

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ (МАШИНОПОДЕЛЬНЫЕ) МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

8. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Сталь – основной металлический материал, широко применяемый для изготовления деталей машин, газовых аппаратов, приборов, различных энергетических и строительных и других конструкций. Широкое использование сталей обусловлено комплексом механических, физико-химических и технологических свойств.

Стали сочетают высокую жесткость с достаточной статической и циклической прочностью. Эти параметры можно менять в широком диапазоне за счет изменения концентрации углерода, легирующих элементов и технологий термической и химико-термической обработки. Изменяя химический состав, можно получать стали с различными свойствами и использовать их во многих отраслях техники и народного хозяйства.

Углеродистые стали классифицируют по содержанию углерода, назначению, качеству, степени раскисления и структуре в равновесном состоянии.

По содержанию углерода стали подразделяются на низкоуглеродистые ($< 0,3\% \text{ C}$), среднеуглеродистые ($0,3 — 0,7\% \text{ C}$) и высокоуглеродистые ($> 0,7\% \text{ C}$).

По назначению стали классифицируют на конструкционные и инструментальные. Конструкционные стали представляют наиболее обширную группу, предназначенную для изготовления строительных сооружений, деталей машин и приборов. К этим сталям относят цементуемые, улучшаемые, высокопрочные и рессорно-пружинные. Инструментальные стали подразделяют на стали для режущего, измерительного инструмента, штампов холодного и горячего (до 200°C) деформирования.

По качеству стали классифицируют на обыкновенного качества, качественные, высококачественные. Под качеством стали понимается совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства. Однородность химического состава, строения и свойств стали, а также ее технологичность во многом зависят от содержания газов (кислорода, водорода, азота) и вредных примесей — серы и фосфора. Газы являются скрытыми, количественно трудно определяемыми примесями,

поэтому нормы содержания вредных примесей служат основными показателями для разделения сталей по качеству. Стали обыкновенного качества содержат до 0,06% S и 0,07% P, качественные — не более 0,04% S и 0,035% P, высококачественные — не более 0,025% S и 0,025% P. Стали обыкновенного качества бывают только углеродистыми (до 0,5% C), качественные и высококачественные — углеродистыми и легированными.

По степени раскисления и характеру затвердевания стали классифицируют на спокойные, полуспокойные и кипящие. Раскисление — процесс удаления из жидкого металла кислорода, проводимый с целью предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации.

Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовыделения. Кипящие стали раскисляют марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное содержание кислорода, который при затвердевании частично взаимодействует с углеродом и удаляется в виде CO. Выделение пузырьков CO создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название. Кипящие стали достаточно дешевые, их производят низкоуглеродистыми и практически без кремния ($Si < 0,07\%$), но с повышенным количеством газовых примесей.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Легированные стали производят спокойными, углеродистые — спокойными, полуспокойными и кипящими.

По структуре в равновесном состоянии стали делятся на:

- 1) доэвтектоидные, имеющие в структуре феррит и перлит;
- 2) эвтектоидные, структура которых состоит из перлита;
- 3) заэвтектоидные, имеющие в структуре перлит и цементит вторичный.

8.2. ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ ПРИМЕСЕЙ НА УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Получаемая в промышленности углеродистая сталь имеет довольно сложный химический состав. Содержание железа в ней может быть в пределах 97,0—99,5% и попадает некоторое количество элементов, связанное с технологией производства (марганец, кремний) или невозможностью полного их удаления из состава металла (сера, фосфор, кислород, азот, водород), случайные примеси (хром, никель, медь) и, кроме того, некоторые неметаллические включения.

В зависимости от способа выплавки (конверторный, мартеновский и крайне редко — в электропечах) стали различаются содержанием примесей.

Метод получения стали в электропечах используют только для выплавки конструкционных, высоколегированных, инструментальных, специальных сталей и сплавов, так как он наиболее дорогой.

Постоянными примесями в стали считаются такие, которые попадают в нее в процессе получения, разливки, а также из исходных материалов, топлива, футеровки печей и атмосферы.

Как видно из диаграммы состояния железо—углерод, феррит составляет основную фазу стали. Наличие в феррите растворенного в нем марганца, усиливает металлическую связь в его кристаллической решетке, вследствие чего возрастают значения модуля Юнга (модуля продольной упругости) и модуля сдвига.

Марганец в виде оксида MnO_2 — пиролюзита — постоянно находится в железных рудах, следовательно, он присутствует в сталях и чугунах. Марганец также попадает в стали при раскислении ее ферромарганцем при выплавке, часть марганца взаимодействует с основными компонентами стали и в процессе кристаллизации переходит в ее фазовые составляющие — феррит и цементит.

Аналогично воздействует на свойства стали кремний, растворяющийся только в феррите. Кремний в виде соединения SiO_2 — кремнезема — всегда имеется в железной руде (эту часть руды называют пустой породой). К раскислителям, которыми пользуются при выплавке стали, относится кремний, содержащий материал — ферросилиций, активно вступающий с закисью железа в реакцию обмена. Поэтому присутствие небольшого количества кремния в стали также является технологически неизбежным.

На основе вышесказанного, все марки конструкционной углеродистой стали содержат 0,3—0,8% Mn и 0,17—0,37% Si. За счет этого твердость феррита по Бринеллю в данной стали составляет HB 60—80 МПа, а у чистого феррита — около HB 100.

К постоянным примесям в стали относятся фосфор и сера. Эти элементы оказывают существенное влияние на механические, технологические и другие свойства стали, поэтому их количество в различных марках строго регламентируется.

Фосфор попадает в сталь из руды, топлива и флюсов, используемых в металлургическом производстве. В большинстве случаев фосфор, находящийся в стали, растворяется в кристаллической решетке феррита и за счет ликвации располагается по границам зерен. Это приводит к снижению пластичности и существенно охрупчивает сталь, повышает температуру перехода в хрупкое состояние, т.е. фосфор придает стали хладноломкость. Из-за этого количество фосфора в стали может находиться в пределах 0,01—0,07%.

Сера присутствует в небольших количествах в железных рудах и металлургическом топливе и поэтому попадает в сталь во время

металлургического процесса. Сера находится в стали в связанном состоянии в виде механических примесей (FeS и MnS), которые по-разному взаимодействуют с компонентами стали и соответственно влияют на ее свойства. Сульфид железа образует с железом легкоплавкую эвтектику ($t_{нл} = 988 \text{ }^\circ\text{C}$), которая располагается по границам зерен, и существенно снижает прочность и пластичность стали. Это отрицательно сказывается при технологической обработке стали в горячем состоянии ($800\text{—}1200^\circ\text{C}$) и проявляется в виде явления красноломкости. Температура плавления MnS существенно выше 1620°C и присутствует в стали в виде мелких включений, которые не оплавляются в процессе ее обработки. Количество серы вызывает охрупчивание стали и поэтому содержание ее жестко отслеживается. Для ответственных деталей содержание серы может быть не более $0,03\text{—}0,04\%$, а в обычных сталях допускается $0,05\%$.

Из вышесказанного ясно, что постоянные примеси — марганец и кремний — оказывают в какой-то степени положительное влияние на механические свойства стали, а фосфор и сера ухудшают их и являются очень вредными примесями.

При выплавке и разливке стали в нее из окружающей атмосферы попадают кислород, азот, водород и другие газы.

Кислород в кристаллической решетке железа не растворяется, поэтому в стали он присутствует в виде зерен оксидов железа FeO, Fe₂O₃ и других элементов. Эти неметаллические включения снижают прочностные и пластические свойства стали.

Азот в очень малых количествах способен растворяться в феррите, упрочняя и одновременно охрупчивая его. Некоторое количество азота в стали образует с железом нитриды, которые располагаются в стали в виде включений и также охрупчивают ее.

При выплавке стали в нее попадает водород, растворяется в ней и, так как он не образует с железом гидридов, выходит из нее по мере снижения температуры. Некоторое количество оставшегося водорода в стали охрупчивает ее. Этот нерастворившийся водород в стали образует флокены (микроскопические трещины). В изломе эти флокены видны как хлопьеобразные серебристые пятна. Этот дефект снижает прочность и пластичность стали и исключает ее использование как конструкционного материала.

Включения оксидов MnO, SiO₂ и Al₂O₃, а также некоторых других элементов могут образовываться в стали как продукты реакций раскисления на определенном этапе выплавки, а также попасть в нее из футеровки печей. Все неметаллические примеси существенно ухудшают металлургическое качество стали и снижают ее механические свойства.

8.3. ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Главным элементом стали является углерод и это единственная примесь, которая специально вводится в сталь. С повышением содержания углерода прочность стали существенно возрастает из-за увеличения количества цементита в фазовом составе стали.

К низкоуглеродистым относятся стали, содержащие до 0,25% С. Это достаточно мягкие, пластичные, хорошо деформируемые в холодном и горячем состоянии стали.

Среднеуглеродистые стали содержат 0,3—0,6% С. Они обладают хорошими прочностными свойствами при небольшой пластичности и вязкости. Стали с таким содержанием углерода являются широко распространенным конструкционным материалом для деталей, работающих в условиях обычных силовых нагрузок.

Высокоуглеродистые стали содержат свыше 0,6% С (до 1,3—1,4%), за счет чего они обладают высокой твердостью и очень низкой пластичностью и вязкостью. При содержании углерода больше 1,3% в стали значительно возрастает хрупкость и использование ее становится очень ограниченным.

Стали с содержанием углерода более 0,7% в основном используются в штампово-инструментальном производстве холодного и горячего деформирования. Кроме того, из этих сталей изготавливают еще режущий и мерительный инструменты, применяемые в различных областях народного хозяйства.

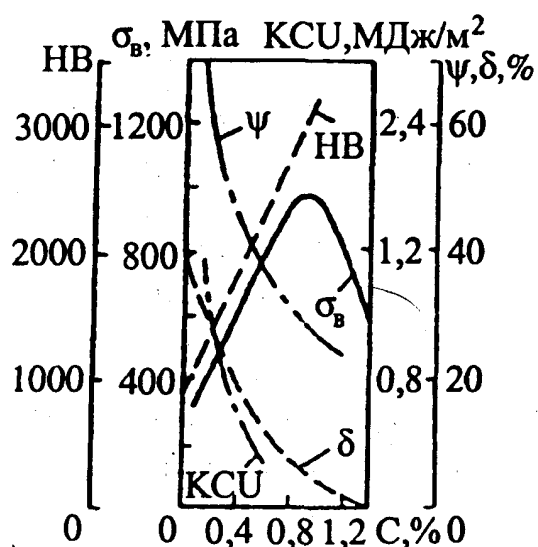


Рис.8.1.- Влияние углерода на свойства горячекатаных сталей

Как уже было сказано, увеличение количества углерода соответственно увеличивает и количество цементита в стали, который отличается высокой твердостью и хрупкостью. Значит, можно сказать, что с повышением содержания углерода увеличиваются прочность и твердость, а пластичность и вязкость снижаются (рис.8.1).

Кроме снижения ударной вязкости, углерод заметно повышает верхний порог хладноломкости, расширяя тем самым температурный интервал перехода стали в хрупкое состояние (рис.8.2). Каждая одна десятая процента углерода повышает температуру перехода приблизительно на 20°C. При содержании углерода 0,4% порог хладноломкости равен 0°C. При большей концентрации углерода температура хрупкости достигает 20°C: сталь становится менее используемой в работе.

Особенно сильно сказывается влияние углерода при неравновесной структуре стали. После закалки на мартенсит временное сопротивление легированных сталей резко увеличивается с ростом углерода и достигает максимального значения при 4% С.

Как видно из рис.8.3, при большом содержании углерода σ_s теряет стабильность из-за хрупкого разрушения стали. В этих сталях может быть достаточно высокое содержание вредных примесей, а также газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями, так как их выплавляют по массовым технологиям. Эти стали относятся к дешевым материалам, но при этом в них сочетаются неплохие механические свойства с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением, в чем они превосходят даже легированные стали (при одинаковом содержании углерода). Углеродистые стали, в отличие от легированных, менее технологичны при термической обработке. Также необходимо отметить, что у этих сталей очень небольшая прокаливаемость (до 12 мм), что сужает резко размер деталей, которые можно упрочнить термической обработкой. Габаритные детали изготавливают из сталей без термической обработки — в горячекатаном или нормализованном состоянии, что увеличивает металлоемкость конструкций.

