,4–0,5 %) и вольфрама (до 1,2–1,5 %) уменьшает или полностью подавляет склонность сталей к обратимой отпускной хрупкости.

Существуют и другие методы предотвращения обратимой отпускной хрупкости:

- ускоренное охлаждение после отпуска (вода, масло);
- снижение остаточного содержания вредных примесей, особенно фосфора и его аналогов (сурьма, олово и мышьяк);
- применение высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО).

7. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ (МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ)

Качество изделий машиностроения в значительной мере определяется свойствами применяемых сталей и сплавов. Более того, в ряде случаев наличие требуемой стали предопределяет возможность осуществления новых конструктивных решений. Основой же выбора сталей для изделий машиностроения является их классификация [9]. В связи с этим характеристика машиностроительных сталей и сплавов будет дана на основе их классификации; для наглядности и удобства пользования она иллюстрируется иерархическими схемами, приведенными в приложении.

Количественно характеристика свойств легированных сталей дается в соответствующих нормативно-технических документах и содержится в справочниках (см. [10]).

7.1. Стали и сплавы конструкционные (1)²

Конструкционные стали и сплавы, предназначенные для различных металлоконструкций, деталей машин, механизмов, приборов, подвергающихся механическим нагрузкам. Они обеспечивают необходимую жесткость, статистическую и циклическую прочность при различных температурах, а также конструкционную прочность деталей (комплекс механических свойств, гарантирующих успешную работу деталей в условиях эксплуатации).

Механическими свойствами, определяющими конструкционную прочность в зависимости от условий работы, могут быть характеристики прочности (пределы прочности и текучести), упругости (предел упругости), жесткости (модуль упругости), долговечности (предел выносливости, износостойкости), в том числе в условиях эксплуатации (нагрев, среда и др.).

Важными являются также показатели склонности к хрупкому разрушению, предопределяющие появление внезапного разрушения детали в условиях эксплуатации. Склонность сравнительно мягких и малопрочных сталей и сплавов к хрупкому разрушению оценивается характеристиками пластичности (относительное удлинение, сужение площади поперечного сечения) и ударной вязкости (КСУ).

В случае повышенной и особенно высокой прочности (стали с $\sigma_B \geq 1200$ МПа, титановые сплавы с $\sigma_B \geq 800$ МПа и алюминиевые сплавы с $\sigma_B \geq 450$ МПа) оценивается вязкость разрушения – трещиностойкость или сопротивление развитию трещины (коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic}). В качестве оценочных при этом используются также ударная вязкость (КСУ, КСТ) и температурный порог хладноломкости ($\Delta T = T_B - T_H$ или T_{50}).

² В скобках дана индексация сталей и сплавов в соответствии с их классификацией (см. Приложение).

7.1.1. Стали с нормальной, повышенной и высокой прочностью (11)

По уровню прочности, оцениваемой по пределу прочности, стали принято разделять на стали нормальной (средней) прочности (до ~1000 МПа), повышенной прочности (от 1000 до 1500–1800 МПа) и высокопрочные (более 1800 МПа).

Стали углеродистые конструкционные (111)

В эту группу включаются стали обыкновенного качества и качественные стали. Они имеют удовлетворительные механические свойства в сочетании с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением.

Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380–94) (1111)

Стали с нормированным содержанием углерода могут подвергаться термической и химико-термической обработке.

Стали этой подгруппы применяются в основном для изготовления элементов несущих сварных и несварных конструкций и ответственных деталей – болты, гайки, ручки, втулки, цапфы, фланцы, оси, а также деталей, изготавливаемых глубокой вытяжкой.

Стали качественные углеродистые (ГОСТ 1050–88) (1112)

Эти стали подразделяются на:

- низкоуглеродистые (до 0,2 % С) малопрочные и высокопластичные стали. В основном применяются для деталей, изготавливаемых холодной штамповкой и высадкой. Без термической обработки в горячекатаном состоянии из них изготавливаются шайбы, прокладки, патрубки, вкладыши, муфты, крюки, болты и др.;

- низкоуглеродистые (до 0,3 % С) цементируемые стали. Из этих сталей изготавливаются детали с высокой поверхностной твердостью (с применением ХТО); это в основном малонагруженные шестерни, червяки, вилки, кулачки, толкатели. В горячекатаном и нормализованном состояниях применяются также для изготовления деталей невысокой прочности – крепежные детали, втулки, оси, валы, муфты, штуцеры и многочисленные детали котлотурбостроения (трубы, змеевики и др.);

- среднеуглеродистые (0,35–0,60 % С). В улучшенном состоянии или с поверхностным упрочением ТВЧ из них изготавливают коленчатые валы малооборотных двигателей, шатуны, ходовые винты, зубчатые колеса, маховики, оси, штоки, кулачки, бандажи, шпиндели, замочные шайбы и др.

Стали высокоуглеродистые (до 0,85 % С, в том числе с повышенным содержанием марганца) применяют преимущественно в качестве рессорно-пружинных (см. группу 151).

Стали низколегированные конструкционные (112)

Это низкоуглеродистые стали (до 0,2 % С) с небольшим (2–3 %) содержанием легирующих элементов (ГОСТ 5520–79); применяются без термообработки (упрочняются за счет легирования феррита) и с термической обработкой, в том числе с карбонитридным упрочнением. Основное применение находят в судостроении, транспортном и химическом машиностроении; из них изготавливаются главным образом металлоконструкции, в том числе ответственные (для Крайнего севера), сварные конструкции зданий, мостов, вагонов и грузоподъемных платформ, а также газонефтепроводы, корпуса, днища и др.

Заметим, что применительно к строительным конструкциям для этих сталей применяется специальная маркировка: обозначение начинается с буквы «С», далее указывается предел текучести (три цифры), наличие термоупрочнения и повышенной коррозионной стойкости (буквы Т и К).

Стали легированные конструкционные (113)

Стали этой группы различаются по прочности: нормальной и повышенной прочности, высокопрочные (ГОСТ 4543–71 и ТУ).

Стали нормальной и повышенной прочности (1131)

Эти стали могут быть низкоуглеродистыми (0,1–0,3 % С) и среднеуглеродистыми (0,3–0,5 % С).

Низкоуглеродистые легированные стали применяются в упрочненном состоянии со структурой малоуглеродистого мартенсита или бейнита (закалка с низким отпускком, изотермическая закалка). Повышенная прочность при этом сочетается с хорошей пластичностью и вязкостью, малой чувствительностью к надрезам. Эти стали используются в основном для цементируемых (нитроцементируемых) деталей: ходовые винты, валы, оси, червяки, зубчатые колеса, кулачковые муфты, втулки, пальцы, диски, плунжеры, рычаги, ролики, толкатели и др. В целях повышения циклической прочности слоя насыщения после термического упрочнения целесообразно также поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Некоторые из этих сталей (при повышенном содержании легирующих элементов) могут применяться и для деталей, не требующих поверхностного упрочнения, поскольку в состоянии мартенсита отпуска обеспечивается хорошее сочетание прочности, пластичности и вязкости, а также хладостойкости.

Среднеуглеродистые легированные стали применяют в состоянии после улучшения, в том числе с поверхностным упрочнением ТВЧ. Из них изготавливается большая группа деталей, подвергающихся статистическим, циклическим и ударным нагрузкам: коленчатые валы, шатуны, штоки, оси, шпиндели, зубчатые колеса, фланцы, болты, а также валы и роторы тур-

бин, тяжело нагруженные детали компрессоров и редукторов (из комплексно- и более высоколегированных сталей).

При использовании улучшаемых сталей для деталей, подвергающихся циклическим воздействиям, помимо поверхностного термоупрочнения, целесообразно проведение ППД (обкатка роликами, обдувка дробью и др.). В целях поверхностного упрочнения может применяться также азотирование (стали с карбидообразующими элементами и алюминием).

Стали высокопрочные (1132)

Высокопрочное состояние при достаточном сопротивлении хрупкому разрушению обеспечивается в среднеуглеродистых высоко- и особовысококачественных комплексно-легированных сталях после низкого отпуска и термомеханической обработки, в мартенситно-стареющих и в метастабильных аустенитных сталях.

Среднеуглеродистые комплексно-легированные высокопрочные стали – стали типа хромансил, улучшенные введением никеля и некоторых других элементов (30ХГСН2А, 30Х2ГСН2ВМ и др.), при обязательном обеспечении повышенного металлургического качества и получении мелкозернистого состояния. Последнее нередко обеспечивается применением ВТМО, в том числе на сталях с несколько большим содержанием углерода (40ХСН2МА, 40ХГСН3ВА и др.). Из таких сталей изготавливаются поковки, штамповки, листы, трубы, профили, элементы высоконагруженных узлов (цилиндры, балки, оси, болты, сосуды с внутренним давлением и др.). В целях повышения сопротивления усталостному разрушению после закалки и низкого отпуска (изотермической закалки) детали подвергаются также поверхностной пластической деформации, например, дробеструйной обработке; с этой же целью может применяться имплантация генерируемых источниками высокой энергии ионов азота, бора и других в поверхностные слои детали.

Высоколегированные высокопрочные (мартенситно-стареющие) стали типа Н18К9М5Т, Н12Х15М10, Н10Х11М2ТЮ и другие – стали особого класса, превосходящие по конструкционной прочности и технологичности среднеуглеродистые высокопрочные стали; для них особенно характерны высокие пределы текучести и упругости при низком пороге хладостойкости. Такие стали, несмотря на высокую стоимость, применяют для наиболее ответственных деталей авиационно-космической техники, в ракетостроении, а также в судостроении, где требуются высокие удельные характеристики и эксплуатационная надежность. Из этих сталей изготавливают крупные поковки, прутки, листы и др. К высоколегированным высокопрочным сталям относятся и стали с пластичностью, наведено превращением (ПНП-стали); высокая прочность, пластичность и вязкость разрушения достигаются получением метастабильной аустенитной структуры с последующей пластической деформацией при температурах 250–500 °С (ниже $T_{рек.}$).

7.1.2. Сплавы с нормальной, повышенной и высокой прочностью (12)

Сплавы алюминиевые деформируемые (121)

Алюминиевые сплавы относятся к легким сплавам. Алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой, считаются сплавами с нормальной прочностью ($\sigma_{\text{в}} = 150\text{--}400$ МПа), к сплавам повышенной и высокой прочности относятся термически упрочняемые сплавы ($\sigma_{\text{в}} = 400\text{--}500$ МПа и > 500 МПа соответственно).

Сплавы нормальной и повышенной прочности (1211)

Сплавами с нормальной прочностью являются сплавы твердорастворного упрочнения (ГОСТ 4784–97), легированные в основном марганцем (АМц) и магнием (типа АМг). Они отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью; используются в отожженном и нагартованном состояниях для изготовления деталей (изделий), формируемых глубокой вытяжкой и сваркой: трубопроводы для масла и бензина, радиаторы, сварные емкости, в том числе корпуса судов, рамы транспортных средств и др.

К сплавам повышенной прочности относятся сплавы типа дюралюминий (ГОСТ 4784–97), легированные в основном медью, магнием и марганцем (типа Д и АК); они упрочняются термической обработкой на старение. Сплавы типа Д широко применяются в авиации; из них изготавливают лопасти воздушных винтов, шпангоуты, нервюры, тяги управления и т. п.; используют также для строительных конструкций, кузовов грузовых автомобилей, обсадных труб и др. Ковочные сплавы типа АК используют при изготовлении деталей сложной формы: крыльчаток, фитингов, качалок, крепежных деталей, а также подмоторных рам, поясов лонжеронов, лопастей вертолетов и др.