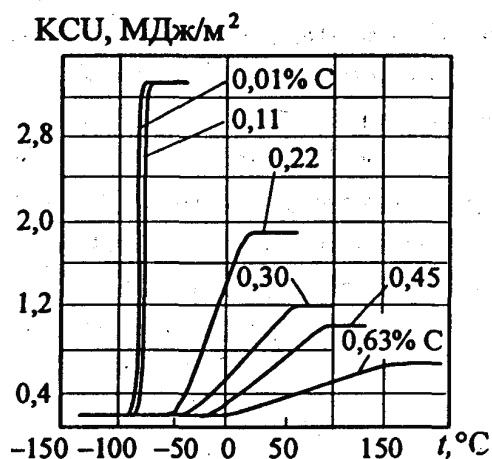


Рис.8.2 – Влияние углерода на хладноломкость

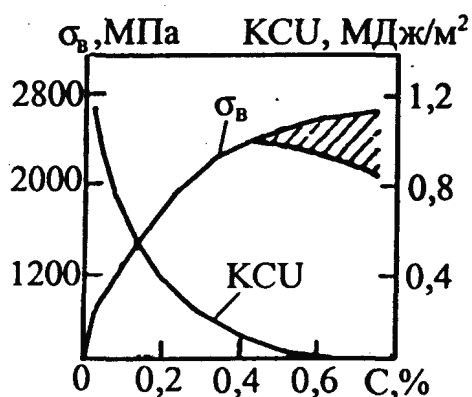


Рис.8.3 - Влияние углерода на свойства закаленных сталей

8.4. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ ОБЫЧНОГО КАЧЕСТВА

На углеродистую сталь обыкновенного качества установлен ГОСТ380-71. Эта сталь изготавливается в мартеновских печах (буква М при маркировке), в бессемеровских конверторах при продувке снизу (буква Б) и в конверторах при продувке кислородом сверху (буква К).

Стали обыкновенного качества применяют для строительных конструкций и неотчетственных деталей машин. Если из этой стали изготавливают сварные строительные конструкции, то в ней ограничивается содержание углерода, серы, фосфора, азота и других примесей, ухудшающих качество сварки.

Углеродистая конструкционная сталь обыкновенного качества выпускается в виде проката — листы, уголки, балки, прутки, трубы, швеллеры и т. п.) в нормализованном состоянии и в зависимости от назначения и комплекса свойств подразделяют на группы: А, Б, В.

Стали маркируются сочетанием букв Ст и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки, а не среднее содержание углерода в ней, хотя с повышением номера содержание углерода в стали увеличивается. Стали групп Б и В имеют перед маркой буквы Б и В, указывающие на их принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается. Степень раскисления обозначается добавлением индексов: в спокойных сталях — «сп», полуспокойных — «пс», кипящих — «кп», а категория нормируемых свойств (кроме категории 1) указывается последующей цифрой. В их составе разное содержание кремния: спокойные — 0,12—0,30, полуспокойные — 0,05—0,17; кипящие < 0,07, например СтЗсп, БСтЗпс или ВСтЗсп5 (в конце 5-я категория). Спокойными и полуспокойными производят стали Ст1—Ст6, кипящими — Ст1—Ст4 всех трех групп. Сталь Ст0 по степени раскисления не разделяют.

Стали группы А поставляются с гарантированными механическими свойствами (табл.8.1), без указания химического состава.

Таблица 8.1 - Маркировка конструкционной стали

ГОСТ	Группа	Наименование по способу производства	Марки
380-71	I Сталь, поставляемая по механическим свойствам (обыкновенного качества)	Бессемеровская Мартеновская	БСт.0; БСт.3кп; БСт.3; БСт.4кп; БСт.4; БСт.5; БСт.6 Ст.0; Ст.1; Ст.2; Ст.3кп; Ст.3; Ст.4; Ст.4а; Ст.5; Ст.6; Ст.7
	II Сталь, поставляемая по химическому составу (обыкновенного качества)	Бессемеровская Мартеновская	Б09кп; Б09; Б16кп; Б23; Б33 М09кп; М12кп; М18кп; М18; М21; М26; М31; М44; М56
	III Сталь поставляемая, одновременно по хирургическому составу и по механическим свойствам (повышенного качества)	Мартеновская	М09; М12; М16; М18а; М21а; М26а; М31а; М44а; М56а

Стали группы А используют в состоянии поставки для изделий, изготовление которых не сопровождается горячей обработкой. В этом случае они сохраняют структуру нормализации и механические свойства, гарантируемые стандартом.

Сталь марки Ст3 используется в состоянии поставки без обработки давлением и сварки. Химический состав этой группы сталей сильно колеблется. Ее широко применяют в строительстве для изготовления металлоконструкций.

Стали группы Б поставляют с гарантированным химическим составом, но механические свойства не гарантируются. Стали этой группы применяют для изделий, изготавливаемых с применением горячей обработки (ковка, сварка и в отдельных случаях термическая обработка), при которой исходная структура и механические свойства не сохраняются. Для таких сталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режима горячей обработки.

Стали группы В поставляются с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Стали группы В дороже, чем стали групп А и Б, их применяют для ответственных деталей (для производства сварных конструкций). В этом случае важно знать исходные механические свойства стали, так как они сохраняются неизменными в участках, не подвергаемых нагреву при сварке. Для оценки свариваемости важны сведения о химическом составе. Механические свойства на растяжение для каждой марки стали группы В соответствуют нормам для аналогичных марок стали группы А, а химический состав — нормам для тех же номеров марок группы Б (табл. 8.2). Например, сталь ВСт4сп имеет механические свойства на растяжение, аналогичные стали Ст4сп, а химический состав одинаковый со сталью БСт4сп.

Таблица.8.2 – Химический состав (%) углеродистой стали обыкновенного качества группы Б

Сталь	С	Мп	Si в стали			S	P
			кп	пс	сп		
БСт0	<0,23	—	—	—	—	0,06	0,07
БСт1	0,06—0,12	0,25—0,5	0,05	0,05—0,17	0,12—0,3	0,05	0,04
БСт2	0,09—0,15	0,25—0,5	0,05	0,05—0,17	0,12—0,3	0,05	0,04
БСт3	0,14—0,22	0,30—0,65	0,07	0,05—0,17	0,12—0,3	0,05	0,04
БСт4	0,18—0,27	0,40—0,70	0,07	0,05—0,17	0,12—0,3	0,05	0,04
БСт5	0,28—0,37	0,50—0,80	—	0,05—0,17	0,15—0,35	0,05	0,04
БСт6	0,38—0,49	0,50—0,80	—	0,05—0,17	0,15—0,35	0,05	0,04

Примечания: 1. В сталях БСт1—БСт6 допускается не более 0,3% С₂; 0,3% Ni; 0,3% Si; 0,08% As; 0,08 % N. 2. В сталях, выплавленных из керченских руд, допускается до 0,15% As и 0,05% P.

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов. Эти стали используются, когда работоспособность деталей и конструкций обеспечивается жесткостью. Углеродистые стали обыкновенного качества широко используются в строительстве при изготовлении железобетонных конструкций. Способностью к свариванию и к холодной обработке отвечают стали групп Б и В номеров 1-4, поэтому из них изготавливают сварные фермы, различные рамы и строительные металлоконструкции, кроме того, крепежные изделия, часть из которых подвергается цементации.

Среднеуглеродистые стали номеров 5 и 6, обладающие большой прочностью, предназначаются для рельсов, железнодорожных колес, а также валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных и сельскохозяйственных машин. Некоторые детали из этих сталей групп Б и В подвергаются термической обработке — закалке с последующим высоким отпуском.

8.5. УГЛЕРОДИСТЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ СТАЛИ

В машиностроении эти стали используются для изготовления деталей разного, чаще всего неотчетственного назначения и являются достаточно дешевым материалом. Они имеют более низкое содержание вредных примесей и неметаллических включений, чем стали обыкновенного качества. В промышленность эти стали поставляются в виде проката, поковок, профилей различного назначения с гарантированным химическим составом и механическими свойствами.

В машиностроении применяют углеродистые качественные стали, поставляемые по ГОСТ 1050-74. Содержание серы и фосфора в них допускается в пределах 0,03—0,04% каждого из элементов. Маркируются эти стали двузначными цифрами 05, 08, 10, 15, 20, ..., 75, 80, 85, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20 содержит в среднем 0,20% С, сталь 75 — 0,75% С и т.д.

К углеродистым сталям относят также стали с повышенным содержанием марганца (0,7—1,0%) марок 15Г, 20Г, 25Г, ..., 70Г, имеющих повышенную прокаливаемость (критический диаметр до 25—30 мм). В табл.8.3 приведены гарантируемые механические свойства после нормализации углеродистых качественных сталей.

Таблица 8.3 – Химический состав и механические свойства углеродистых качественных сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	Хром, не более	Механические свойства, не менее					НВ после отжига или высокого отпуска, не более
			σ_b , Мпа	σ_t , Мпа	δ , %	ψ , %	KCU^{+20} , МДж/м ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
08	0,05-0,01	0,10	330	200	33	60	-	131
10	0,07-0,14	0,15	340	210	31	55	-	143

Продолжение табл.8.3

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
15	0,12-0,19	0,25	380	230	27	55	-	149
20	0,17-0,24	0,25	420	250	25	55	-	163
30	0,27-0,35	0,25	500	300	21	50	0,8	179
40	0,37-0,45	0,25	580	340	19	45	0,6	217
50	0,47-0,55	0,25	640	380	14	40	0,4	241
60	0,57-0,65	0,25	690	410	12	35	-	255
70	0,67-0,75	0,25	730	430	9	30	-	269

Данные в табл.8.3 служат для контроля металлургического качества отдельных плавок, а механические свойства изделий будут определяться соответствующими режимами термической обработки, зависящими от размера и сечения деталей.

Спокойные стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие — с индексом соответственно «пс» и «кп». В табл. 8.3 приведены данные химического состава и свойств спокойных сталей. Кипящие стали производят марок 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп, полуспокойные — 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Качественные стали применяются в машиностроении и приборостроении, так как за счет разного содержания углерода в них, а соответственно и термической обработки, можно получить широкий диапазон механических и технологических свойств.

Низкоуглеродистые стали 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп отличаются малой прочностью и высокой пластичностью в холодном состоянии. Эти стали в основном производят в виде тонкого листа и используют после отжига или нормализации для холодной штамповки с глубокой вытяжкой. Они легко штампуются из-за малого содержания углерода и незначительного количества кремния, что и делает их очень мягкими. Их можно использовать в автомобилестроении для изготовления деталей сложной формы. Глубокая вытяжка из листа этих сталей применяется при изготовлении консервных банок, эмалированной посуды и других промышленных изделий.

Спокойные стали 08,10 применяют в отожженном состоянии для конструкций невысокой прочности — емкости, трубы и т. д.

Стали 10, 15, 20 и 25 также относятся к низкоуглеродистым сталям, они пластичны, хорошо свариваются и штампуются. В нормализованном состоянии в основном их используют для крепежных деталей — валики, оси и т. д.

Для увеличения поверхностной прочности этих сталей их цементуют (насыщают поверхность углеродом) и применяют для деталей небольшого размера, например слабонагруженных зубчатых колес, кулачков и т. д. За счет твердого поверхностного слоя резко возрастает износостойкость изделий, а сердцевина при этом остается пластичной и вязкой. Поверхностный

слой с покрытием можно упрочнить закалкой в воде с последующим низким отпуском. Сердцевина же из-за низкой прокаливаемости этих сталей практически не упрочняется.

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45, 50 и аналогичные стали с повышенным содержанием марганца 30Г, 40Г и 50Г в нормализованном состоянии отличаются повышенной прочностью, но соответственно меньшей вязкостью и пластичностью (табл.8.4).

Таблица 8.4 – Марки конструкционных сталей качественных

ГОСТ	Группа	Наименование по способу производства	Марки
1050-74	I Сталь с нормальным содержанием марганца	Мартеновская или электросталь	05кп; 05; 08кп; 08; 10; 10кп; 15кп; 15; 20кп; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85
	II Сталь с повышенным содержанием марганца	Мартеновская или электросталь	15Г; 20Г; 30Г; 40Г; 45Г; 50Г; 60Г; 65Г; 70Г; 10Г2; 15Г2; 20Г2; 30Г2; 35Г2; 40Г2; 45Г2; 50Г2

В зависимости от условий работы деталей из этих сталей к ним применяют различные виды термической обработки: нормализацию, улучшение, закалку с низким отпуском, закалку ТВЧ и др.

В табл.8.5 приведены механические свойства сталей после нормализации (числитель) и закалки с отпуском (знаменатель). Для каждой стали выбрана такая температура отпуска, при которой временное сопротивление улучшенной стали равно временному сопротивлению нормализованной стали (для сталей 25 и 35 температура отпуска равна 700°C, для стали 45 — 650°C, для стали 55 — 620°C).

Таблица 8.5 – Механические свойства сталей после термической обработки

Свойства	Марка стали			
	25	35	45	55
σ_b , Мпа	460/460	550/550	660/660	750/750
σ_t , Мпа	240/280	280/330	340/380	380/440
δ , %	27/30	22/25	17/22	12/17

Приведенные данные показывают, что при одинаковом временном сопротивлении нормализованной и улучшенной стали такие свойства, как предел текучести и относительное удлинение, выше после закалки с высоким отпуском за счет более дисперсной структуры (сорбит). Закалка с отпуском обеспечивает и более высокую ударную вязкость и хладостойкость, чем нормализация. Эти стали применяют для изготовления небольших валов, шатунов, зубчатых колес и деталей, испытывающих циклические нагрузки. В крупногабаритных деталях больших сечений из-за плохой прокаливаемости механические свойства значительно снижаются.

Высокоуглеродистые стали 60, 65, 70, 75, 80 и 85, а также с повышенным содержанием марганца 60Г, 65Г и 70Г в основном используют для изготовления пружин, рессор, высокопрочной проволоки и других изделий с высокой упругостью и износостойкостью. Их подвергают закалке и среднему отпуску на структуру тростит ($\sigma_B > 800$ МПа) в сочетании с удовлетворительной вязкостью и хорошим пределом выносливости.

8.6. СТРОИТЕЛЬНЫЕ СТАЛИ

Наиболее широко в строительстве применяют основную мартеновскую сталь. Для элементов строительных конструкций, не подверженных динамической нагрузке и влиянию низких температур, ранее применяли бессемеровскую сталь. В сварных конструкциях эту сталь применяли только для малоответственных назначений. Применение кислорода в конверторном производстве позволило практически полностью заменить бессемеровскую сталь и значительно расширить область применения стали в строительной технике.

Строительные конструкционные стали в основном предназначены для работы в атмосферных условиях при обычных и пониженных температурах.

Строительные стали должны обладать хорошей свариваемостью (не образовывать трещин в процессе сварки и не снижать ударную вязкость металла вблизи сварного шва), пластичностью, хорошей обрабатываемостью резанием.

Малоуглеродистую сталь обыкновенного качества применяют для изготовления строительных конструкций. По данным институтов электросварки им. Патона и Проектстальконструкции, оптимальный химический состав строительной малоуглеродистой стали следующий: 0,13—0,18% С; 0,1% Si; 0,4—0,6% Mn; до 0,035% S; до 0,04% P.

Сталь обычного назначения (ГОСТ 380—71) широко применяется в строительной технике; поэтому остановимся на ней более подробно.

Сталь группы А подразделяют на три категории. Первая категория этой стали нормирует показатели временного сопротивления разрыву и относительного удлинения. Вторая категория кроме первых двух показателей, учитывает также изгиб в холодном состоянии, а третья еще и предел текучести стали.

Сталь группы В гарантирует не только механические свойства, но и химический состав, что очень важно для строительных сварных конструкций.

В строительстве применяют также низколегированные стали (см. ниже).

Стальные фасонные гнутые профили изготавливают из стали марок Ст0, Ст1, Ст2, Ст3 по ГОСТ 380—71 и стали марок от 08 до 25 включительно по ГОСТ 1050—74.

Стали, предназначенные для изготовления ответственных металлоконструкций, подвергают испытанию на чувствительность к старению после наклепа. Для этого образцы деформируют на 10%. Один образец испытывают на ударную вязкость до старения, другой — после. Старение производят в течение 1 ч при 250° С с последующим охлаждением на воздухе.

Показатель чувствительности стали к деформационному старению определяют по формуле

$$K = \frac{a_{\epsilon} - a'_{\epsilon}}{a_{\epsilon}} 100\%, \quad (8.1)$$

где a_{ϵ} — ударная вязкость образца в исходном состоянии; a'_{ϵ} — то же после старения.

Если этот показатель более 0,5, из такой стали не разрешают изготавливать металлоконструкции.

Несущие (расчетные) сварные и клепаные конструкции зданий и сооружений изготавливают из мартеновской и кислородно-конверторной стали. Для конструкций, не имеющих сварных соединений, и для сварных конструкций, воспринимающих только статические нагрузки, применяют в основном мартеновскую сталь.

Нерасчетные элементы конструкций (не несущие большие нагрузки) изготавливают из мартеновской и бессемеровской стали. В случае применения сварки следует использовать стали этих марок по группе Б (ГОСТ 380—71). Сталь группы Б, предназначенную для изготовления строительных конструкций, проверяют на свариваемость по специальному стандарту.

Стали группы А (ГОСТ 380—71) применяют для неответственных элементов строительных конструкций.

Кровельное железо изготавливают из стали марок МСт1кп, КСт1кп. Поставляют его в виде отожженных листов толщиной 0,38—0,82 мм. Листы испытывают на перегиб с образованием двойного кровельного замка; при этом не должны появляться отслаивания, трещины, надрывы и изломы.

Конструкции из листовой стали: резервуары, газгольдеры, трубопроводы и другие изделия изготавливают из стали различных марок: мартеновской или конверторной, кипящей или полуспокойной. Эти стали малочувствительны к концентрации напряжений, не склонны к хрупкому разрушению и старению после наклепа, обладают хорошей свариваемостью, достаточно высокой ударной вязкостью.

Арматурная сталь для армирования обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций подразделяется на четыре класса: А-I, А-II, А-III и А-IV. Стержни класса А-I изготавливают из стали: СтЗкп, СтЗсп, СтЗпс, ВСтЗкп2, КСтЗпс2; стержни класса А-II диаметром от 10 до 40 мм — из стали марки ВСт5сп2.

Мостовые металлические конструкции изготавливают из металлокатаной малоуглеродистой мартеновской стали (ГОСТ 6713—53).

Сварные конструкции мостов изготавливают из стали марки М16С.

Клепанные конструкции мостов изготавливают из стали марки МстЗмост. Структура мостовых сталей должна быть мелкозернистой, однородной, без внешних дефектов (раковины, пористость, трещины, волосовины).

Прочностные характеристики (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость) имеют решающее значение при выборе марки стали для элементов мостовых конструкций.

До последнего времени строительные стали не подвергали упрочнению термической обработкой. Однако исследования показали, что термическое упрочнение малоуглеродистой стали повышает ее механические свойства (предел прочности и предел текучести стали марки МСтЗкп увеличился на 20—30%).

Углеродистые стали специального назначения имеют дополнительные индексы, например стали для мостовых конструкций — СТЗ мост.

К недостаткам углеродистых сталей обыкновенного качества можно отнести то, что они часто не обеспечивают требуемых свойств по хладностойкости при эксплуатации сварных металлоконструкций в условиях, где более суровые климатические условия. Кроме того, существенным недостатком строительных углеродистых сталей является их малая прочность, что приводит к большому расходу металла и увеличению массы металлоконструкций. Поэтому повышение прочности строительных сталей и увеличение их хладностойкости являются важными народнохозяйственными проблемами. Решаются эти задачи путем

термического упрочнения углеродистых сталей и применения низколегированных сталей.

Строительные стали можно упрочнить холодной обработкой давлением, а также высокотемпературной термомеханической обработкой при прокатке.

8.7. АВТОМАТНЫЕ СТАЛИ

Эти стали отличаются хорошей обрабатываемостью резанием за счет повышенного содержания серы и фосфора. Оба эти элемента повышают стойкость инструмента. Обрабатываемость связана с интенсивностью изнашивания режущего инструмента, скоростью резания, чистотой поверхности резания, формой стружки и т. д. Необходимо также отметить связь механических свойств стали с обрабатываемостью. Здесь необходимо учитывать и скорость резания и разогрев инструмента во время этого процесса. Обработка пластичных сталей затруднена из-за трудноломающейся стружки. Обрабатываемость низкоуглеродистых сталей повышают холодной пластической деформацией, что способствует формированию легкоотделяющейся стружки.

Очень эффективным металлургическим приемом является введение в сталь серы, селена, теллура, кальция, которые изменяют состав неметаллических включений, а также свинца, который образует собственные включения. В табл.8.6 в соответствии с ГОСТ 1414—75 приведен химический состав некоторых автоматных сталей.

Таблица 8.6 — Химический состав автоматных сталей

Марка стали	Содержание элементов, %						
	C	Mn	Si	S	P	Pb	Se
A11	0,07—0,15	<0,1	0,8—1,20	0,15—0,25	<0,10	—	—
A12	0,08—0,16	0,7—1,0	0,15—0,35	0,08—0,20	0,08—0,15	—	—
A20	0,17—0,24	0,7-1,0	0,15—0,35	0,08—0,15	<0,06	—	—
A30	0,27—0,35	0,7—1,0	0,15—0,35	0,08—0,15	<0,06	—	—
A40Г	0,37—0,45	1,2—1,55	0,15—0,35	0,18—0,30	<0,05	—	—
АС14	0,10—0,17	1,0—1,3	<0,12	0,15—0,20	<0,1	0,15—0,3	0,04
A35E	0,32—0,40	0,5—0,8	0,17—0,37	0,06—0,12	< 0,035	—	0,10

Эти стали маркируют буквой А (автоматная) и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Если автоматная сталь легирована свинцом, то обозначение марки

начинается с сочетания букв «АС» (АС14). Чтобы не проявлялась красноточность, в сталях увеличено количество марганца. Добавление в автоматные стали свинца, селена и теллура позволяет в 2—3 раза сократить расход режущего инструмента.

Улучшение обрабатываемости достигается модифицированием кальцием (вводится в жидкую сталь в виде силикокальция), который глобулизирует сульфидные включения, что положительно влияет на обрабатываемость, но не так активно, как сера и фосфор.

Сера образует большое количество сульфидов марганца, вытянутых в направлении прокатки. Сульфиды оказывают смазывающее действие, нарушая при этом сплошность металла. Фосфор повышает хрупкость феррита, облегчая отделение стружки металла во время процесса резания. Оба эти элемента способствуют уменьшению налипания на режущий инструмент и получению гладкой блестящей обрабатываемой поверхности.

Однако необходимо помнить, что повышение содержания серы и фосфора снижает качество стали. Стали, содержащие серу, имеют ярко выраженную анизотропию механических свойств и пониженную коррозионную стойкость.

Стали А11, А12, А20 используют для крепежных деталей и изделий сложной формы, не испытывающих больших нагрузок, но к ним предъявляются высокие требования по точности размеров и чистоты поверхности.

Стали А30 и А40Г предназначены для деталей, испытывающих более высокие напряжения.

Свинецсодержащие стали широко применяют для изготовления деталей двигателя.

В автоматных селеносодержащих сталях повышается обрабатываемость за счет образования селенидов, сульфоселенидов, которые обволакивают твердые оксидные включения и тем самым устраняют их истирающее действие. Кроме того, селениды сохраняют глобулярную форму после обработки давлением, поэтому практически не вызывают анизотропии свойств и не ухудшают коррозионную стойкость стали, как сера. Применение этих сталей снижает расход инструмента в два раза и до 30% повышает производительность.

8.8. УГЛЕРОДИСТЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего, измерительного инструмента и штампов холодного и горячего деформирования. Основные свойства, которые необходимы для инструмента, — износостойкость и теплостойкость. Для обеспечения

износостойкости инструмента необходима высокая поверхностная твердость, а для сохранения формы инструмента (смятия и выкрашивания рабочих кромок) сталь должна быть прочной, твердой и относительно вязкой. От теплостойкости стали зависит возможная температура разогрева режущего инструмента, т.е. скорость резания или производительность инструмента работающего, в среднем до 200°С.

Углеродистые инструментальные стали являются наиболее дешевыми. В основном их применяют для изготовления малоответственного режущего инструмента и для штампово-инструментальной оснастки регламентированного размера.

Углеродистые стали (ГОСТ 1435—74) производят качественные — (У7, У8, У9, ..., У13) и высококачественные — (У7А, У8А, У9А, У13А). Буква У в марке показывает, что сталь углеродистая, а цифра — среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная. Углеродистые стали поставляют после отжига на зернистый перлит. За счет невысокой твердости в состоянии поставки (НВ 187—217) углеродистые стали хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что позволяет применять накатку, насечку и другие высокопроизводительные методы изготовления инструмента.

Из-за низкой прокаливаемости (10—12 мм) углеродистые стали применяются для мелкого инструмента. Если сечение достигает 25 мм, то сердцевина остается незакаленной, а достаточно твердая режущая часть приходится на поверхностный слой (метчики, развертки, напильники и т.д.). Несквозная закалка оставляет сердцевину вязкой и способствует за счет этого инструменту работать на удар, смягчая деформацию при эксплуатации. Инструмент с незакаленной сердцевиной меньшего сечения для уменьшения деформаций и опасности растрескивания охлаждают в масле или расплавах солей при 160—200°С.

Стали марок У7, У8, У9 подвергают полной закалке и отпуску при 275—350°С на тростит (HRC 48—51), так как они более вязкие, то их используют для производства деревообделочного, слесарного, кузнечного и прессового инструмента.

Заэвтектоидные стали марок У10, У11, У12 и У13 подвергают неполной закалке и низкому отпуску при 150—180°С на структуру мартенсит отпуска с включениями цементита. Инструмент из этих марок сталей обладает повышенной износостойкостью и высокой твердостью (HRC 62—64) на рабочих гранях. Необходимо учитывать, что при нагреве выше 200°С твердость резко снижается. В связи с этим инструмент из этих сталей пригоден для обработки сравнительно мягких материалов и при небольших скоростях резания.

Заэвтектоидные стали используют для изготовления мерительного инструмента (калибры), режущего (напильники, пилы, метчики, сверла,

резцы и т. д.) и небольших штампов холодной высадки и вытяжки, работающих при невысоких нагрузках.

Сталь марки У13 применяют для изготовления инструментов, требующих наиболее высокой твердости: шаберов, гравировального инструмента.

Высококачественные стали имеют то же назначение, что и качественные, но из-за несколько лучшей вязкости их чаще используют для инструментов с более тонкой режущей кромкой.

Недостатком инструментальных углеродистых сталей является потеря прочности при нагреве выше 200°C (отсутствие теплостойкости). Инструмент, изготовленный из этих сталей, применяют для обработки сравнительно мягких материалов и при небольших скоростях резания или деформирования.

Контрольные вопросы

1. Углеродистые стали, их классификация.
2. Какую роль играют постоянные примеси в углеродистых сталях?
3. Дайте подробное объяснение о роли углерода в сталях.
4. Сравните свойства углеродистых сталей обычного качества с качественными сталями.
5. Правила маркировки углеродистых сталей.
6. Какие марки стали используются в газовой промышленности и энергетики? Подробно поясните на примерах.
7. Какими способами можно добиться повышение качества строительных сталей?

9. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ И ЕЕ КЛАССИФИКАЦИЯ

В связи с бурным развитием химической, газо- и нефтеперерабатывающей промышленности, котло- и турбостроения, реактивной, ракетной и атомной техники, судо- и автомобилестроения и систем транспортирования энергоносителя на большие расстояния, а также других отраслей промышленности страны возникла необходимость в расширении и производства легированных сталей и сплавов, обладающих специальными свойствами.

Легированная сталь – это железоуглеродистый сплав, где помимо основных элементов введены добавочные легирующие элементы (хром, никель, титан, вольфрам, ванадий, молибден, бор, марганец, кремний и др.). Обычно легированные стали бывают низколегированные и высоколегированные. В основу классификации легированных сталей заложены четыре признака: равновесная структура, структура после охлаждения на воздухе, состав и назначение сталей.

По назначению стали подразделяют на конструкционные (например, цементуемые, улучшаемые), инструментальные и с особыми свойствами. К последним относят «автоматные», пружинные, шарикоподшипниковые, износостойкие, коррозионностойкие, теплоустойчивые, жаропрочные, электротехнические и другие стали.

По типу равновесной структуры стали подразделяются на доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные и ледебуритные. Эвтектоидные стали имеют перлитную структуру, а доэвтектоидные и заэвтектоидные наряду с перлитом содержат соответственно избыточный феррит или вторичные карбиды типа M_3C . В структуре литых ледебуритных (карбидных) сталей присутствует эвтектика (ледебурит), образованная первичными карбидами вкуче с аустенитом; поэтому по структуре они могут быть отнесены к белым чугунам, но их причисляют к сталям с учетом меньшего, чем у чугунов, содержания углерода ($< 2\%$) и возможности подвергать пластической деформации. Влияние легирующих элементов на положение точек S и E диаграммы $Fe-C$ проявляется чаще всего в их смещении в направлении меньшего содержания углерода. В сталях с высоким содержанием элементов, сужающих γ -область, при определенной концентрации исчезает $\gamma \leftrightarrow \alpha$ -превращение. Такие стали относят к *ферритному классу*. При высокой концентрации в стали элементов, расширяющих γ -область, происходит стабилизация аустенита с сохранением его при охлаждении до комнатной температуры. Эти стали

причисляют к *аустенитному* классу. Таким образом, с учетом фазового равновесия легированные стали относят к перлитному, карбидному, ферритному или аустенитному классам.

Классификация по структуре после нормализации предполагает деление сталей на три основных класса: *перлитный*, *мартенситный* и *аустенитный*. Такое подразделение обусловлено тем, что с увеличением содержания легирующих элементов в стали возрастает устойчивость аустенита в перлитной области (это проявляется в смещении вправо С-образных кривых); одновременно снижается температурная область мартенситного превращения. Все это приводит к изменению получаемых при нормализации структур от *перлита* (сорбита, бейнита) в относительно малолегированных сталях до *мартенсита* (в легированных) и аустенита (в высоколегированных).

Классификация по химическому составу предполагает деление легированных сталей (в зависимости от вводимых элементов) на *хромистые*, *марганцовистые*, *хромоникелевые*, *хромоникельмолибденовые* и т. п. Согласно той же классификации стали подразделяют по общему количеству легирующих элементов в них на *низколегированные* (до 2,5% легирующих элементов), *легированные* (от 2,5 до 10%) и *высоколегированные* (более 10%). Разновидностью классификации по химическому составу является *классификация по качеству*. Качество стали — это комплекс свойств, обеспечиваемых металлургическим процессом, таких, как однородность химического состава, строения и свойств стали, ее технологичность. Эти свойства зависят от содержания газов (кислород, азот, водород) и вредных примесей — серы и фосфора.

По качеству легированные стали подразделяют на качественные (до 0,04% S и до 0,035% P), высококачественные (до 0,025% S и до 0,025% P) и особовысококачественные (до 0,015% S и до 0,025% P).

В зависимости от основных свойств высоколегированные деформируемые стали и сплавы делятся на три группы: 1 – коррозионностойкие (нержавеющие) стали; 2 – жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы и 3 – жаропрочные стали и сплавы. По структуре, получаемый после охлаждения на воздухе высоколегированные стали делятся на шесть классов: 1 – мартенситный; 2 – мартенситно-ферритный; 3 – ферритный; 4 – аустенитно-мартенситный; 5 – аустенитно-ферритный и 6 – аустенитный.

Сплавы различают на железо-никелевой и никелевой основах. К сталям относят условно сплавы, у которых содержится железа более 45%.

Известно, что качество металла определяется в основном двумя важнейшими факторами: чистотой расплава и строением слитка. Выплавка высоколегированных сталей и сплавов, а также получение

слитка представляет сложную задачу. Это обусловлено прежде всего тем, что при выплавке трудно получить заданный химический состав сталей и сплавов, так как большинство из них являются сложнелегированными, к которым предъявляются очень высокие требования.

Из существующих способов выплавки стали (электродуговой, индукционной и др.). Электрошлаковый переплав позволяет получить наиболее высококачественные слитки. Основным преимуществом этого способа являются простота и быстрая, направленная кристаллизация металла: минимальное развитие ликвационных агрегационных процессов, отсутствие контакта жидкого металла с воздухом, печным и газами и высокая очистка жидкого металла от вредных примесей.

9.2.ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРИМЕСЕЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ

Легированными называют стали, в которые для получения требуемых свойств специально вводят легирующие элементы. При наличии элементов в количестве примерно 0,1% такое легирование называют микролегированием.

Легирующие элементы оказывают влияние на электронную и дислокационную структуру металла. Замещая атомы в решетке основы, они создают барьеры ближнего действия на пути движущихся дислокаций. От легирования зависят характер и величина межатомного взаимодействия в сплаве, что влияет на подвижность дислокации. Так, при легировании может увеличиваться плотность дислокации, вызванная изменением энергии дефектов упаковки, меняется время релаксации вакансий и, как следствие, их избыточная концентрация. Значения констант диффузии и упругости, условия протекания фазовых превращений и в конечном итоге прочность твердого раствора, безусловно, связаны с легированием. Часто легирование сопровождается повышением сопротивления твердого раствора пластической деформации, поскольку при его образовании более вероятным является множественное скольжение дислокации по нескольким плоскостям вместо единичного. Так, легирование железа марганцем способствует образованию мартенситной структуры марганцевого феррита, повышению плотности дислокации и, как следствие, значительному возрастанию прочности твердого раствора (рис.9.1). Но есть и исключения: например, легирование железа хромом в определенных пределах уменьшает прочность твердого раствора. При встрече перемещающихся дислокации с примесными атомами поля упругих напряжений вокруг них взаимодействуют между собой, что

приводит к перераспределению примесей. Энергия взаимодействия примеси с дислокацией составляет 1—0,01 эВ. Примесные атомы замещения с меньшим, чем у основы, атомным радиусом замещают атомы основы в сжатой области поля дислокации, в противоположном случае — в растянутой области. Примеси внедрения заполняют растянутые участки вокруг дислокации. Концентрируясь у ядра дислокации, примесные атомы внедрения образуют облака Коттрелла. Эффект упрочнения при легировании железа элементами внедрения (азот, углерод) значительно сильнее, чем элементами замещения (например, никель, марганец). Так, добавление в железо каждой очередной сотой доли процента углерода или азота (0,01%) повышает предел текучести сплава на 40—50 МПа, в то время как введение аналогичного количества никеля — всего на 0,3 МПа, т.е. эффект упрочнения в последнем случае на два порядка меньше.