Сплавы высокопрочные (1212)

К высокопрочным относятся сплавы алюминия с цинком, медью и магнием (типа В). Они упрочняются термической обработкой на старение; по прочности превосходят сплавы типа дюралюминий, однако обладают пониженной пластичностью и вязкостью разрушения. Высокопрочные сплавы применяют для высоконагруженных элементов конструкций, работающих в основном на сжатие; из них изготавливают корпуса, детали обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов и другие детали.

Композиционные материалы (КМ) высокопрочные (1213)

Это материалы из различных комбинаций армирующего материала и матриц. В качестве матрицы выступает алюминий или его сплавы (в том числе упрочняемые термической обработкой), а также упрочняющий наполнитель – волокно бора (типа ВКА), углерод (типа ВКУ), стальная проволока (типа КАС). Первые два – при плотности $2,3\text{--}2,6$ т/м³ обеспечивают получение прочности $1000\text{--}1200$ МПа, а последний – при $4,8$ т/м³ – 1600

МПа. Особое внимание уделяется боралюминиевым КМ, сохраняющим высокую прочность до температур 400–500 °С; привлекают внимание и углеродоалюминиевые КМ, характеризующиеся более высоким модулем упругости (140–160 ГПа вместо 70 ГПа). Отличительной особенностью КМ, армированного высокопрочной стальной проволокой, является их меньшая стоимость и недефицитность.

КМ с алюминиевой матрицей применяются в областях техники, в которых условия работы изделий не допускают применения традиционных металлических материалов (например, в авиационно-космических конструкциях).

Сплавы магниевые деформируемые (122)

Магниевые сплавы как алюминиевые относятся к легким³; они обладают еще меньшей плотностью (1,8–1,9 т/м³); во многом аналогичны алюминиевым и также разделяются на сплавы нормальной, повышенной прочности и высокопрочные.

Сплавы нормальной и повышенной прочности (1211)

Эти сплавы легируются в основном алюминием, цинком и марганцем (ГОСТ 14957–76). Они также могут быть термически упрочняемыми и неупрочняемыми; эффект упрочнения у них, однако, невелик (около 30 %). Такие сплавы применяются в авиационной и ракетной технике, в автомобилестроении и приборостроении; из них изготавливаются колеса, вилки шасси, двери кабин, технические емкости (баки), крышки, фонари, детали бензомаслосистем, приборов и др.

Композиционные материалы высокопрочные (1222)

В качестве матрицы в основном используются сплавы магния (см. подгруппу 1221). Армирование чаще производится волокнами бора, углерода, а также стальной или титановой проволокой. При меньшей плотности, чем у алюминиевых, магниевые композиты обеспечивают получение примерно такой же прочности (до 1000–1200 МПа). КМ на основе магния применяются в основном для деталей самолетов и космических конструкций.

Титан и титановые сплавы деформируемые (123)

В эту группу включены чистый титан (тип ВТ-1), сплавы титана термически не упрочняемые и термически упрочняемые (ГОСТ 19807–91), а также композиционные материалы на основе титана. Подобно сталям по уровню прочности эти сплавы бывают нормальной прочности (мало- и среднепрочные) и высокопрочные; к последним относятся и КМ с титановой матрицей.

³ К легким относятся так же бериллий и его сплавы, которые ввиду острой дефицитности и токсичности бериллия, технологических трудностей получения и переработки сплавов здесь не рассматриваются.

Сплавы нормальной прочности (1231)

Сплавами нормальной прочности считаются технически чистый титан и α -сплавы с твердорастворным упрочнением, а также псевдо- α -сплавы; первые легируются в основном алюминием, оловом, а вторые – еще цирконием, ванадием, молибденом. Эти сплавы при меньшей, чем у сталей плотности (4,4-4,6 т/м³) обладают близкими к ним характеристиками прочности; применяются для элементов конструкций (листы, трубы, плиты, профили, поковки, штамповки), работающих в широком диапазоне температур от криогенных до 450 °С.

Сплавы высокопрочные (1232)

Высокопрочными считаются ($\alpha+\beta$)- и псевдо- β -сплавы, упрочняемые термической обработкой. Наряду с алюминием они легируются ванадием, молибденом, хромом, цирконием.

Они обладают еще более высокой прочностью, сопоставимой с прочностью многих конструкционных сталей, и широко применяются в авиационной и ракетно-космической технике. Из них изготавливают: обшивку, детали шасси, элементы конструкций реактивных двигателей (диски, баллоны, воздухозаборники и др.).

Композиционные материалы высокопрочные (1233)

Дальнейшее повышение прочностных свойств, особенно жесткости, достигается в композитах на основе титана и титановых сплавов. В качестве армирующих применяются в основном волокна бора, борсика, а также бериллия и молибдена.

Эти КМ предназначены, главным образом, для изготовления лопаток, створок регулируемых сопел и газотурбинных двигателей.

Расширяется применение титановых материалов в вертолетостроении (детали несущего винта, привода), в судостроении и других областях машиностроения (листы, профили, поковки, штамповки, детали крепления).

Сплавы медные деформируемые (124)

По прочности медные сплавы уступают сталям (300–500 МПа), и только бериллиевая бронза сопоставима по прочности с улучшенной среднеуглеродистой легированной сталью (1100–1200 МПа). Отличительная особенность большинства медных сплавов – высокая пластичность (по этому признаку они могут относиться и к сплавам высокой технологичности). В машиностроении применяются в основном латуни и бронзы.

Латуни деформируемые (1241)

Латуни представляют собой двойные или многокомпонентные сплавы, в которых основным элементом является цинк (ГОСТ 15527–70). Это термически неупрочняемые α и $\alpha+\beta$ -сплавы (твердорастворное и структурное упрочнение⁴). Латуни производятся в виде горяче- и холоднокатаных листов, полос, лент, труб, проволоки, из которых изготавливают разнообразные детали, в основном вытяжкой (гильзы, радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, шайбы, втулки, детали холодильного оборудования и приборов).

Бронзы деформируемые (1242)

Бронзами называют сплавы, в которых цинк или никель не являются основными легирующими элементами (ГОСТ 5017–74 и ГОСТ 18175–78). Деформируемые бронзы – это преимущественно α -сплавы; они упрочняются легированием твердого раствора. Такие бронзы обладают хорошим сочетанием прочностных свойств с пластичностью и вязкостью. Бериллиевая же бронза и некоторые алюминиевые бронзы упрочняются еще и термической обработкой. Бронзы обладают лучшими механическими и другими свойствами по сравнению с латунями; они изготавливаются в виде деформируемых полуфабрикатов – лент, полос, прутков, из которых производятся седла клапанов, направляющие втулки, части насосов и турбин, различных деталей арматуры; из бериллиевых бронз делаются мембраны, пружины и другие детали приборов.

7.1.3. Стали и сплавы с повышенными технологическими свойствами (13)

Под технологическими свойствами понимается обрабатываемость резанием, штампуемость, свариваемость и литейность (пригодность к изготовлению деталей литьем).

Стали с улучшенной обрабатываемостью резанием (131)

Обрабатываемость резанием оценивается в основном интенсивностью изнашивания инструмента; она зависит от механических свойств, микроструктуры, химического состава, а также теплопроводности. Повышение обрабатываемости достигается технологическими (термическая обработка и наклеп) и металлургическими приемами.

⁴ Исключением является латунь ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5, которая подвергается дисперсионному упрочнению.

Повышению обрабатываемости среднеуглеродистых сталей способствует нормализация⁵, поскольку она формирует наиболее благоприятную для этих целей структуру из феррита и пластинчатого перлита; нормализация проводится с высоких температур для укрупнения зерна, что также улучшает обрабатываемость стали. Повышение обрабатываемости низкоуглеродистой стали достигается наклепом, который способствует получению ломкой стружки. Наибольший эффект достигается, однако, металлургическим путем (изменением состава).

Автоматные стали (1311)

Для повышения обрабатываемости в состав этих сталей вводятся сера, селен (влияют на состав и количество неметаллических включений), а также свинец (образует собственные металлические включения); одновременно повышается содержание фосфора. Повышая обрабатываемость, эти элементы снижают качество стали. Автоматным сталям (ГОСТ 1414–75) свойственна повышенная анизотропия механических свойств – пониженная вязкость, пластичность и сопротивление усталости в поперечном направлении по отношению оси прокатки.

Автоматные стали (марочное обозначение начинается с буквы А) применяются для малоответственных деталей крепежа, а также изделий сложной формы, к которым предъявляются требования в основном по точности размеров и чистоте поверхности.

Обрабатываемость аустенитных хромоникелевых сталей иногда повышается добавками селена (0,15–0,30 %); марочное обозначение в этом случае заканчивается буквой Е.

К хорошо обрабатываемым резанием относятся помимо сталей оловянные и специальные бронзы, латуни с добавками свинца (см. подгруппы 1242, 1241), а также силумины, легированные медью (см. подгруппу 1342).

Стали и сплавы с высокой технологической пластичностью (132)

Под технологической пластичностью понимается способность подвергаться горячей и, главным и образом, холодной пластической деформации (обработка давлением). Технологическая пластичность зависит от состава и микроструктуры.

Стали высокой технологической пластичности (1321)

В сталях определяющее влияние на пластичность в холодном состоянии оказывает содержание углерода (глубокая вытяжка возможна при 0,1 % С; при 0,2–0,3 % С возможен лишь гиб и незначительная вытяжка;

⁵ Заметим, что высокоуглеродистые стали (см. группу 311) для улучшения обрабатываемости отжигаются на зернистый перлит.

при 0,3–0,4 % С – только гиб большого радиуса). Лучше всего деформируется мелкозернистая сталь (балл 7–8). Чем больше относительное удлинение и меньше отношение предела текучести к пределу прочности (рекомендуется 0,55–0,65), тем выше способность сталей к вытяжке. Такими сталями являются низкоуглеродистые и легированные стали для холодной высадки (ГОСТ 10702–78). Из них изготавливают детали кузовов автомобилей, корпуса приборов, элементы емкостей и другие детали сложной формы.

Сплавы высокой технологической пластичности (1322)

Высокой технологической пластичностью обладают некоторые сплавы на основе алюминия и меди.

Из числа алюминиевых к высокотехнологичным в холодном состоянии относятся не упрочняемые термической обработкой однофазные сплавы нормальной прочности (см. подгруппу 1211); в горячем состоянии – термически упрочняемые сплавы повышенной прочности (тип АК той же подгруппы); последние не склонны к образованию трещин.

Из медных сплавов высокотехнологичными в холодном состоянии являются α -латуни, а в нагретом состоянии $\alpha+\beta$ -латуни (см. подгруппу 1241).

Свариваемые стали и сплавы (133)

Под свариваемостью понимается количество допускаемых способов сварки (без пор, непроваров, особенно трещин) и простота их технологий.

Свариваемые стали (1331)

Свариваемость стали определяется ее составом. Решающим является влияние углерода; он увеличивает склонность к образованию трещин (расширяет интервал кристаллизации) и повышает вероятность местной закалки (трещины в околошовной зоне). В связи с этим хорошо свариваемыми являются стали, содержащие до 0,25 % С. Это соответствующие марки сталей обыкновенного качества и сталей углеродистых качественных (см. подгруппы 1111, 1112).

К числу свариваемых относятся уже упоминавшиеся выше низколегированные стали (см. группу 112) с углеродным эквивалентом 0,45–0,48⁶.

Свариваемые сплавы (1332)

Из нежелезных к числу свариваемых относятся сплавы на основе алюминия и меди, а также титан и некоторые его сплавы.

⁶ Углеродный эквивалент определяется по содержанию элементов в % $C_{эк} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$.

Хорошо свариваются деформируемые алюминиевые сплавы, неупрочняемые термической обработкой, которые являются одновременно и сплавами высокой технологической пластичности (см. подгруппу 1322). Свариваются и литейные сплавы алюминия – силумины (см. подгруппу 1342).

К свариваемым относятся и сплавы на основе меди; хорошо свариваются и паяются, в частности, кремнистые бронзы; некоторые латуни свариваются со сталью при совместной прокатке (плакирование).

К числу хорошо свариваемых относятся технически чистый титан и однофазные α -сплавы; удовлетворительно свариваются двухфазные $\alpha+\beta$ -сплавы, хотя для смягчения сварного шва необходимо проведение отжига. Сварка титана и сплавов на его основе, однако, осуществляется в атмосфере инертных газов или в вакууме. По назначению эти материалы отнесены к сплавам, ведущим свойством которых является прочность (см. группу 123).

Стали и сплавы литейные (134)

Литейными называются сплавы, пригодные для изготовления деталей литьем; они обладают сравнительно низкой температурой плавления, хорошей жидкотекучестью, малой усадкой и склонностью к образованию пористости, ликвации, горячих и холодных трещин. Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы, претерпевающие эвтектические превращения. Вместе с тем эти материалы обладают определенным сочетанием механических свойств, позволяющих применить их в качестве конструктивных материалов.

Чугуны и стали для литья (1341)

Чугуны обладают лучшими литейными свойствами из сплавов на основе железа; они затвердевают с образованием эвтектики (больше 2,14 % С). В машиностроении применяются серые, высокопрочные (разновидность серых) и ковкие чугуны. Наряду с высокими литейными свойствами и хорошей обрабатываемостью резанием, чугуны обладают достаточной прочностью.

Серые чугуны (марочное обозначение СЧ) отличаются пластинчатой формой графита (ГОСТ 1412–85): лучше всего работают на сжатие. Эти чугуны применяются для разнообразных (до 100 т) отливок сложной формы, к которым не предъявляются жесткие требования по габаритам и массе. Для слабо- и средненагруженных деталей используются ферритные чугуны (крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов, подшипников, насосов, а также суппорты, тормозные барабаны, диски сцепления и т. п.). Для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках, выбираются феррито-перлитные чугуны (блоки и поршни цилиндров, картеры двигателей, станины, зубчатые колеса и другие). Перлитные же чугуны (модифицированные ферросилицием или силикокальцием) используются для деталей, работающих при сравнительно высоких на-

грузках или в тяжелых условиях износа⁷ (гильзы блоков цилиндров, шпиндели, распределительные валы, зубчатые колеса, арматура тормозной пневматики и гидропроводов).

Высокопрочные чугуны – чугуны с шаровидной формой графита (марочное обозначение ВЧШГ) получают модифицированием магнием (ГОСТ 7293–85). Эти чугуны прочнее, чем серые; вместе с тем они отличаются и некоторой пластичностью. Высокопрочные чугуны с вермикулярным графитом по механическим свойствам близки к чугунам с шаровидным графитом (ГОСТ 28394–89). Во многих конструкциях высокопрочные чугуны заменяют стали. Из них изготавливают оборудование прокатных станов (в том числе валки до 12 т), кузнечно-прессовое оборудование (траверсы, шаботы ковочных молотов), энергетическое оборудование (корпуса паровых турбин, лопатки направляющего аппарата, коленчатые валы, поршни и др.).

Ковкие чугуны (марочное обозначение КЧ) – чугуны с холопьевидным графитом (ГОСТ 1215–79). Эти чугуны обладают более высокой прочностью и пластичностью, чем серые чугуны: они получают отжигом белых доэвтектических чугунов. Ковкие чугуны нашли широкое применение в автомобильном, сельскохозяйственном, текстильном машиностроении, в судостроении и котлостроении; из них изготавливают детали сравнительно высокой прочности, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки.

В машиностроении применяются также легированные чугуны (ГОСТ 7769–82) с несколько другими характерными свойствами.

Стали литейные вследствие высокой температуры плавления и широкого интервала кристаллизации обладают худшими литейными свойствами по сравнению с чугунами. Однако они характеризуются большим уровнем и лучшим сочетанием механических свойств (см. подкласс 11). По поставке такие стали близки, а по механическим свойствам уступают деформируемым сталям соответствующих марок. Среди них имеются стали различных подгрупп по прочности: в основном это стали мало- и среднеуглеродистые (их марочное обозначение заканчивается буквой Л, ГОСТ 977–88).

Малолегированные стали применяются в основном для фасонных отливок тяжеловесных деталей общего машиностроения: элементов сварных конструкций, корпусов, муфт, захватов, плит, подушек, копровых баб, станин, шкивов, траверсов, поршней, буксов, рам, мульд, балансиров, маховиков, катков, осей, валов, зубчатых колес и др. Из среднелегированных сталей изготавливаются менее тяжеловесные детали, требующие повышенной твердости (прочности), в том числе в условиях пониженной температуры (в северном исполнении).

⁷ Чугуны обладают также хорошими антифрикционными свойствами (см. группу 142).

Сплавы алюминиевые и магниевые литейные (1342)

Алюминиевые литейные сплавы (ГОСТ 1583–93) основываются на эвтектической кристаллизации (марочное обозначение начинается с буквы А). В марках литейных сплавов алюминия приводится содержание легирующих элементов, оно указывается сразу после его обозначения. Лучшими литейными свойствами обладают сплавы с кремнием (силумины). Наилучшее сочетание механических свойств достигается модифицированием; некоторые сплавы (с медью и магнием) обрабатываются на старении. Литейные алюминиевые сплавы применяются в самолето-, ракето- и автомобилестроении для средних и крупных фасонных деталей ответственного назначения, работающих при температуре до 200–300 °С (корпуса компрессоров, картеры, головки цилиндров, турбинные колеса, штурвалы, хвостовые оперения и др.).

Магниевые литейные сплавы (ГОСТ 2856–79) характеризуются несколько худшими литейными свойствами, чем алюминиевые (меньшая жидкотекучесть, склонность к образованию горячих трещин, усадочная пористость). По составу они близки к деформируемым, но по механическим свойствам, особенно по пластичности, они им уступают; повышению пластичности способствует гомогенизация. Эти сплавы применяются в самолетостроении (корпуса приборов, насосов, коробок передач, фонари, двери кабин, штурвалы и др.), ракетной технике (обтекатели, баки, стабилизаторы), а также в автомобилестроении (колеса, корпуса, помпы, бензотопочная аппаратура и др.); все большее распространение получают в приборостроении и при производстве электронной аппаратуры.

Бронзы литейные⁸(1343)

К литейным относятся, прежде всего, оловянные бронзы; они имеют незначительную объемную усадку из-за рассеянной пористости. Хорошими литейными свойствами обладают алюминиевые бронзы благодаря высокой жидкотекучести, малой склонности к дендритной ликвации, но они отличаются большей усадкой. Более низкими литейными свойствами характеризуются кремнистые бронзы.

Оловянные литейные бронзы (ГОСТ 614–97) применяются для получения сложных фасонных отливок, частей насосов, паровой и водяной аппаратуры, а также для изделий ответственного назначения (шестерни, подшипники, втулки и др.). Безоловянные бронзы (ГОСТ 493–79) применяются для изготовления деталей, работающих в особо тяжелых условиях (зубчатые колеса, втулки, седла клапанов, шестерни и червяки для мощных кранов и турбин и др.).

⁸ В марках литейных бронз содержание легирующего элемента ставится сразу после букв, обозначающих их название.

*Латуни литейные*⁹ (1344)

В качестве литейных применяют в основном легированные латуни; они обладают малым интервалом кристаллизации. Литейные латуни (ГОСТ 17711–93) применяются в виде фасонных отливок; из них изготавливают зубчатые колеса, подшипники, втулки, штуцеры, червячные винты, а также различную арматуру, работающую на воздухе, в воде, масле, жидком топливе, в том числе при нагреве до 250 °С.

Титановые сплавы литейные (1345)

Эти сплавы имеют хорошие литейные свойства – узкий температурный интервал кристаллизации, высокая жидкотекучесть, малая склонность к образованию горячих трещин и небольшая усадка. Однако их плавку и разливку надо вести в вакууме или в среде нейтральных газов. Для литья применяются сплавы, аналогичные по составу деформируемым (в конце марочного обозначения у этих сплавов ставится буква Л).

Литейные титановые сплавы применяются для получения некоторых деталей, изготавливаемых из деформируемых сплавов, но отличающихся сложностью формы.

7.1.4. Стали и сплавы триботехнического назначения (14)

***Стали и сплавы с высокой износостойкостью* (141)**

Это, прежде всего, стойкие к абразивному изнашиванию, сопровождающемуся ударами, наплавочные карбидные сплавы – сормаиты, стеллиты, карбидостали, и др. (для деталей, работающих в наиболее тяжелых условиях); порошковые твердые сплавы, а также высокоуглеродистые сплавы с карбидо-мартенситной структурой¹⁰ (для деталей, работающих в средних условиях); низко- и среднеуглеродистые стали с различными видами поверхностного упрочнения (см. подгруппы 1112, 1131) и чугуны (для деталей с более легкими условиями работы – гильзы цилиндров, коленчатые валы, поршневые кольца и др.).

Сюда относятся также стали, устойчивые к усталостному изнашиванию: шарикоподшипниковые стали (ГОСТ 801–78) – для изготовления шариков, роликов и колец; низко- и среднеуглеродистые стали с поверхностным упрочнением, как и в случае абразивного изнашивания, – для различных по размеру и назначению зубчатых колес.

Износостойкость сталей может быть существенно повышена нанесением специальных покрытий [24].

⁹ Содержание легирующих элементов в литейных латунях указывается так же, как в литейных бронзах.

¹⁰ Эти стали, как и порошковые твердые сплавы, относятся также к 3 классу.

К этой же группе относится сталь Гадфильда, хорошо работающая при трении с высокими давлениями и ударными нагрузками (траки гусеничных машин, крестовины железнодорожных рельсов, черпаки экскаваторов, детали камнедробилок и др.).

В качестве износостойких, особенно при микроударном нагружении (кавитация), используются медные сплавы – α - и β -фазные легированные бронзы (см. группу 124); а также алюминиевые сплавы (тип АО) с добавками меди и цинковые сплавы (тип ЦАМ); с этой же целью могут использоваться и титановые сплавы с повышенным содержанием β -фазы (см. группу 123).

Сплавы антифрикционные (142)

Это сплавы, предназначенные для работы в режиме жидкого трения, сочетающемся с режимом граничной смазки.

К этой группе относятся, прежде всего, сплавы с мягкой матрицей и твердыми включениями: баббиты (ГОСТ 1320–74, 1209–96) – для тонкого покрытия рабочих поверхностей опор скольжения; оловянные, оловянно-цинково-свинцовистые бронзы (см. подгруппу 1343) – для монолитных подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров; двухфазные латуни (см. подгруппу 1344) – как заменители бронз, часто используются для опор трения приборов.

В эту группу входят сплавы с твердой матрицей и мягкими включениями: оловянные литейные бронзы (ГОСТ 613–79) и алюминиевые антифрикционные сплавы (ГОСТ 14113–78) – для наплавки на металлическую ленту и для отливки монометаллических вкладышей. Сюда относятся также серые чугуны (см. подгруппу 1341) и легированные антифрикционные чугуны (ГОСТ 1585–85) – для работы при значительных давлениях и малых скоростях скольжения.

В качестве антифрикционных получают распространение и порошковые сплавы железо–графит, медь или бронза–графит с добавками меди к железу, железа к меди. Наличие пор обеспечивает хорошую прирабатываемость, а содержащаяся в них смазка – самосмазываемость.