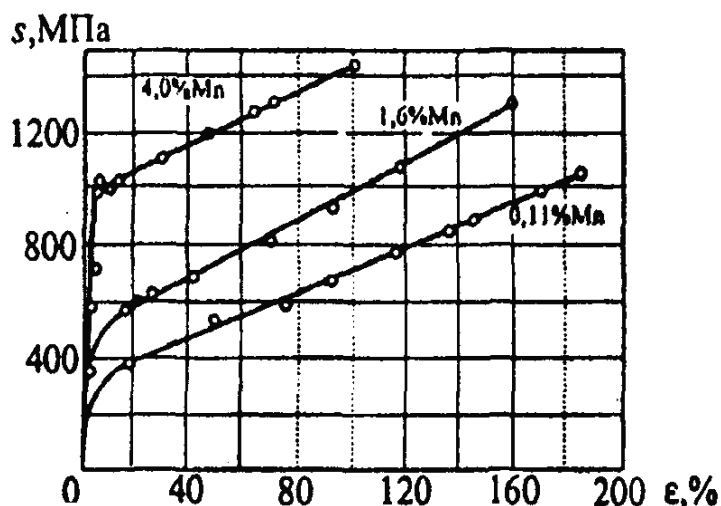


Рис.9.1 – Влияние содержания марганца на прочность и пластичность закаленного и отпущенного (при 200°C) железа

Легирование элементы по-разному влияют на энергию взаимодействия примесей внедрения с дислокациями. Так, введение в решетку α -железа 3% никеля приводит к снижению энергии связи углерода с дислокациями с 0,5 до 0,2 эВ; легирование же железа кремнием вызывает противоположный эффект. Неравномерное распределение ионов вокруг дислокации проявляется также и в неравномерном распределении электронов: уплотненные участки решетки вокруг дислокации приобретают положительный заряд вследствие недостатка электронов; в то же время области растяжения в связи с избытком электронов заряжаются отрицательно. Между положительным зарядом примесного иона и отрицательно заряженной областью дислокации возникают кулоновские силы притяжения, приводящие к перераспределению примесей. Энергия электрического (кулоновского) взаимодействия в

металлах невелика (для двухвалентных примесей она составляет $-0,02$ эВ). Электрическое взаимодействие значительно слабее упругого, но вклад первого может стать существенным в случае отсутствия в твердом растворе упругого взаимодействия (т. е. при равенстве радиусов основного и примесного атомов), а также при их большой разнице в валентностях.

В металлах с ГЦК решеткой имеет место химическое взаимодействие дислокации с примесями и образованием атмосфер Сузуки. Это взаимодействие обусловлено тем, что при возникновении дефектов упаковки с гексагональной решеткой растворимость в них примесного атома может быть больше, а энергия меньше, чем в бездефектной зоне (в объеме основного металла). Легирующие элементы в сталях обычно снижают энергию дефекта упаковки и тем самым увеличивают его ширину. В свою очередь, чем больше ширина дефекта упаковки, тем труднее реализуется процесс преодоления винтовыми дислокациями барьеров посредством их поперечного скольжения. Этот процесс может реализоваться при деформационном упрочнении. Энергия дефектов упаковки существенно влияет на механические свойства легированного аустенита в широком диапазоне температур. Одними из основных аустенитообразующих элементов в стали являются никель и марганец. Исследования показали, что марганцевый аустенит (стабильный) значительно сильнее подвержен деформационному упрочнению (в $\sim 1,7$ раза при степени деформации 50%), чем никелевый (рис.9.2). Однако марганцевый аустенит характеризуется хладноломкостью ($KCU \approx 0,3$ МДж/м²) при низких температурах (ниже $\sim 100^\circ\text{C}$), в то время как никелевый аустенит вплоть до $\sim 196^\circ\text{C}$ сохраняет достаточно высокую ударную вязкость ($KCU \approx 3$ МДж/м²). Такое различие свойств никелевого и марганцевого аустенитов обусловлено существенно меньшими значениями энергии дефектов упаковки в марганцевом аустените (ориентировочно $0,075-0,06$ Дж/м² в интервале от 0 до $\sim 196^\circ\text{C}$) по сравнению с никелевым ($\sim 0,15$ Дж/м²). Таким образом, можно регулировать способность аустенита к упрочнению при пластической деформации, изменяя энергию дефектов упаковки в нем посредством рационального легирования никелем и марганцем аустенитных сталей и сплавов. В сплавах с ГЦК решеткой (в том числе и в аустенитных сталях) энергия дефектов упаковки оказывает более существенное влияние на упрочнение, чем рассмотренные раньше виды взаимодействия дислокации с легирующими элементами. Так, легирующие элементы в стали, снижающие энергию дефекта упаковки, повышают температуру начала рекристаллизации и сужают интервал кристаллизации. Скорость установившейся ползучести ГЦК металлов уменьшается с уменьшением энергии дефектов упаковки. Дефекты упаковки являются центрами

выделения когерентных фаз (карбидов, интерметаллидов и др.) в аустенитных сталях и сплавах с ГЦК решеткой. Так, в закаленных аустенитных сталях с 1% ниобия (12X18H10Б) или с 1% титана (12X18H10Т) при высокотемпературной (~700°C) выдержке на дефектах упаковки выделяются когерентно связанные с матрицей кубические карбиды NbC и TiC. Мелкодисперсные карбидные частицы (размером до 10 нм) препятствуют движению дислокации, а также способствуют их размножению, что в конечном итоге приводит к повышению прочности стали (рис.9.3). В то же время коагуляция кубических карбидов (TiC, NbC), выделяющихся на дефектах упаковки, протекает более медленно, чем карбидов (в том числе и Cr_{23}C_6), выделяющихся на нерасщепленных дислокациях или в матричном твердом растворе. Размеры частиц кубических карбидов после 1000-часовой выдержки при 700°C не превышают 10 нм.

Механические свойства сталей зависят от размера зерна. Границы зерен могут являться барьерами для дислокации, источниками вакансий и дислокации, а также стоками вакансий. Как показали исследования железа и малоуглеродистой стали, прочность феррита существенно зависит от диаметра зерна (d_3).

Так, предел текучести феррита (в отожженной стали) может возрасти при уменьшении размера зерна в три раза. Зернограничное упрочнение наиболее эффективно при существенном измельчении зерна ($d_3 \approx 1 \mu\text{м}$).

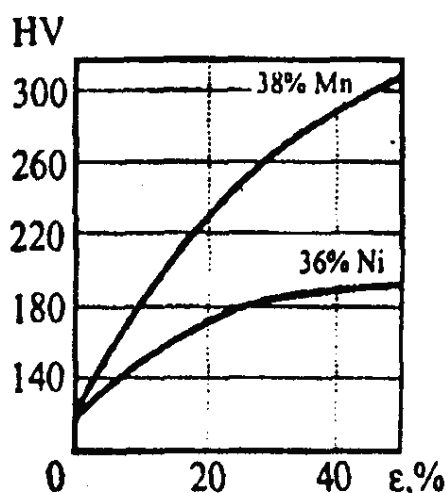


Рис.9.2 – Влияние пластической деформации на твердость никелевого (36% Ni) и марганцевого (38% Mn) аустенита

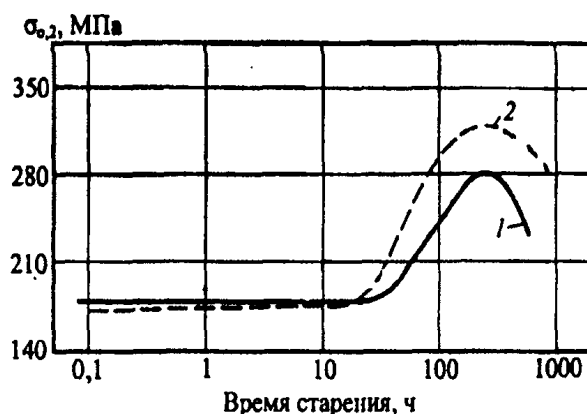


Рис.9.3 – Влияние продолжительности старения аустенитных сталей 12X18H10T (1) и 12X18H10Б при 700°C на величину их предела текучести

В общем случае под d_3 можно понимать размер зерна или субзерна, т.е. то расстояние, которое может пройти дислокация без сопротивления. Граница зерна способна останавливать развитие трещины, поэтому размер зерна, с учетом зависимости Гриффита, должен влиять на хрупкую прочность $S_{отр}$ материала:

$$S_{отр} = \sqrt{\frac{2G\gamma}{d}}, \quad (9.1)$$

где G — модуль сдвига; γ — свободная поверхностная энергия.

Согласно этой формуле, хрупкая прочность возрастает с уменьшением размера зерна. Этот вывод имеет экспериментальное подтверждение (рис. 9.4), полученное при изучении влияния величины зерна феррита на сопротивление хрупкому разрушению (сопротивление отрыву $S_{отр}$).

Легированные стали характеризуются лучшим комплексом физико-химических (в том числе и механических) свойств по сравнению с углеродистыми: они отличаются повышенной жаростойкостью, сопротивлением коррозии, значительной ударной вязкостью, высокими значениями предела текучести и относительного сужения, большим электросопротивлением и др. Оптимальные механические свойства обеспечиваются формированием в результате термической обработки дисперсных структур и более мелкого зерна. Легированные стали могут закаливаться в масле или на воздухе (ибо обладают лучшей прокаливаемостью, чем углеродистые), что способствует уменьшению деформации изделий и вероятности образования трещин.

По влиянию на температурный и концентрационный интервалы (область) существования γ -модификации легирующие элементы в стали подразделяются на две группы:

- 1) элементы, расширяющие область существования γ -фазы (рис.9.5, а), например никель, марганец;
- 2) элементы, замыкающие область существования указанной фазы, например молибден, титан (α -стабилизаторы) (рис.9.5, б).

В основном влияние легирующих элементов на область существования γ -фазы можно объяснить их изоморфностью (однотипностью кристаллической решетки) одной из указанных фаз железа. Так, никель изоморфен γ -фазе (решетка ГЦК), а молибден — α -фазе с ОЦК решеткой. Однако встречаются и исключения, например, алюминий замыкает γ -фазу, хотя и изоморфен ей.

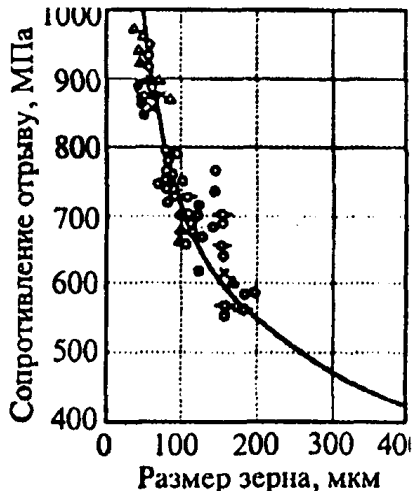


Рис.9.4 - Взаимосвязь хрупкой прочности феррита с размером его зерна

Влияние легирующих элементов на кинетику распада переохлажденного аустенита проявляется в двух направлениях:

а) повышение устойчивости остаточного аустенита, замедление его распада (т.е. смещение С-образных кривых вправо); исключение составляет кобальт, ускоряющий превращение. Такое «количественное» влияние на кинетику распада переохлажденного аустенита присуще элементам, не образующим специальных карбидов в стали (Ni, Mn, Si), а лишь легирующим феррит или цементит (рис.9.6);

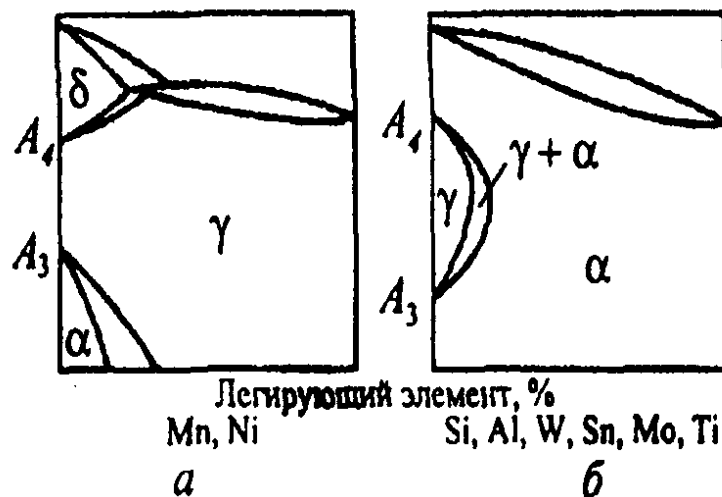


Рис.9.5 – Диаграмма состояния железо-легирующий элемент:
а – для сплавов, расширяющих область существования γ -фазы; *б* – для сплавов, расширяющих область существования α -фазы

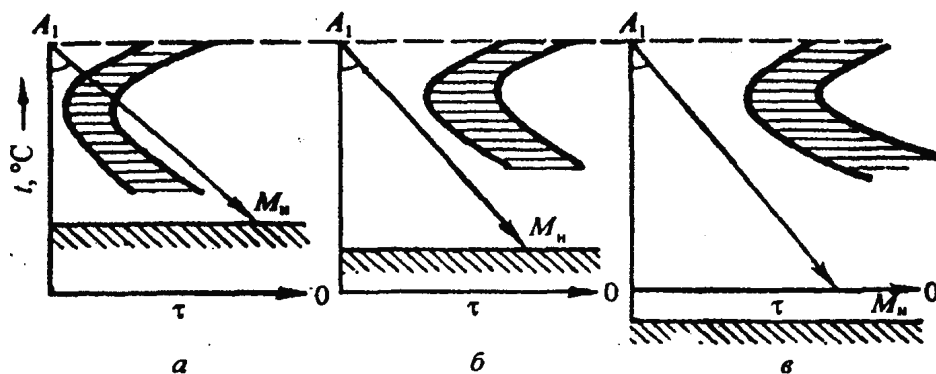


Рис.9.6 - Диаграммы изотермического распада аустенита для сталей перлитного (а), мартенситного (б) и аустенитного (в) классов

б) «качественное» изменение диаграммы изотермического превращения аустенита, проявляющееся в возникновении на ней двух максимумов скорости распада переохлажденного аустенита, разделенных областью его повышенной устойчивости (рис.9.7). Такое воздействие на кинетику распада аустенита, наряду с повышением его устойчивости, оказывают карбидообразующие элементы — хром, молибден, вольфрам и др. Замедление распада аустенита в легированных сталях обусловлено тем, что перлитное превращение в них контролируется не только диффузией углерода как в углеродистых сталях, так и легирующих элементов с образованием легированного цементита или специальных карбидов. Диффузионная же подвижность легирующих элементов существенно меньше, чем углерода.