В настоящее время все большее распространение получают подшипники с многослойными покрытиями в различном сочетании выше упоминавшихся сплавов.

Сплавы фрикционные (143)

Детали фрикционных устройств рассчитываются на стойкость (нагрев) и долговечность. К металлическим фрикционным материалам относятся чугуны (см. подгруппу 1341); лучшими свойствами обладают чугуны с перлитной основой. Они применяются для деталей тормозных устройств, работающих в тяжелых условиях (температуры на поверхности трения до 1000 °С) без

смазки; из них изготавливают накладки, колодки и другие детали тормозных устройств, в том числе вагонов железнодорожного транспорта.

Перспективным является применение порошковых сплавов на основе железа и меди с добавками графита, асбеста, а также олова, свинца, кремнезема и др. Порошковые фрикционные сплавы также могут работать без смазки.

7.1.5. Стали и сплавы с высокими упругими свойствами (15)

К материалам с высокими упругими свойствами относятся пружинные стали и сплавы. Они упрочняются пластическим деформированием и термической (термомеханической) обработкой.

Пружинные стали общего назначения (151)

Это в основном углеродистые и легированные пружинные стали (ГОСТ 14959–79). Углеродистые стали применяются для изготовления сравнительно небольших упругих элементов, работающих при невысоких (до 100 °С) температурах. Легированные пружинные стали используются для изготовления более крупных пружинных элементов, работающих при повышенных температурах (300 °С). И те, и другие стали широко используются в автотракторостроении, на железнодорожном транспорте, в станкостроении и других отраслях техники.

Пружинные стали и сплавы специального назначения (152)

Стали и сплавы этой группы, помимо высокой упругости, должны обладать также какими-либо другими свойствами – коррозионной стойкостью, немагнитностью, низким температурным коэффициентом упругости. В связи с этим для изготовления таких упругих элементов применяются мартенситные коррозионно-стойкие стали (см. группу 161), мартенситно-старяющие стали (см. подгруппу 1132); для упругих элементов с малым температурным коэффициентом модуля упругости используются железоникельхромовые сплавы, а с высокой электропроводностью (ГОСТы 18175–78, 1789–70) – бериллиевые бронзы и некоторые другие бронзы и латуни (см. подгруппы 1241 и 1242).

7.1.6. Стали и сплавы, устойчивые к воздействию температуры, рабочей и внешней среды (16)

В этот подкласс входят жаростойкие, жаропрочные, хладостойкие и коррозионно-стойкие стали и сплавы.

Жаростойкие стали и сплавы (161)

Эту группу составляют высоколегированные хромистые и хромоникелевые стали, жаростойкие чугуны, а также некоторые алюминиевые сплавы.

Высокохромистые и хромоникелевые стали (ГОСТ 5632–72), помимо большого количества хрома, могут содержать еще пленкообразующие элементы – кремний и алюминий. Хромистые стали, будучи ферритными, при работе в нагретом состоянии становятся крупнозернистыми (охрупчиваются), в связи с чем из них изготавливаются изделия, которым несвойственны значительные, особенно ударные, нагрузки (электронагреватели, детали печей и др.). Хромоникелевые стали с аустенитной структурой более технологичны и жаропрочны (см. подгруппу 1622); они применяются для изготовления более нагруженных деталей печей (муфели и направляющие), вентиляторов, конвейеров, рольгангов и др.

Повышение жаростойкости сталей и тугоплавких металлов можно обеспечить также за счет жаростойких тугоплавких покрытий [24].

В качестве жаростойких могут использоваться и чугуны: простые серые – до 300 °С, модифицированные – до 550 °С. Более жаростойкими являются легированные специальные чугуны (ГОСТ 7769–82); они применяются для колосников, деталей газотурбинных двигателей и компрессоров, горелок, деталей термических печей, арматуры котлов и др. (см. подгруппу 1341).

Жаростойкость алюминиевых сплавов типа АК (кроме сплавов с магнием) практически такая же, как и алюминия; по составу и свойствам сплавы АК близки к дюралюминию 9 см. подгруппу 1211).

Жаростойкость латуней и бронз выше, чем меди, особенно при наличии в них бериллия, алюминия, марганца (см. подгруппу 124).

Жаропрочные стали и сплавы (162)

Жаропрочными считаются стали, работающие при температурах выше 450 °С (до этой температуры могут работать обычные легированные конструкционные стали, см. подгруппу 113). К жаропрочным относятся теплостойкие (перлитные и мартенситные), аустенитные стали, никелевые и кобальтовые сплавы, композиционные материалы, а также сплавы на основе алюминия, магния и титана, хотя у них своя область жаропрочности.

Теплостойкие стали (1621)

Эти стали способны работать длительное время при температурах 450–650 °С. Они разделяются на низколегированные и среднелегированные перлитные и мартенситные (ГОСТ 20072–74), а также высоколегированные хромистые (ГОСТ 5632–72) стали.

Перлитные легированные стали работают при температурах 450–580 °С. При низком содержании углерода (до 1,5 %) они свариваются (см. подгруппу 1331) и применяются для изготовления деталей теплоэнергетических установок (пароперегревателей, коллекторов, паропроводов и различных деталей арматуры); из более углеродистых несвариваемых перлитных сталей (0,25–0,30 % С) изготавливают валы, цельнокованные роторы паровых турбин, шпильки и крепежные детали.

Мартенситные стали более легированы, чем перлитные, и предназначаются для деталей, работающих при температурах до 600–650 °С. Эти стали могут быть как низкоуглеродистыми, так и со средним содержанием углерода. Из низкоуглеродистых сталей изготавливаются многие детали паровых турбин: диски, лопатки, бандажи, диафрагмы, роторы, а также трубы и крепежные детали.

Высоколегированные (среднеуглеродистые) мартенситные стали – сильхромы работают при температурах до 600–650 °С и характеризуются высокой износостойкостью, в том числе при ударных нагрузках; они широко применяются в двигателях внутреннего сгорания (клапаны, седла), а также в нагревательных устройствах (регуляторы, теплообменники, колосниковые решетки и др.). Сильхромы применяются и как жаростойкие стали (см. подгруппу 161).

Высокохромистые (10–13 % Cr) мартенситоферритные стали (ГОСТ 5632–72) работают при температурах до 700–750 °С; они могут содержать упрочняющие добавки других элементов. Эти стали могут применяться для изготовления лопаток паровых турбин, клапанов гидравлических прессов, болтов, гаек, труб, арматуры. Некоторые из этих сталей используются и как коррозионно-стойкие (см. подгруппу 1641).

Аустенитные жаропрочные стали (1622)

Это высоколегированные, в основном хромоникелевые, стали (ГОСТ 5632–71); по жаропрочности они превосходят теплостойкие стали и используются при температурах 650–850 °С; положительным качеством этих сталей является также высокая жаростойкость.

Однофазные (гомогенные) стали имеют высокую релаксационную стойкость при длительной эксплуатации; они применяются преимущественно в энергомашиностроении (трубы паронагревателей и паропроводов, арматура установок сверхвысоких параметров, крепежные детали и др.). Некоторые из этих сталей используются как коррозионно-стойкие (см. подгруппу 1641) и как свариваемые (см. подгруппу 1331).

Стали с карбидным упрочнением содержат несколько карбидообразующих элементов и за счет этого обеспечивают большую, чем гомогенные стали, жаропрочность (650–750 °С). Они применяются для изготовления ответственных деталей энергомашиностроения (диски, лопатки турбин, крепежные детали и др.); некоторые из этих сталей применяются для изготовления выхлопных клапанов авиационных и мощных автомобильных двигателей.

Стали с интерметаллидным упрочнением нашли применение при изготовлении компрессоров, турбин, дисков, шпилек, болтов и других деталей, работающих при температурах до 750–850 °С.

Жаропрочные сплавы (1623)

Это, прежде всего, сплавы на основе никеля, кобальта, тугоплавких металлов. Сплавы на основе никеля (ГОСТ 5632–72) могут быть гомогенные (нихромы) и дисперсионно-упрочняемые (нимоники). В качестве жаропрочных обычно применяются последние; интервал рабочих температур 850–1050 °С. Их используют в газовых турбинах двигателей самолетов, кораблей, энергетических установок, при изготовлении деталей ракетно-космической техники (диски, рабочие лопатки турбин, камеры сгорания и др.); они применяются также для изготовления штампов и матриц горячего деформирования (см. группу 332).

Жаропрочные сплавы на основе кобальта имеют преимущество перед никелевыми в основном по жаростойкости; они подходят для длительной работы в коррозионной среде, но вследствие дефицитности и дороговизны кобальта применяются редко.

Жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта применяются и в литейном варианте.

Значительно большей жаропрочностью обладают получающие распространение сплавы на основе тугоплавких металлов. Прежде всего, это сплавы на основе ниобия и тантала, предназначенные для работы при 1100–1300 и 1300–1500 °С, соответственно; они характеризуются высокими показателями пластичности, технологичности, низкими температурными переходами в хрупкое состояние. В этом отношении они выгодно отличаются от сплавов на основе молибдена и вольфрама, хотя рабочие температуры последних выше на 150–200 °С. Общим недостатком всех этих сплавов является низкая жаростойкость, что обуславливает необходимость защиты их специальными покрытиями.

Сплавы на основе тугоплавких металлов вследствие дороговизны и дефицитности (тантал, молибден), а также технологических трудностей получения и изготовления из них изделий применяются в ракетно-космической технике лишь в случае, если требуемые эксплуатационные свойства не могут быть удовлетворены при использовании других жаропрочных материалов.

Композиционные жаропрочные материалы (1624)

Высокой жаропрочностью обладают композиционные материалы. Практически используются как волокнистые, так и дисперсно-упрочняемые КМ.

Армирование сплавов на основе никеля высокопрочной проволокой из тугоплавких металлов, керамическими и углеродными волокнами обеспечивает более высокую жаропрочность ВКМ, чем у современных суперсплавов. Удельная прочность таких материалов при температурах, превышающих 1100 °С, больше, чем у высокопрочных жаропрочных сплавов.

Длительная прочность КМ, армированных вольфрамовой проволокой, существенно превышает длительную прочность лучших сплавов на никелевой основе.

Наиболее высокими показателями кратковременной и длительной прочности при температурах выше 1000 °С характеризуются ДКМ с матрицей из нелегированного никеля. В качестве упрочняющей фазы обычно используются оксиды; наиболее эффективен оксид тория ThO₂ до 2 % (тип ВДУ). Вследствие токсичности оксид тория заменяется оксидом гафния HfO₂, однако жаропрочность при этом несколько понижается. Эти К предназначены для работы выше 1100 °С. Из них изготавливают лопатки газовых турбин, камеры сгорания, теплоизоляционные панели, а также сосуды и трубопроводы, работающие при высоких температурах в агрессивных средах.

К жаропрочным (в своей области) относятся также некоторые из сплавов нежелезной группы.

Жаропрочные медные сплавы – гомогенные (с добавлением серебра, кадмия, магния) и дисперсионно-твердеющие сплавы (с небольшими присадками хрома, циркония, бериллия), причем вторые значительно прочнее первых; они применяются при температурах до 600 °С для изготовления электродов аппаратов контактной сварки и коллекторов электромоторов.

Жаропрочные алюминиевые сплавы близки по составу к деформируемым и литейным сплавам алюминия (см. подгруппу 1211 и 1342) и работают при температурах до 350 °С; они применяются для изготовления деталей реактивных и поршневых двигателей (крыльчатки, лопатки, диски осевых компрессоров, заборники, а также поршни, головки цилиндров и др.).