Количество остаточного аустенита тесно связано с влиянием легирующих элементов на положение температурного интервала (начала M_n и конца M_k) мартенситного превращения: большинство легирующих элементов снижает температуру начала мартенситного превращения M_n и, следовательно, увеличивает количество остаточного аустенита. Исключением являются алюминий и кобальт, повышающие M_n , а также кремний, не влияющий на положение мартенситной точки.

В конструкционных сталях основными легирующими элементами являются хром, никель, кремний и марганец.

Никель увеличивает пластичность и вязкость стали, снижает температуру порога хладноломкости и уменьшает чувствительность стали к концентраторам напряжений; перечисленные факторы способствуют повышению сопротивления стали хрупкому разрушению. В качестве примера можно отметить, что введение в сталь 1% никеля приводит к снижению порога хладноломкости на 60—80°С, а легирование стали 3—4% никеля обеспечивает ей глубокую прокаливаемость.

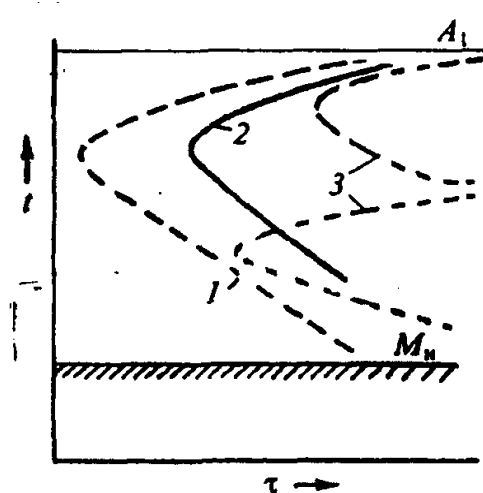


Рис.9.7 – Типы диаграмм изотермического распада аустенита:
 1 – углеродистая сталь; 2 – сталь, легированная некарбидообразующими элементами; 3 – сталь, легированная карбидообразующими элементами

Хром повышает жаростойкость и коррозионную стойкость стали, увеличивает ее электрическое сопротивление и уменьшает коэффициент линейного расширения. Легирование стали хромом приводит к уменьшению склонности аустенитного зерна к росту при нагреве, существенному увеличению ее прокаливаемости, а также к замедлению процесса распада мартенсита.

Кремний широко используется при выплавке стали как раскислитель. Легирование кремнием углеродистых и хромистых сталей увеличивает их жаростойкость. Например, сталь с 5% С и 1% Si в среде печных газов равнозначна по жаростойкости стали с 12% Сг. Уменьшая подвижность углерода в феррите, кремний тем самым затрудняет формирование и рост цементитных частиц, что проявляется в повышении устойчивости структуры стали при отпуске. Содержание кремния в стали ограничивают, поскольку он повышает склонность стали к тепловой хрупкости.

Марганец, подобно никелю, снижает критическую скорость охлаждения, но в отличие от последнего уменьшает и вязкость феррита. Марганец используется для частичной замены никеля с целью получения нужного сочетания механических свойств стали, а также с учетом меньшей стоимости марганца.

Вольфрам, молибден, ванадий, титан, бор и другие вводят в сталь совместно с хромом, никелем и марганцем для дополнительного улучшения ее свойств.

Молибден и вольфрам повышают прокаливаемость стали (особенно в присутствии никеля), способствуют измельчению зерна и подавлению

отпускной хрупкости. Легирование стали молибденом приводит к значительному улучшению ее механических свойств после цементации и нитроцементации.

При введении в сталь ванадия, титана, ниобия и циркония образуются трудно растворимые в аустените карбиды. Эффективность воздействия этих элементов (измельчение зерна, снижение порога хладноломкости, уменьшение чувствительности стали к концентраторам напряжений) проявляется лишь при их малом содержании в стали (до 0,15%); при большем количестве они вызывают снижение прокаливаемости и сопротивления стали хрупкому разрушению, что обусловлено выделением по границам зерен значительного количества карбидов типа MeC (VC, TiC и др.).

Положительное влияние бора на повышение прокаливаемости и прочности стали проявляется лишь при микролегировании им (0,001—0,005%), когда атомы бора располагаются в приграничных слоях зерна аустенита, заполняют вакансии, делая структуру границ более совершенной, и таким образом уменьшают скорость зарождения центров кристаллизации перлита. При повышенном содержании бора он выделяется по границам зерен в виде боридов, сильно охрупчивая сталь.

Анализируя влияние легирующих элементов на структуру, прокаливаемость и свойства стали, следует учитывать, что их содержание должно быть оптимальным для обеспечения предъявляемых к конкретной стали требований по свойствам.

9.3. МАРКИРОВКА ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Обозначение марки включает в себя цифры и буквы, указывающие на примерный состав стали (табл.9.1). В начале марки приводятся двузначные цифры (например, 12ХНЗА), указывающие среднее содержание углерода в сотых долях процента. Буквы справа от цифры обозначают легирующие элементы: А — азот, Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, Е — селен, К — кобальт, Н — никель, М — молибден, П — фосфор, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Ц — цирконий, Ч — редкоземельные элементы, Ю — алюминий. Следующие после буквы цифры указывают примерное содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента (при содержании 1—1,5% и менее цифра отсутствует, например 30ХГС). Высококачественные стали обозначаются буквой А, а особовысококачественные — буквой Ш, помещенными в конце марки (30ХГСА, 30ХГС-Ш). Если буква А расположена в середине марки (14Г2АФ), то это свидетельствует о том, что сталь легирована азотом. При

обозначении автоматных сталей с повышенной обрабатываемостью резанием буква А ставится в начале марки (А20, А40Г).

Таблица.9.1 - Химический состав легированных сталей

Марка стали (сплава)	Содержание элементов, % (в пределах или не более)									
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
18Х2Н4МА	0,14—0,20	0,17-0,37	0,25-0,55	1,35-1,65	4,0-1,40	0,30-0,40	—	0,025	0,025	Cu=0,30
30ХГСА	0,28—0,34	0,90-1,20	0,80-1,10	0,80-1,10	0,30	—	—	0,025	0,025	Cu = 0,30
30ХГСН2А	0,27—0,34	0,90-1,20	1,00-1,30	0,90-1,20	1,40-1,80	—	—	0,025	0,025	Cu = 0,30
03Н18К9М5Т	0,03	0,10	0,10	—	17,7-19,0	4,6-5,5	0,50-0,80	0,010	0,010	Co=8,5-9,5; Al, 15
АС19ХГН	0,16—0,21	0,17-0,37	0,7-1,1	0,8-1,1	0,8-1,1	0,10	—	0,035	0,035	Pb=0, 15-0,30
АС40ХГНМ	0,37—0,43	0,17-0,37	0,5-0,8	0,6-0,9	0,7-1,1	0,15-0,25	—	0,035	0,035	Pb=0, 15-0,30
АЦ30ХМ	0,26—0,34	—	0,4-0,7	0,8-1,1	—	0,15-0,25	—	0,035— 0,060	0,035	Ca=0,03-0,09 Cu =0,30
60С2ХФА	0,56—0,64	1,4-1,8	0,4-0,7	0,9-1,2	0,25	—	—	0,025	0,025	V=0, 1-0,2
95Х18	0,9—1,0	0,8	0,8	17-19	0,6	—	0,2	0,025	0,03	Cu=0,30
08Х13	0,08	0,8	0,8	12,0-14,0	0,6	—	0,2	0,025	0,030	Cu=0,30
12Х17	0,12	0,8	0,8	16,0-18,0	0,6	—	0,2	0,025	0,035	Cu=0,30
40Х13	0,36—0,45	0,8	0,8	12,0-14,0	0,6	—	0,2	0,025	0,030	Cu = 0,30
40Х10С2М	0,35—0,45	1,9-2,6	0,8	9,0-10,5	0,6	0,7-0,9	0,2	0,025	0,030	Cu = 0,30
10Х13СЮ	0,07—0,12	1,2-2,0	0,8	12,0-14,0	—	—	—	0,025	0,030	Al=1,0-1,8

Продолжение табл.9.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
12X18H9	0,12	0,8	2,0	17,0-19,0	8,0-10,0	—	0,5	0,025	0,035	uu - u,ju
12X18H9T	0,12	0,8	2,0	17,0-19,0	8,0-9,5	—	5С-0,8	0,020	0,035	Cu = 0,30
09X15H8Ю	0,09	0,8	0,8	14,0-16,0	7,0-9,4	—	—	0,025	0,035	Al = 0,7-1,3
36X18H25C2	0,32-0,40	2,0-3,0	1,5	17,0-19,0	23,0-26,0	—	—	0,025	0,035	—
12X1MФ	0,08-0,15	0,17-0,37	0,40-0,70	0,90-1,20	0,30	0,25-0,35	—	0,025	0,030	V=0,15-0,30;
15X12ВНМФ	0,12-0,18	0,4	0,5-0,9	11,0-13,0	0,4-0,8	0,5-0,7	0,2	0,025	0,030	W=0,7-1,1; V=0,15-0,30;
09X14H19B2БP	0,07-0,12	0,6	2,0	13,0-15,0	18,0-20,0	—	—	0,020	0,035	W=2,0-2,8; B=0,005; Nb=0,9-1,3; Ce=0,02
45X14H14B2M	0,40-0,50	0,8	0,7	13,0-15,0	13,0-15,0	0,25-0,40	—	0,020	0,035	W= 2,0-2,8; Cu = 0,30
40X15H7T7Ф2M	0,38-0,47	0,9-1,4	6,0-8,0	14,0-16,0	6,0-8,0	0,65-0,95	—	0,020	0,035	V= 1,5-1,9
10X11H23T3MP	0,10	0,6	0,6	10,0-12,5	21,0-25,0	1,0-1,6	2,6-3,2	0,020	0,030	Al = 0,8; B = 0,02
ХН35ВТ	0,12	0,6	1,0-2,0	14,0-16,0	34,0-38,0	—	1,1-1,5	0,020	0,030	W= 2,8-3,5

Если автоматная сталь легирована свинцом, то обозначение марки начинается с сочетания букв АС (АС35Г2, где цифра 35 обозначает среднее содержание углерода в сотых долях процента). Маркировка шарикоподшипниковой стали начинается с буквы Ш (ШХ15, где 15— среднее содержание хрома в десятых долях процента). В начале обозначения марки быстрорежущих сталей стоит буква Р, за которой следует цифра, отражающая концентрацию вольфрама (Р18, Р6М5). Опытные стали, выплавленные на заводе "Электросталь", первоначально обозначают буквами ЭП (электросталь исследовательская) или ЭП (электросталь пробная) с порядковым номером разработки (освоения), например ЭИ962 (11X11H2B2MФ), ЭП33 (10X11H23T3MP). Такое упрощенное обозначение сталей, особенно высоколегированных, в дальнейшем широко используется и в заводских условиях.

При маркировке сплавов на железоникелевой основе указывается количественное содержание никеля (в процентах) с перечислением лишь буквенных обозначений остальных легирующих элементов, например

ХН38ВТ, ХН45МВТЮБР. В табл.9.1 представлены маркировка и химический состав ряда легированных сталей. Зарубежные аналоги некоторых отечественных марок приведены в табл.9.2.

Нержавеющие, шарикоподшипниковые, быстрорежущие и некоторые другие легированные стали выделены в особые группы; они имеют следующее буквенное обозначение: быстрорежущие — Р, хромистые нержавеющие — Ж, шарикоподшипниковые — Ш, хромоникелевые нержавеющие — Я, магнитные — Е.

Таблица 9.2 - Зарубежные аналоги ряда отечественных марок легированных сталей

Россия, ГОСТ	Германия, DIN*	США, ASTM*	Япония, JIS*
15Х	15Cr3	5115	SCr415
40Х	41Cr4	5140	SCr440
30ХМ	25CrMo4	4130	SCM430, SCM2
12ХН3А	14NiCr10**	—	SNC815
20ХГНМ	21NiCrMo2	8620	SNCM220
08Х13	X7Cr13**	410S	SUS410S
20Х13	X20Cr13	420	SUS420J1
12Х17	X8Cr17	430(51430****)	SUS430
12Х18Н9	X12CrNi189	302	SUS302
08Х18Н10Т	X10CrNiTi189	321	SUS321
10Х13СЮ	X7CrA113**	405** (5 1405)****	SUS405**
20Х25Н20С2	X15CrNiSi2520	30314,314	SCS18**,SUH310**

* DIN (Deutsche Industrienorm), ASTM (American Society for Testing Materials), JIS (Japanese Industrial Standard).

** Сталь, близкая по составу.

*** Стандарт SAE.

9.4. ЦЕМЕНТУЕМЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

К данной группе сталей относятся низко- и среднелегированные стали (20Х, 15ХФ, 25ХГТ, 12ХН3А и др.) с содержанием углерода 0,1 — 0,3%, обеспечивающие после химико-термической обработки, закалки и низкого отпуска высокую поверхностную твердость (HRC 58 — 62) при вязкой, но достаточно прочной сердцевине ($\sigma_b=700 — 1500$ МПа, $\delta=10 — 12\%$, KCU=0,6 — 1,0 МДж/м², HRC 35 — 45). Эти стали используют для изготовления деталей машин и приборов (кулачков, зубчатых колес и др.),

испытывающих переменные и ударные нагрузки и одновременно подверженных износу.

Карбидо- и нитридообразующие элементы (такие, как Сг, Мп, Мо и др.) способствуют повышению прокаливаемости, поверхностной твердости, износостойкости и контактной выносливости. Никель повышает вязкость сердцевины и диффузионного слоя и снижает порог хладноломкости. Легирование стали ванадием, титаном, алюминием, ниобием приводит к образованию дисперсных нитридов (VN, TiN, AlN), карбидов (TiC, VC) или карбонитридов, например V(N,C), затормаживающих рост зерна аустенита и таким образом способствующих его измельчению. Уменьшение же зерна способствует снижению хрупкости и повышению ударной вязкости стали, что весьма важно при работе в условиях действия динамических и знакопеременных нагрузок. Цементируемые (нитроцементуемые) легированные стали по механическим свойствам подразделяют на две группы: стали средней прочности с пределом текучести менее 700 МПа (15X, 15XФ) и повышенной прочности с пределом текучести $\sigma_{0,2}=700—1000$ МПа (12X2H4A, 18X2H4MA и др.).

Хромистые (15X, 20X) и хромованадиевые (15XФ содержит 0,15% V) стали цементуются на глубину до 1,5 мм. Легирование ванадием уменьшает склонность стали к перегреву. После закалки (880°C, вода, масло) и последующего отпуска (180°C, воздух, масло) стали имеют следующие свойства:

$$\sigma_b = 690—800 \text{ МПа}, \delta = 11—12\%, KCU = 0,62 \text{ МДж/м}^2. \quad (9.2)$$

Хромомарганцевые стали (18ХГТ, 25ХГТ), широко применяемые в автомобилестроении, содержат по 1% хрома и марганца (дешевого заменителя никеля в стали), а также 0,06% титана. Их недостатком является склонность к внутреннему окислению при газовой цементации, что приводит к снижению твердости слоя и предела выносливости. Этот недостаток устраняется легированием стали молибденом (25ХГМ). Для работы в условиях изнашивания используют сталь 20ХГР, легированную бором (0,001—0,005%). Бор повышает прокаливаемость и прочность стали, но снижает ее вязкость и пластичность. Дополнительное введение в сталь 1% никеля (20ХГНР) приводит к увеличению ее пластичности, вязкости и прокаливаемости.

В хромоникелевых сталях (12ХНЗА, 12Х2Н4А, 20ХНЗА и др.) при закалке (в масле) в сердцевине формируется структура нижнего бейнита либо низкоуглеродистого мартенсита. Такая структура обеспечивает сочетание высокой прочности и вязкости ($\sigma_b=950—1300$ МПа, $\delta=9—11\%$, $KCU = 0,8—0,9$ МДж/м²). Эти стали применяют для крупных деталей ответственного назначения.

Хромоникельмолибденовая (вольфрамовая) сталь 18Х2Н4МА (18Х2Н4ВА) относится к мартенситному классу и закаливается на воздухе (табл.9.3), что способствует уменьшению коробления. Легирование хромоникелевых сталей W или Мо дополнительно повышает их прокаливаемость. Причем Мо существенно повышает прокаливаемость цементованного слоя, в то время как хром и марганец увеличивают прежде всего прокаливаемость сердцевины. В цементованном состоянии данную сталь применяют для изготовления зубчатых колес авиационных двигателей, судовых редукторов и других крупных деталей особо ответственного назначения. Эту улучшаемую сталь используют также и при изготовлении деталей, подверженных большим статическим и ударным нагрузкам.

Таблица 9.3 - Механические свойства легированных сталей

Марка стали (сплава)	Термическая обработка при T, °C; охлаждающая среда		$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	ψ	КСУ, МДж/м ²
	закалка	отпуск (старение)					
			не менее				
1	2	3	4	5	6	7	8
18Х2Н4МА	950(ВЗ)/860(ВЗ)"	200(ВЗ,М)	835	1130	12	50	0,98
30ХГСА	880(М)	540(В,М)	830	1080	10	45	0,50
30ХГСН2А	900 (М)	260(ВЗ,М)	1375	1620	9	45	0,59
ОЗН18К9М5Т	1220(В)/940(В)	530(ВЗ)	1810	1910	—	40	0,35
АС19ХГН	875(М,В)	165(ВЗ)	835	1180	7	—	0,68
АС40ХГНМ	840(М)	600(ВЗ)	835	980	12	—	0,88
АЦ30ХМ	880(М)	540(В,М)	735	930	11	45	0,78
60С2ХФА	870(М)	470(ВЗ)	1470	1670	6	25	—
95Х18	1040(М,В)	обр.хол.-70°, отп. 155(ВЗ)	—	2140	—	—	0,63
08Х13	1025(М)	750(М)	410	590	20	60	0,98
12Х17	отжиг 770(ВЗ,В)	—	245	390	20	50	—
40Х13	1000(М)	200(М)	1620	1840	1	2	0,19
40Х10С2М	1030(ВЗ,М)	750(М)	735	930	10	35	0,20
10Х13СЮ	отжиг 850(ВЗ,М)	—	345	490	15	60	—
12Х18Н9	1080(ВЗ)	—	230	560	46	66	2,20
12Х18Н9Т	1050(В)	—	280	620	41	63	2,50
09Х15Н8Ю	950(ВЗ,В)	обр.ход-70°, стар. 380	900	1200	10	45	0,40
36Х18Н25С2	1200(В)	800(ВЗ)	550	855	17	18	0,50
12Х1МФ	норм. 970(ВЗ)	725(ВЗ)	255	470	21	55	0,98
15Х12ВНМФ	1010(М)	690(ВЗ)	590	740	15	45	0,59
09Х14Н19В2Б	1150(ВЗ)	—	215	510	35	50	—
45Х14Н14В2	—	820(ВЗ)	315	710	20	35	—

Продолжение табл.9.3

1	2	3	4	5	6	7	8
40X15H7Г7Ф2	1180(В,ВЗ)	800(ВЗ)	590	886	16	15	0,29
10X11H23Т3	1135(ВЗ,М)	775(В)	590	880	8	10	0,29
ХН35ВТ	1000(В)	870/730*** печь	440	800	18	30	0,80

* Охлаждающая среда: в — вода; м — масло, вз — воздух, печь — охлаждение в печи.

** Двойная закалка. *** Двойное старение.

9.5. УЛУЧШАЕМЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Улучшаемыми называют такие стали, которые используются после закалки с высоким отпуском (улучшения). Эти стали (40X, 40XФА, 30XГСА, 38ХНЗМФА и др.) содержат 0,3—0,5% углерода и 1 — 6% легирующих элементов. Стали закаливают с 820— 880°С в масле (крупные детали — в воде); высокий отпуск производят при 500—650°С с последующим охлаждением в воде, масле или на воздухе (в зависимости от состава стали). Структура стали после улучшения — сорбит. Данные стали применяют для изготовления валов, шатунов, штоков и других деталей, подверженных воздействию циклических или ударных нагрузок. В связи с этим улучшаемые стали должны обладать высоким пределом текучести, пластичностью, вязкостью, малой чувствительностью к надрезу.

Хромистые улучшаемые стали (30X, 40X, 50X) содержат 1% Cr, 0,65% Mn и 0,3 — 0,5% C. Повышенное содержание углерода в них с 0,3 до 0,5% вызывает увеличение прочности (с 900 до 1080 МПа), но приводит к снижению пластичности (с 12 до 9%) и вязкости разрушения (с 0,7 до 0,4 МДж/м²). Стали обладают небольшой прокаливаемостью, увеличение которой достигается микролегированием (0,001— 0,005%) их бором (35ХР, 40ХР), однако при этом повышается порог хладноломкости. Введение в сталь 0,15% V (40XФА) способствует увеличению ее вязкости с 0,6 (у стали 40X) до 0,9 МДж/м² (у стали 40XФА). Стали склонны к отпускной хрупкости.

Хромокремниймарганцевые стали 30XГСА (см. табл.9.1), 35XГСА, называемые хромансилами, содержат по 1% хрома, марганца и кремния и характеризуются хорошими механическими (см. табл. 9.3) и технологическими (свариваются, штампуются) свойствами. Среди их недостатков можно отметить чувствительность к концентраторам напряжений, к коррозии под напряжением и водородному охрупчиванию, а также склонность к обратимой отпускной хрупкости. Эти стали широко применяют в автомобилестроении и авиации для изготовления силовых сварных конструкций валов, деталей рулевого управления и т. д.

Хромоникелевые стали (40ХН, 45ХН, 40ХНЗА и др.) содержат 0,5— 0,8% Cr и 1— 3% Ni. Они отличаются хорошей прокаливаемостью,

прочностью и вязкостью ($\sigma_B = 1000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 800$ МПа, $d = 10\text{—}11\%$, $KCU = 0,7\text{—}0,8$ МДж/м²). Хромоникелевые стали, также как хромансил и хромистые, склонны к обратимой отпускной хрупкости и должны охлаждаться после высокого отпуска с большой скоростью (в воде или масле).

Отпускной хрупкостью называют охрупчивание стали при некоторых условиях отпуска. Различают два рода отпускной хрупкости, что соответствует двум минимумам ударной вязкости на ее зависимости от температуры отпуска (рис.9.8): для отпуска при 300°C и при 500°C. Отпускная хрупкость I рода проявляется при отпуске около 300°C и вызывается неравномерностью распада мартенсита по объему и границам зерен. Менее прочные приграничные слои зерен, претерпевающие почти полный распад на ферритно-цементитную смесь, играют роль концентраторов напряжений, что в конечном итоге вызывает хрупкое разрушение.