В качестве жаропрочных применяются также ДКМ на основе алюминия и его сплавов; в роли упрочнителя выступают высокодисперсные порошки оксида алюминия (тип САП) или карбида алюминия (тип А1–С). Эти материалы отличаются повышенной длительной прочностью и при температурах 300–500 °С превосходят все алюминиевые сплавы. Они выпускаются в виде листов, прутков и штамповок, труб; из них изготавливают лопатки компрессоров, поршневые штоки, лопасти вентиляторов и турбин и т. п. Повышенной жаропрочностью характеризуются и ВКМ на основе алюминия с борными волокнами (см. подгруппу 1213).

Некоторые из магниевых сплавов (см. группу 122 и подгруппу 1342) могут использоваться как жаропрочные до температур 300–350 °С; они применяются для нагреваемых в процессе эксплуатации деталей двигателей, приборов и др. Несколько большей жаропрочностью обладают ДКМ с добавками оксида магния (Mg–MgO), работающие на воздухе при температурах до 400 °С. ДКМ на основе магния применяются в авиации, ракетной и ядерной технике (несущие элементы, корпусные изделия). Перспективными в этом отношении являются и упоминавшиеся выше волокнистые композиционные материалы (см. подгруппу 1222).

В качестве жаропрочных до температур 500–600 °С могут применяться и титановые сплавы: α -сплавы, особенно с повышенным содержанием алюминия, при одновременном легировании цирконием и кремнием, $\alpha + \beta$ -сплавы (см группу 123 и подгруппу 1345) и композиционные материалы (см. подгруппу 1233).

Хладостойкие стали и сплавы (163)

Хладостойкость – это свойство металлов и сплавов переходить в хрупкое состояние (терять вязкость) при понижении температуры. Хладостойкость железа, сталей и металлов с ОЦК и ГПУ-решетками оценивается порогом хладноломкости (Т50). Металлы и сплавы с ГЦК-решеткой, а также титан и его сплавы с ГПУ-решеткой не имеют порога хладноломкости; их хладостойкость оценивается температурой, при которой ударная вязкость KCV остается не менее 0,3 МДж/м².

Хладостойкие стали (1631)

Стали с ОЦК-решеткой (см. подкласс 11) используются главным образом для работы при температурах климатического холода (до –60 °С). Аустенитные стали с ГЦК-решеткой (см. подгруппу 1622) могут использоваться до –196 °С; из них изготавливают емкости, резервуары, конструкции кислородных установок, подвески, крепеж. Для работы при несколько больших температурах (от –100 до –180 °С) применяются специальные криогенные стали с повышенным (до 10 %) содержанием никеля. Последние применяются для изготовления крупных конструкций, емкостей для хранения и перевозки сжиженных газов, разнообразных деталей холодильной техники.

В качестве хладостойких могут применяться и мартенситно-старяющиеся стали (см. подгруппу 1132); из них изготавливаются детали холодильных машин повышенной коррозионной стойкости и твердости (подпятники, валики, клапаны и др.).

Хладостойкие сплавы (1632)

Хладостойкими являются сплавы алюминия, титана и меди.

Алюминий и его сплавы (см. подгруппу 1211, а также 1342) остаются вязкими вплоть до –269 °С (температура жидкого гелия); они применяются для холодильных емкостей (обечайки, днища, фланцы, трубные решетки).

Титан и титановые сплавы не охрупчиваются до температур от –269 до –196 °С; в первом случае хорошо работают титан и α -сплавы, а во втором могут применяться и более прочные $\alpha + \beta$ -сплавы (см. группу 123). Титан и титановые сплавы широко используются для деталей и узлов летательных аппаратов.

Медь и ее сплавы (см. группу 124 и подгруппы 1343, 1344) не только не имеют порога хладноломкости, но их вязкость разрушения при охлаждении даже повышается; они применяются для трубных конструкций, крепежных деталей, сварных корпусов, работающих до температуры $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Коррозионно-стойкие стали и сплавы (164)

Коррозионно-стойкие пассивирующиеся стали и сплавы (1641)

Это высоколегированные хромистые ферритные и мартенситные, хромоникелевые и хромоникельмарганцевые аустенитные стали, титан и титановые сплавы, некоторые из низколегированных сталей. Все они пассивируются во многих средах, однако пассивное состояние исчезает в средах, содержащих мало кислорода и много ионов хлора.

Высокохромистые стали (ГОСТ 5632–72) устойчивы к коррозии при температуре до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ во влажной атмосфере, водопроводной и речной воде, в азотной и многих органических кислотах; в морской воде они подвержены коррозионному растрескиванию; малоуглеродистые стали (до 0,25 % углерода) хорошо свариваются. Из этих сталей изготавливаются лопатки гидротурбин, емкости, арматура, а также детали машин (шестерни, валы), работающие в коррозионной среде; из мартенситных сталей (например, 40X13) изготавливаются хирургические и бытовые режущие инструменты.

Высоколегированные хромоникелевые стали (ГОСТ 5632–72) хорошо работают в тех же средах, что и хромистые; их большим достоинством является хорошая технологичность при обработке давлением и сварке. Вместе с тем после нагрева до определенных температур (при обработке или эксплуатации) появляется склонность к межкристаллитной коррозии; уменьшение содержания углерода и связывание его более сильным карбидообразующим элементом, чем хром, снижают склонность к межкристаллитной коррозии. Широко применяются при изготовлении деталей штамповкой и сваркой (вакуумные камеры, оболочки, емкости, трубопроводы и т. п.) в самолето-, машино-, приборостроении, химической промышленности и др.

Титан и титановые сплавы, будучи металлами нормальной и высокой прочности (см. группу 123), сохраняют в отличие от вышеуказанных сталей пассивное состояние в неокислительных кислотах, морской воде, в горячих щелочах; во влажной атмосфере эта способность проявляется и при нагреве.

Безмедистые силумины и термически неупрочняемые деформируемые сплавы алюминия, будучи высокотехнологичными (см. подгруппы 1342 и 122 соответственно), благодаря пассивации также сохраняют коррозионную стойкость во влажной атмосфере, окислительных и органических кислотах; эти сплавы, однако, склонны к контактной коррозии.

К этой же подгруппе относятся так называемые атмосферокоррозионно-стойкие стали (см. группу 112) с добавками меди, фосфора и хрома; эти стали широко используются для несущих конструкций и ограждений промышленных сооружений, зданий, ЛЭП, мостов, ангаров и трубопроводов, эксплуатируемых на открытом воздухе.

Коррозионно-стойкие непассивирующиеся сплавы (1642)

Из сплавов такими являются медные сплавы (см. подгруппы 1241 и 1242), в состав которых входят электроотрицательные металлы; они стойкие в условиях равномерной атмосферной и морской коррозии, а также и во многих органических кислотах, однако появляющиеся ионы меди токсичны. Бронзы и латуни не подвержены кавитационной коррозии; вместе с тем последние, будучи в напряженном состоянии, склонны к коррозионному растрескиванию во влажной атмосфере, особенно при наличии аммиака.

7.2. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами (2)

Особыми физическими свойствами считаются магнитные, тепловые и электрические свойства.

7.2.1. Стали и сплавы с особыми магнитными свойствами (21)

Магнитно-мягкие стали и сплавы¹¹ (221)

Таковыми являются стали и сплавы, обладающие высокой начальной магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой (малыми потерями на перемагничивание).

К этой группе относят нелегированную электротехническую сталь (ГОСТ 3836–83) и легированные электротехнические (кремнистые) стали (ГОСТ 21427–83); они применяются в виде листов малой толщины в электротехнике для изготовления силовых трансформаторов, магнитных цепей электрических машин и других подобных деталей, работающих при частотах до 400 Гц.

Прецизионные железоникелевые сплавы (пермаллои) обеспечивают получение больших значений индукции в очень слабых полях (ГОСТ 10160–75). Они широко используются в радио- и телефонной технике при частотах до 25 кГц; сплавы с большой остаточной индукцией (с прямоугольной петлей гистерезиса) применяются в вычислительной технике и устройствах автоматического управления.

В качестве порошковых магнитно-мягких применяются также сплавы типа альсифер (Fe-Si-Al).

¹¹ В качестве магнитно-мягких применяются также ферромагнитные и неметаллические соединения – ферриты; большая часть ферритов – шпинели.

Магнитно-твердые стали и сплавы (212)

Эти стали и сплавы используются для изготовления постоянных магнитов (имеют большую остаточную индукцию и коэрцитивную силу).

Деформируемыми магнитно-твердыми являются высокоуглеродистые (больше 1 %) стали (см. подкласс 31). Более высокие магнитные характеристики обеспечиваются на специальных легированных сталях типа Е (ТУ14-1-4487–88). К деформируемым магнитно-твердым относятся сплавы на основе системы Fe-Cr-Co (ГОСТ 24897–81); из них изготавливаются постоянные магниты для активной части роторов гистерезисных электродвигателей, для элементов памяти, носителей магнитной записи информации.

Литыми магнитно-твердыми являются сплавы Fe-Ni-Al типа альни, в том числе с кобальтом (ГОСТ 17809–72); эти сплавы используются для магнитов измерительных приборов, автоматических и акустических устройств, электрических машин, магнитных муфт, тормозов. Эти же сплавы используются для получения изделий методами порошковой металлургии (ГОСТ 21559–76); порошковые магниты применяются в узлах, работающих при ударах и вибрационных нагрузках. В качестве магнитно-твердых используются также порошки сплавов на основе кобальта с редкоземельными металлами; из них изготавливают магниты малых размеров для точных приборов.

7.2.2. Сплавы с особыми тепловыми свойствами (22)

Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения (221)

К этой группе относятся сплавы железа с никелем типа инвар (ГОСТ 10994–74); они применяются для изготовления деталей узлов и приборов, от которых требуется постоянство размеров при изменении температуры, а также для создания контактных пар с различными стеклами, керамикой.

Сплавы с заданным температурным коэффициентом модуля упругости (222)

Эту группу составляют также железоникелевые сплавы типа элинвар (ГОСТ 10994–74); они применяются для изготовления упругих элементов точных приборов и механизмов (пружины, спирали, камертоны, сиффоны, резонаторы и т. п.).

7.2.3. Металлы и сплавы с особыми электрическими свойствами (23)

К числу указанных относятся проводниковые металлы и сплавы (удельное сопротивление не более $0,1 \cdot 10^{-6}$ Ом), припой, контактные сплавы и сплавы с высоким электрическим сопротивлением.

Металлы и сплавы с высокой проводимостью (231)

В качестве проводниковых применяются, прежде всего, чистые металлы: медь, алюминий, железо.

Медь проводниковая ММ, МТ (ГОСТ 859–78); она используется в виде проката: проволока, шины, полосы, прутки. Медь применяется для обмоточных проводов, кабельных изделий, контактных проводов, коллекторных пластин. Для изделий повышенной прочности и износостойкости применяются латуни (см. группу 124) и бронзы с кадмием и бериллием.

Алюминий проводниковый (ГОСТ 4784–97) используется в виде проволоки для приборов воздушных линий, в производстве кабелей и токонесящих проводов; из него изготавливается также конденсаторная фольга. При необходимости обеспечения большей прочности используются сплавы с добавками магния и кремния (см. подгруппу 1211).

Железо проводниковое – это низкоуглеродистые (до 0,15 % С) качественные стали (см. подгруппу 1112), а также стали обыкновенного качества (см. подгруппу 111); из них изготавливают токопроводящие шины, электроды для печей-ванн.

Биметаллы – стальной проводник (проволока, шина), покрытый медью; применяется при передаче переменных токов повышенной частоты в линиях электропередач, а также в различной аппаратуре.

Припои (232)

Это сплавы, служащие для соединения элементов; они обеспечивают высокую проводимость или герметичность.

Для низкотемпературной пайки (до 400 °С) в приборостроении используются оловянно-свинцовистые и оловянно-цинковые припои (ГОСТ 21931–76); первые применяются для пайки очень тонких проводов из меди и медных сплавов, вторые – для пайки алюминия и его сплавов.

Для высокотемпературной пайки используется медь, медно-цинковые, а также медно-фосфористые и медно-серебряные сплавы; они обеспечивают более прочные соединения проводниковых элементов.

Контактные металлы и сплавы (233)

Это сплавы для обеспечения электрического контакта (постоянного, периодического, скользящего).

Для высоконагруженных контактов применяются тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден), сплавы на их основе в порошковых композициях; из металлов изготавливают часто переключающиеся контакты, а из сплавов – мощные контакты, работающие в инертной среде или вакууме. Для слабонагруженных контактов при небольшой частоте переключений применяются благородные металлы, в частности серебро.

Для скользящих контактов применяют порошковые композиции из меди или серебра с добавками графита, а также внутренне окисленные серебряно-медные сплавы.

Для неподвижных контактов применяют медь, латунь (см. подгруппу 124), цинк.

Сплавы с высоким сопротивлением (234)

Реостатные сплавы – сплавы меди с никелем, марганцем. Например, никелин, константан, манганин и другие (ГОСТ 492–73) изготавливаются в виде проволоки и ленты; используются (до 500 °С) для изготовления катушек сопротивлений, шунтов, резисторов, термопар, датчиков и т. п.

Сплавы высокого сопротивления (ГОСТ 10994–74) работают до 1200 °С и аналогичны по составу жаростойким сплавам (см. подгруппу 161). Из них изготавливают нагревательные элементы, в том числе для мощных промышленных печей. При более высоких температурах используются сплавы на основе тугоплавких металлов.

7.3. Стали и сплавы инструментальные (3)

В этот класс входят стали и сплавы для режущего, измерительного инструментов и инструментов по обработке металлов давлением (штампованные стали для холодного и горячего деформирования).

7.3.1. Стали и сплавы для режущих инструментов (31)

Для обработки резанием применяются: углеродистые стали (теплостойкость до 200 °С), легированные стали (до 200–260 °С), быстрорежущие стали (до 260–640 °С) и твердые сплавы (до 900–1000 °С).

Стали с пониженной прокаливаемостью (311)

Эту группу составляют нелегированные (углеродистые) инструментальные стали; они могут быть качественными и высококачественными (ГОСТ 1435–99); из них изготавливают мелкие инструменты (сечением до 25 мм с незакаленной сердцевиной), такие как сверла, метчики, развертки, напильники, ножовки, топоры и др. В эту же группу входят стали с небольшим содержанием легирующих элементов (хром, ванадий при повышенном содержании марганца). В случае динамического нагружения и необходимости обеспечения соответствующего уровня ударной вязкости используются менее углеродистые (0,7–0,8 % С) стали – слесарные, кузнечные, деревообрабатывающие инструменты.

Стали с повышенной прокаливаемостью (312)

В эту группу входят легированные инструментальные стали, используемые для обработки металлов и др. материалов в холодном состоянии

(ГОСТ 5950–2000); они разделяются на стали с небольшой прокаливаемостью (0,4–0,7 % Cr, 0,15–0,3 % V) и повышенной прокаливаемостью (до 12 % Cr при наличии марганца, кремния, ванадия, вольфрама).

Стали с небольшой прокаливаемостью аналогичны углеродистым, но из них можно изготавливать инструменты больших размеров и более сложной формы: фрезы, сверла, протяжки, резьбонарезной инструмент и другие; они часто применяются для инструментов, подвергаемых поверхностной (местной) закалке. Стали с повышенной прокаливаемостью (с большим содержанием хрома и добавками марганца, кремния, вольфрама) применяются для инструментов больших (до 100 мм) сечений: метчики, плашки, развертки, фрезы, протяжки и др.

Быстрорежущие стали (313)

Это высоколегированные и теплостойкие стали (ГОСТ 19265–73), наиболее характерные для режущего инструмента; их марочное обозначение начинается с буквы Р. Они подразделяются на стали нормальной (вольфрамовые и вольфраммолибденовые) и повышенной (с добавками кобальта и содержанием ванадия до 3 %) производительности. Стали нормальной производительности применяются для инструментов чистовой обработки конструкционных и инструментальных углеродистых и легированных сталей; из них изготавливают фасонные резцы, сверла, развертки, протяжки, фрезы, и др. Стали с повышенной производительностью используются в основном для обработки высокопрочных сталей, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей с аустенитной структурой, а также других труднообрабатываемых материалов; из них изготавливают все виды инструментов для черновой и получистовой обработки: сверла, долбяки, фрезы и пр.

Твердые стали (314)

Твердые сплавы (ГОСТ 3882–74) – это спеченные порошковые материалы из высокотвердых тугоплавких карбидов со связующими – никелем, кобальтом; они разделяются на вольфрамовые (ВК), титановольфрамовые (Т) и титанотанталовольфрамовые (ТТ). По режущим свойствам твердые сплавы превосходят быстрорежущие стали и применяются для обработки резанием с высокими скоростями; из них, как правило, изготавливают пластины, которыми оснащают резцы, сверла, фрезы и другие инструменты.

Вольфрамовые сплавы с пониженным содержанием кобальта применяются для обработки материала, дающего прерывистую стружку (чугун, цветные металлы, минералы), а при повышенном содержании кобальта – для горных инструментов. Титановольфрамовые сплавы применяют преимущественно для скоростного резания сталей; титанотанталовольфрамовые же сплавы используют в особо тяжелых условиях резания (черновой обработке стальных слитков, отливок, поковок).

В промышленности получают также распространение сверхтвердые инструментальные материалы на основе алмаза (баллас, карбонадо), нитрида бора (эльбор) и минералокерамики (оксидной, оксикарбидной и оксинитридной)¹².

7.3.2. Стали для измерительных инструментов (32)

Для измерительных инструментов применяются некоторые из инструментальных углеродистых и легированных сталей (см. подкласс 31); наиболее широко используются заэвтектоидные и сравнительно малолегированные стали, в частности, малодеформируемые при закалке. Плоские инструменты (скобы, линейки, шаблоны) могут изготавливаться из низкоуглеродистых и низколегированных (цементируемых) сталей. Для инструментов сложной формы и небольшого размера применяют азотируемые стали.

7.3.3. Стали для формообразующих инструментов (штамповые) (33)

Из этих сталей изготавливают штампы холодного и горячего деформирования.

Стали штамповые для холодного деформирования (331)

Многообразие технологических операций холодного деформирования обусловило определенную специализацию этих сталей (ГОСТ 5950–2000).

Стали высокохромистые высокоуглеродистые (типа X12) с добавками молибдена или вольфрама и ванадия составляют группу сталей повышенной (высокой) износостойкости и используются при изготовлении инструментов для вырубки и пробивки высокопрочных материалов (накатки, вставки вытяжных и формовочных штампов, матрицы и корпуса составных пуансонов).

Стали комплексно-легированные менее углеродистые вторично-твердеющие составляют группу сталей с высоким сопротивлением смятию; будучи более теплостойкими, они используются для инструментов, претерпевающих разогрев рабочей поверхности до 400 °С (объемное прессование, резка, высадка, калибровка).

Стали с пониженным содержанием углерода, легированные марганцем, хромом, молибденом (вольфрамом) и ванадием составляют группу сталей высокой прочности с повышенной ударной вязкостью; будучи менее теплостойкими, они применяются для инструментов, претерпевающих разогрев до 200 °С (прецизионная вырубка, пробивка, вытяжка и формовка изделий из низкоуглеродистых сталей и цветных сплавов). В эту группу входят также более теплостойкие стали с повышенным содержанием вольф-

¹² См. также классификацию неметаллических машиностроительных материалов.

рама (молибдена) и ванадия, что расширяет область их применения (инструменты ударного выдавливания и высадки).

В качестве армирующего материала в штампах холодного деформирования применяются также твердые сплавы (вытяжные матрицы, матрицы и пуансоны выдавливания, в том числе ударного).

Стали штамповые для горячего деформирования (322)

По характеру легирования и сочетанию основных свойств стали для горячего деформирования разделяются на три группы.

Хромоникельмолибденовые (вольфрамовые) среднеуглеродистые стали высокой прокаливаемости (типа 5ХНМ) – стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости; предназначаются для работы в условиях ударного нагружения при разогреве порядка 500–550 °С (кубики и вставки молотовых штампов).

Комплекснолегированные (безникелевые) среднеуглеродистые дисперсионно-твердеющие стали с большей теплостойкостью (до 600–650 °С) и прочностью – стали повышенной теплостойкости; используются для небольших молотовых штампов (рабочие вставки) при деформировании сталей и сплавов повышенной прочности.

Комплекснолегированные высоковольфрамомолибденовые (сумма от 3–6 до 12–18 %) среднеуглеродистые стали с карбидным упрочнением и высокими рабочими температурами (порядка 690–700 °С) – стали высокой теплостойкости; используются для изготовления инструментов горячего прессования (матрицы, рабочие вставки для тяжелонагруженных штампов). В эту группу входят и стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением, сохраняющие достаточно высокую прочность и удовлетворительную пластичность при разогреве до 720–750 °С.

Одним из направлений повышения стойкости ручьев штампов горячей высадки является применение в качестве инструментального материала твердых сплавов.

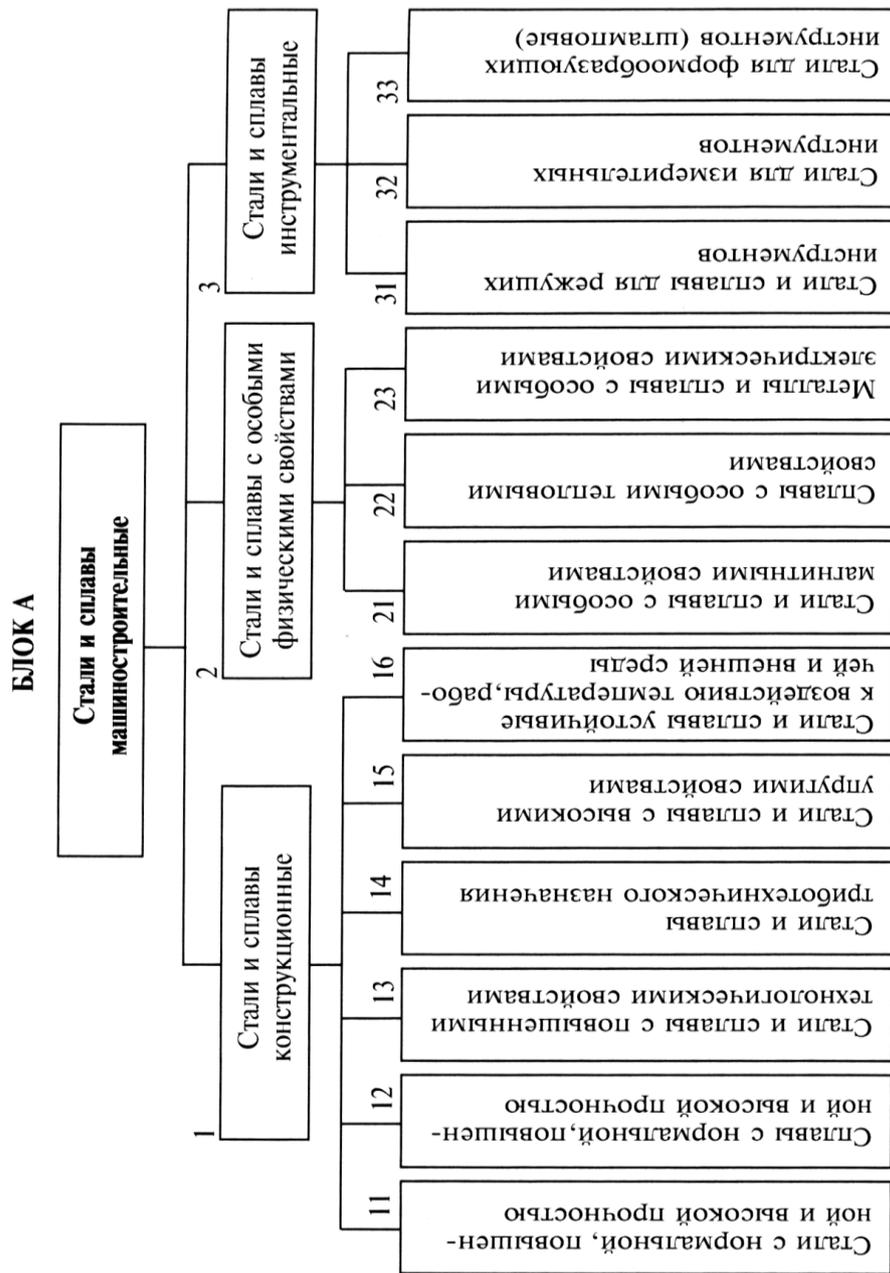
Повышение стойкости инструмента можно достичь нанесением износостойких покрытий методами КИБ (конденсация при ионной бомбардировке), РЭП (реактивное электронно-плазменное напыление) и др. [24]. Стойкость неперетачиваемого инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов, а также других видов инструмента может быть повышена в несколько раз при нанесении тонких слоев карбидов, нитритов, оксидов, оксикарбидов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольштейн, М.И. Специальные стали / М.И. Гольштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М., 1985.
2. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М., 1977.
3. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – М., 1959.
4. Меськин, В.С. Основы легирования сталей / В.С. Меськин. – М., 1959.
5. Металловедение и термическая обработка стали: справочник / Под ред. М.Л. Бернштейна, А.Т. Рахштадта. – М., 1983.
6. Диаграмма состояния двойных систем: справочник / Под ред. Лякишева. – М., 2003.
7. Зоткин, В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении / В.Е. Зоткин. – М.: Форум-Инфра, 2011.
8. Марочник сталей / Под ред. А.С. Зубченко, 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Классификация машиностроительных сталей и сплавов на железной основе (блок А – классы и подклассы, блоки Б-Н – группы и подгруппы)



БЛОК Б

11

**Стали с нормальной, повышенной
и высокой прочностью**

111

**Стали
углеродистые
конструкционные**

112

**Стали
низколегированные
конструкционные**

113

**Стали
легированные
конструкционные**

1111

**Стали
обыкновен-
ного
качества**

1112

**Стали
качественные
углеродистые**

1131

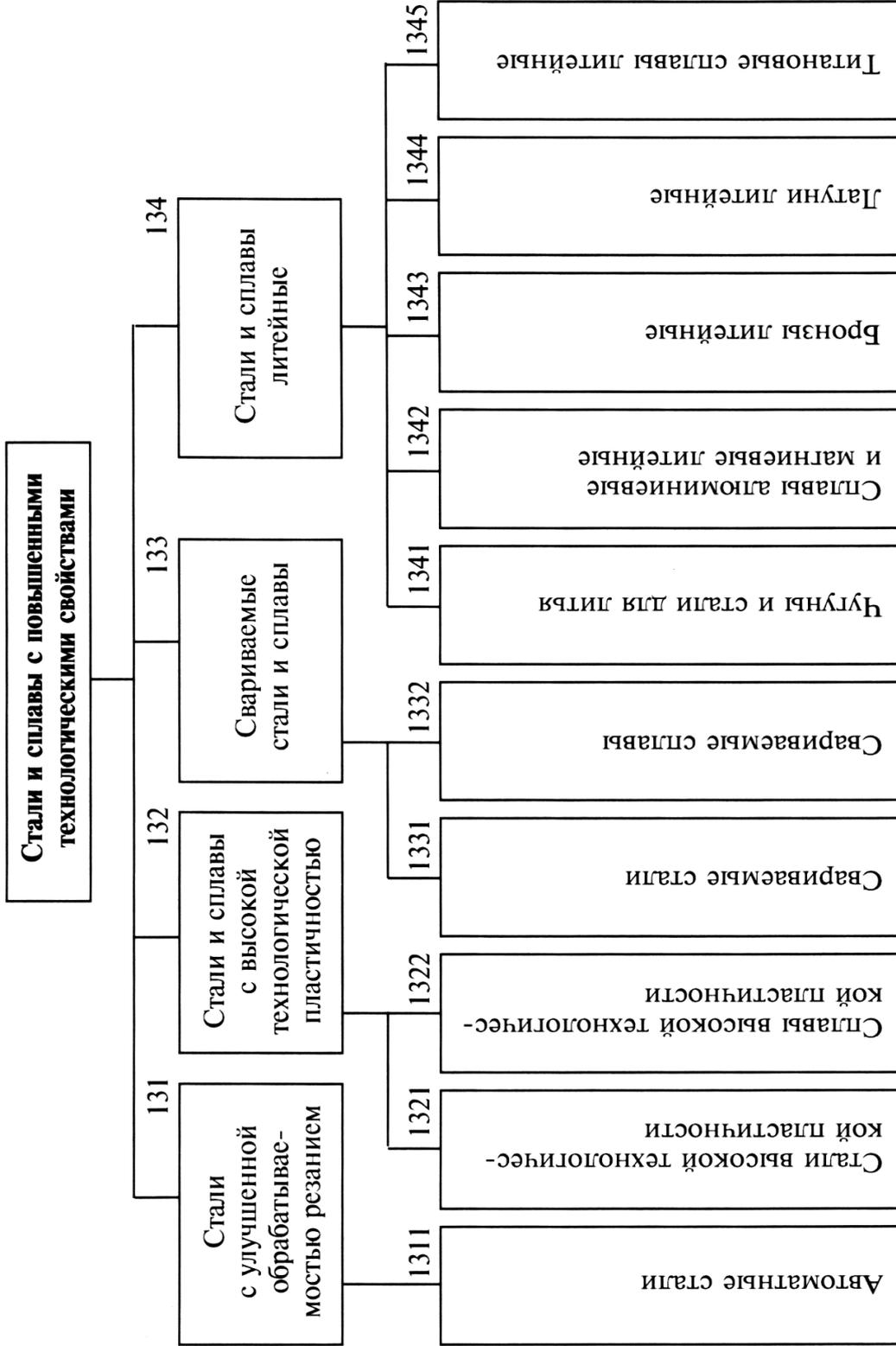
**Стали
нормальной
и повышенной
прочности**

1132

**Стали
высоко-
прочные**

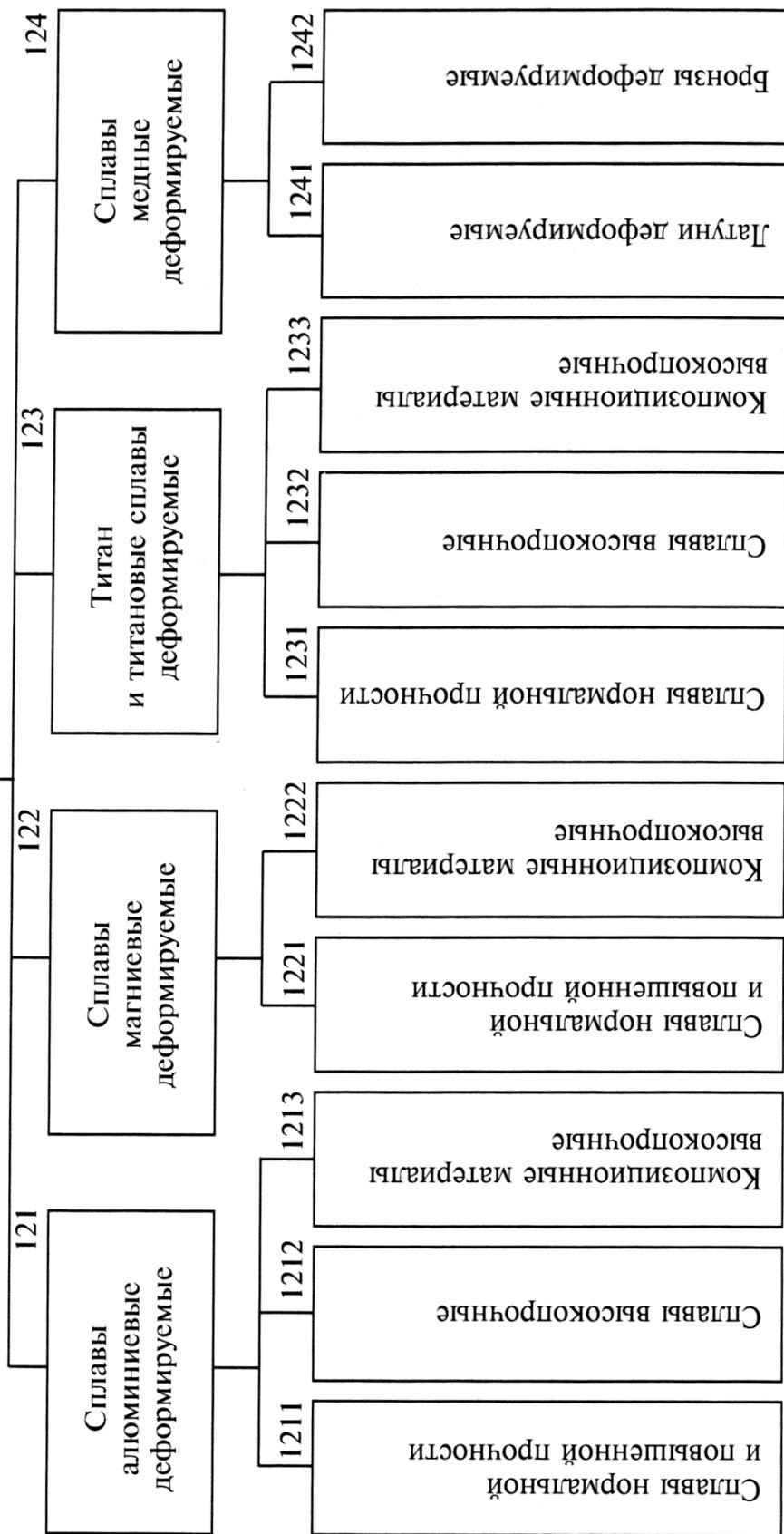
БЛОК Г

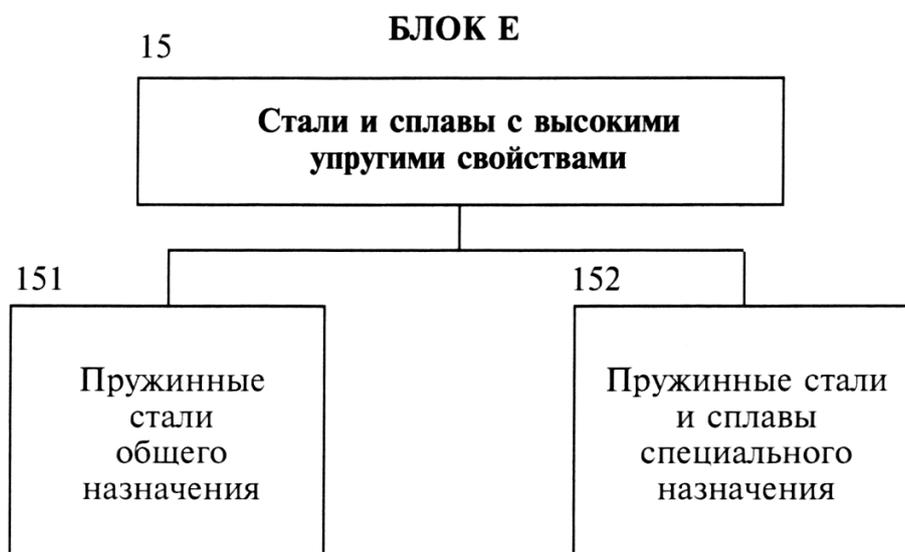
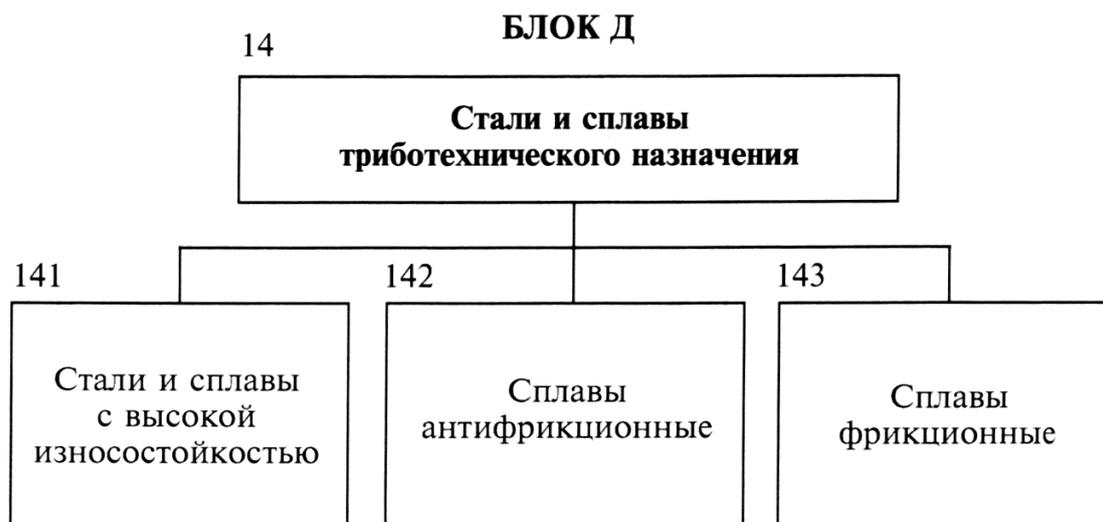
13



12 БЛОК В

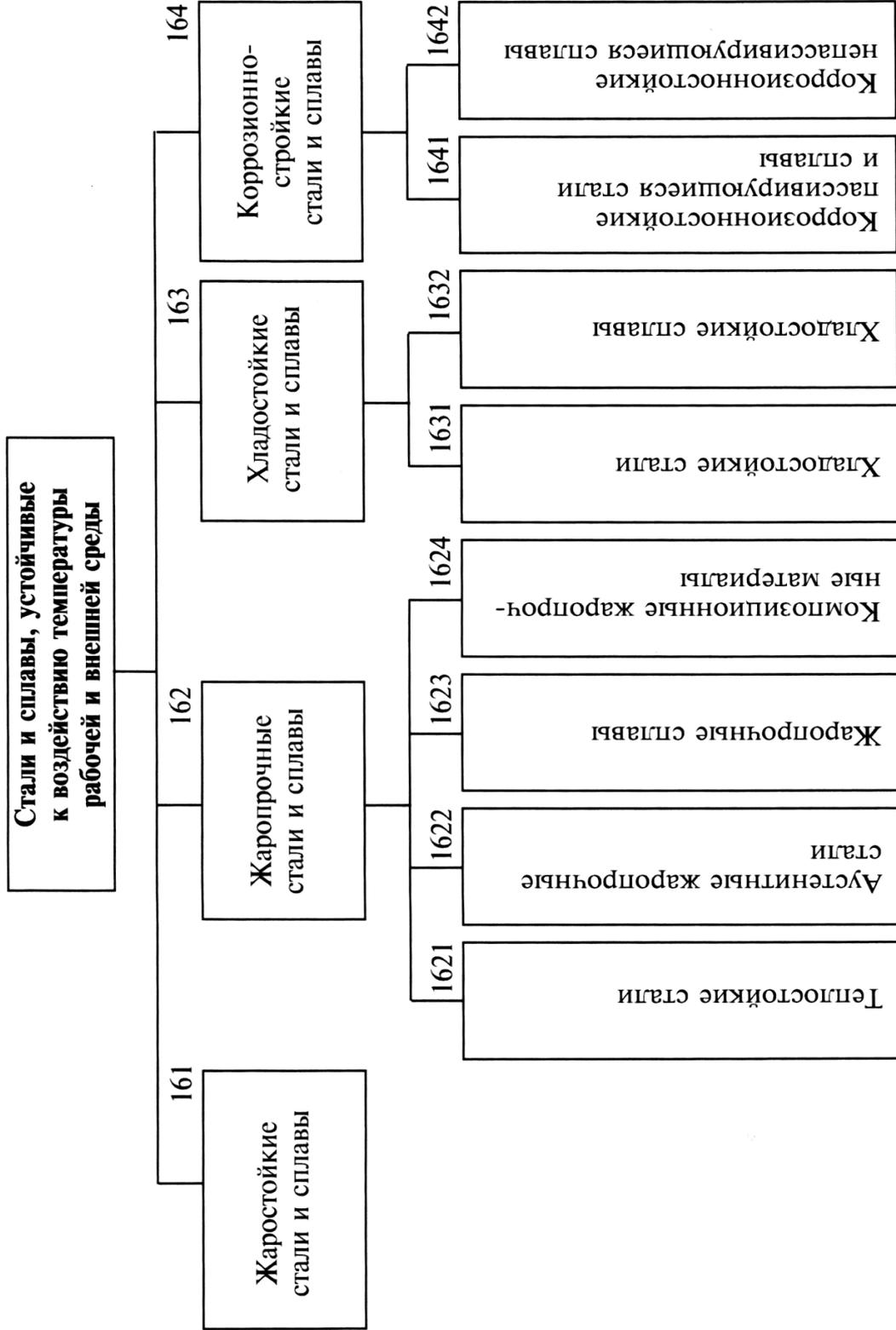
Сплавы с нормальной, повышенной и высокой прочностью





БЛОК Ж

16



21

БЛОК З

**Стали и сплавы
с особыми магнитными свойствами**

211

Магнитно-мягкие
стали и сплавы

212

Магнитно-твердые
стали и сплавы

22

БЛОК И

**Сплавы
с особыми тепловыми свойствами**

221

Сплавы с заданным
температурным
коэффициентом
линейного
расширения

222

Сплавы с заданным
температурным
коэффициентом
модуля упругости

23

БЛОК К

**Металлы и сплавы
с особыми электрическими свойствами**

231

Металлы
и сплавы
с высокой
проводимостью

232

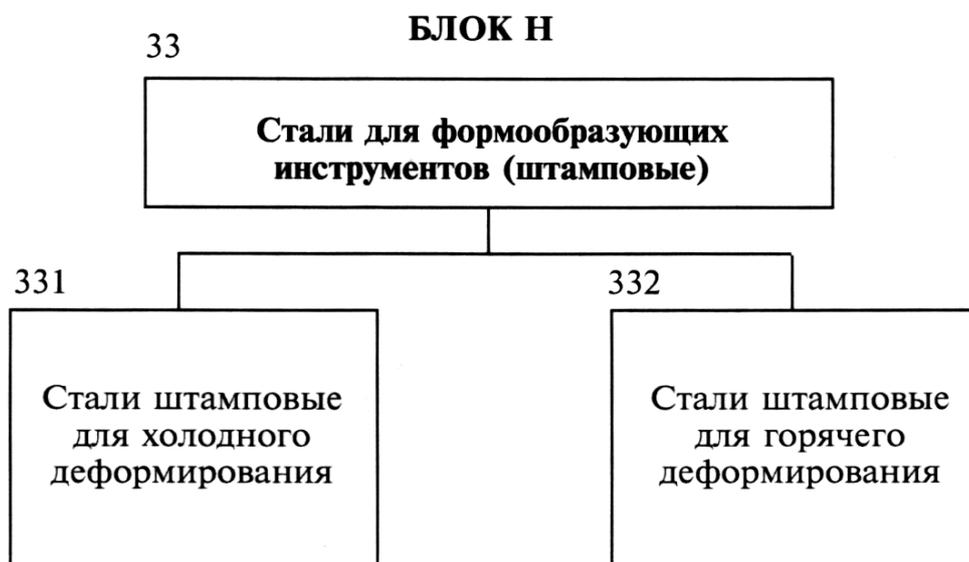
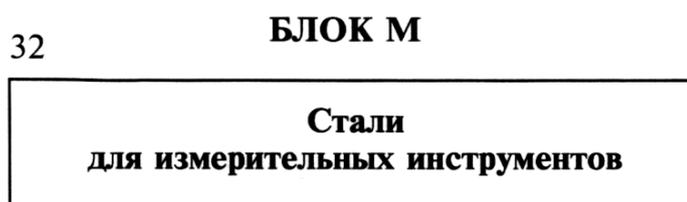
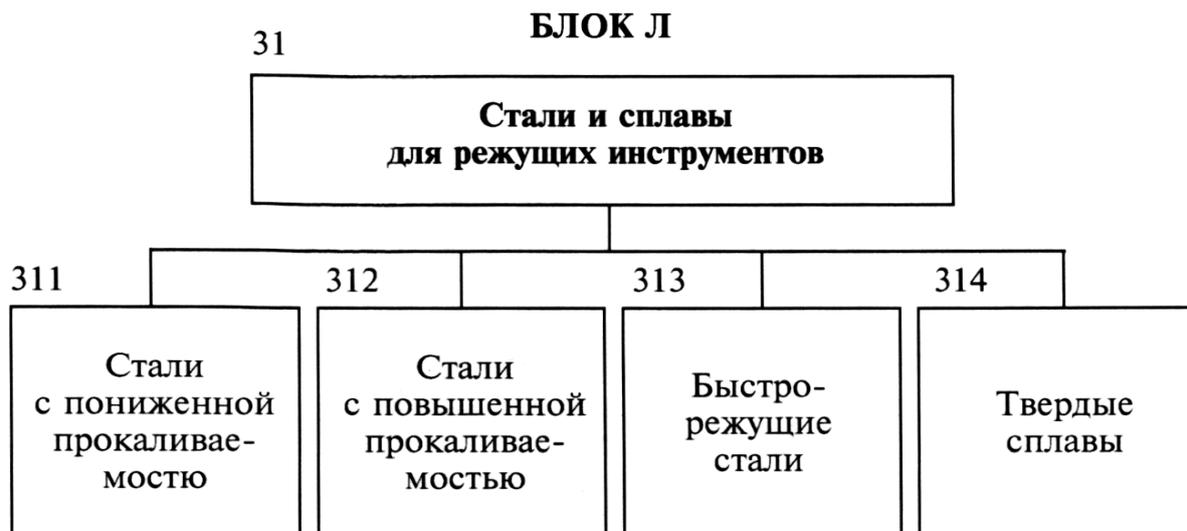
Припой

233

Контактные
металлы
и сплавы

234

Сплавы
с высоким
электросопротивлением



Учебное издание

Зоткин Виктор Ефимович
Литвинова Надежда Николаевна

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Учебное пособие

Техн. редактор *А.В. Миних*
Компьютерная верстка *А.В. Старковой*
Дизайн обложки *А.С. Шахрай*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 21.12.2015. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 4,42. Тираж 50 экз. Заказ 755/745.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.