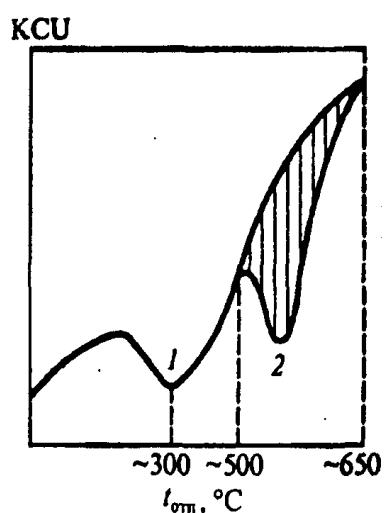


Рис.9.8 - Влияние температуры отпуска на ударную вязкость стали:
1 и 2 – интервалы отпускной хрупкости I и II рода, соответственно

Отпускная хрупкость II рода проявляется лишь в результате медленного охлаждения после отпуска при температурах выше 500°C. При быстром охлаждении вязкость не уменьшается, а, наоборот, возрастает с повышением температуры отпуска. Поэтому отпускную хрупкость II рода иногда называют *обратимой* в отличие от отпускной хрупкости I рода, именуемой *необратимой*. Отпускная хрупкость II рода вызвана активным карбидообразованием по границам зерен, обеднением в связи с этим приграничных районов легирующими элементами (хромом, марганцем) и диффузией сюда фосфора. В результате происходит охрупчивание стали из-за ослабления прочности межзеренных сцеплений. При быстром охлаждении фосфор не успевает диффундировать из объема зерен к границам.

Присутствие же 0,2—0,5% молибдена (или 0,5—0,8% вольфрама) в стали затормаживает диффузионные процессы, уменьшает разницу в диффузионной подвижности атомов в объеме и по границам зерна и тем самым существенно препятствует возникновению неоднородности между указанными зонами. Ванадий (0,15%) способствует измельчению зерна. Поэтому хромоникелевые стали, легированные молибденом (вольфрамом) и ванадием, 36Х2Н2МФА, 38ХН3МА, 38ХН3ВА, 38ХН3МФА и др., обладают лучшими свойствами ($\sigma_B=1100—1200$ МПа, $\sigma_{0,2}=950—1100$ МПа, $\delta=12\%$, $\psi=50\%$, $KCU = 0,8$ МДж/м²). Повышение в них содержания никеля до 3—4% еще более улучшает прокаливаемость и снижает порог хладноломкости 1, с -40°С до -60°С.

Стали относятся к мартенситному классу, слабо разупрочняются при нагреве до 300—400 °С. Из них изготавливают валы и роторы турбин, тяжело нагруженные детали редукторов и компрессоров.

9.6. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ

Высокопрочными называют стали, имеющие предел прочности 1500—2000 МПа и более. Этим сталям необходимо иметь достаточный запас пластичности и вязкости. К высокопрочным сталям относятся:

а) *среднеуглеродистые комплексно-легированные стали*, используемые после закалки с низким отпуском или после термомеханической обработки (30ХГСН2А, 40ХН2МА, 38ХН3МА);

б) *мартенситно-стареющие стали* (03Н18К9М5Т, Н12К15М10, Н10Х11М2Т);

в) *метастабильные аустенитные стали* (трип-стали).

Из среднеуглеродистых комплексно-легированных сталей большое применение, особенно в самолетостроении, находит сталь 30ХГСН2А (см. табл.9.1), представляющая собой хромансиль, улучшенную за счет добавки 1,6% Ni. Эта сталь используется для изготовления деталей фюзеляжа, шасси, силовых сварных конструкций и др. Сталь применяется как в низкоотпущенном состоянии (см. табл.9.3), так и после изотермической закалки, которая по сравнению с первым вариантом термообработки обеспечивает меньшую чувствительность к надрезу и более высокое сопротивление разрушению.

Термомеханическая обработка (ТМО), совмещающая в одном технологическом процессе пластическую деформацию аустенита и закалку, обеспечивает среднеуглеродистым легированным сталям типа 30ХГСН2А и 40ХН2МА высокую прочность (σ_B до 2000—2800 МПа — на небольших опытных образцах) при достаточной пластичности ($\delta = 8—6\%$) и вязкости ($KCU = 0,30—0,15$ МДж/м²).

Мартенситно-стареющие стали (03Н18К9М5Т, 04Х11Н9М2Д2ТЮ, 03Н19К6М5ТР и др.) превосходят по конструктивной прочности и технологичности рассмотренные ранее среднеуглеродистые стали (табл.9.3). Они обладают малой чувствительностью к надрезам, высоким сопротивлением хрупкому разрушению и низким порогом хладноломкости при прочности порядка $\sigma_b = 2000$ МПа. Эти стали характеризуются высокой прокаливаемостью, хорошей свариваемостью, легкой деформируемостью в закаленном состоянии, малым короблением в процессе термической обработки. Мартенситно-стареющие стали представляют собой безуглеродистые ($C \leq 0,03\%$) сплавы железа с 8—25% Ni, дополнительно легированные Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами. Благодаря высокому содержанию никеля, кобальта и малой концентрации углерода в результате закалки от 1220—820°C в воде или на воздухе фиксируется высокопластичный ($\delta = 18—20\%$, $\psi = 75—85\%$, $KCU = 2—2,5$ МДж/м²), но низкопрочный ($\sigma_b \leq 1100$ МПа) железоникелевый мартенсит, пересыщенный легирующими элементами. Его в дальнейшем можно деформировать с большими степенями обжатия. Главное упрочнение происходит в процессе старения при температурах 450—550°C за счет выделения из мартенситной матрицы когерентно с ней связанных мелкодисперсных фаз (NiTi, Ni₃Ti, NiAl, (Ni,Fe)Al, Fe₂Mo и др.). Детали из листов и прутков малого сечения закалывают с температуры 820°C с последующим старением при 500°C. Детали большой толщины из стали 03Н18К9М5Т подвергаются сложной термической обработке, включающей первую закалку с 1200°C, последующую трехкратную закалку с 940°C и старение при 520—540°C (табл.9.3). При этом закалку осуществляют в воде (до потемнения поверхности), а затем охлаждают на воздухе. Мартенситно-стареющие стали обладают высокой конструктивной прочностью в интервале температур от криогенных до 500°C и рекомендуются для изготовления корпусов ракетных двигателей, стволов артиллерийского и стрелкового оружия, катапульт самолетов, шасси, гидрокрыльев, корпусов подводных лодок, батискафов, деталей криогенных сосудов, высоконагруженных дисков турбомашин, зубчатых колес, шпинделей, червяков и т.д.

Метастабильные аустенитные высокопрочные стали повышенной пластичности получили название трип-сталей (TRIP — Transformation Induced Plasticity) или ПНП-сталей (ПНП — пластичность, наведенная превращением). Стали этого класса 30Х9Н8М4Г2С2, 25Н25М4Г1 (приведен ориентировочный марочный состав) и другие содержат 0,2—0,3% С, 8—10% Cr, 8—25% Ni, 2—6% Mo, 1—2,5% Mn, до 2% Si. После закалки с 1000—1100°C в этих сталях фиксируется устойчивая аустенитная структура, так как точка начала мартенситного превращения Mn лежит в области отрицательных температур. В процессе последующей пластической деформации (степень

обжатия 50—80%), проводимой при 450—600°С (ниже температуры рекристаллизации), происходит наклеп аустенита, а также его обеднение углеродом и легирующими элементами за счет выделения карбидов (дисперсионное упрочнение). Вследствие этого повышаются температуры M_n и M_d (температура начала образования мартенсита деформации), причем последняя превышает 20°С. Поэтому в процессе охлаждения аустенит становится метастабильным и при повторной деформации претерпевает мартенситное превращение.

В результате закалки, наклепа и деформационного старения аустенита трип-стали приобретают оптимальные механические свойства: высокую прочность ($\sigma_b = 1800—2000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1400—1700$ МПа), хорошую пластичность $\delta > 20\%$ (до 100—150%) и трещиностойкость.

Необходимость мощного прокатного и другого технологического оборудования для осуществления пластической деформации при относительно низких температурах, анизотропия свойств деформированных сталей, сложность сварки — все это ограничивает возможность широкого применения трип-сталей. Из этих сталей изготавливают проволоку, тросы, высоконагруженные детали.

9.7. ПРУЖИННЫЕ СТАЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Пружины, рессоры и другие упругие элементы работают в области упругой деформации материала. В то же время многие из них подвержены воздействию циклических нагрузок. Поэтому основные требования к пружинным сталям — это обеспечение высоких значений пределов упругости, текучести, выносливости, а также необходимой пластичности и сопротивления хрупкому разрушению.

Стали для пружин и рессор содержат 0,5—0,75% С, их также дополнительно легируют кремнием (до 2,8%), марганцем (до 1,2%), хромом (до 1,2%), ванадием (до 0,25%), вольфрамом (до 1,2%) и никелем (до 1,7%). При этом происходит измельчение зерна, способствующее возрастанию сопротивления стали малым пластическим деформациям, а следовательно, ее релаксационной стойкости.

Широкое применение на транспорте нашли кремнистые стали 55С2, 60С2А, 70С3А. Однако они могут подвергаться обезуглероживанию, графитизации, резко снижающим характеристики упругости и выносливости материала. Устранение указанных дефектов, а также повышение прокаливаемости и торможение роста зерна при нагреве достигается дополнительным введением в кремнистые стали хрома, ванадия (60С2ХФА, вольфрама (65С2ВА) и никеля (60С2Н2А).

Лучшими технологическими свойствами, чем кремнистые стали, обладает сталь 50ХФА, широко используемая для изготовления

автомобильных рессор. Клапанные пружины делают из стали 50ХФА, не склонной к обезуглероживанию и перегреву, но имеющей малую прокаливаемость. Повышение прокаливаемости достигают легированием этой стали марганцем (50ХГФА).

Термическая обработка легированных пружинных сталей (закалка 850—880°C, отпуск 380—550°C) обеспечивает получение высоких пределов прочности ($\sigma_b = 1200—1900$ МПа) и текучести ($\sigma_{0,2} = 1100—1700$ МПа) при пластичности $\delta = 5—12\%$. Применяется также изотермическая закалка.

Максимальный предел выносливости получают при термической обработке на твердость HRC 42—48. Существенное (до двух раз) повышение предела выносливости рессор достигается их поверхностным наклепом посредством дробеструйной и гидроабразивной обработок, в процессе которых в поверхностном слое деталей наводятся остаточные напряжения сжатия (снижающие при эксплуатации деталей общий уровень напряжений растяжения в указанном слое).

Для изготовления пружин также используют холодотянутую проволоку (или ленту) из высокоуглеродистых сталей 65, 65Г, 70, У8, У10 и др.

Пружины и другие элементы специального назначения изготавливают из высокохромистых мартенситных (30Х13), мартенситно-старяющих (03Х12Н10Д2Т), аустенитных нержавеющей (12Х18Н10Т), аустенитно-мартенситных (09Х15Н8Ю) и других сталей и сплавов.

9.8. ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫЕ СТАЛИ

Основной причиной выхода из строя подшипников качения является контактная усталость металла, проявляющаяся в выкрашивании частиц и отслаивании тонких пластин с рабочих поверхностей деталей (явление шелушения). При этом на контактных поверхностях деталей возникают дефекты в виде мелких "язв".

Для обеспечения работоспособности изделий шарикоподшипниковая сталь должна обладать высокой твердостью, прочностью и контактной выносливостью. Это достигается повышением качества металла: его очисткой от неметаллических включений и уменьшением пористости посредством использования электрошлакового или вакуумно-дугового переплава.

При изготовлении деталей подшипника широко используют шарикоподшипниковые (Ш) хромистые (Х) стали ШХ15 и ШХ15СГ (последующая цифра 15 указывает содержание хрома в десятых долях процента — 1,5%). Стали содержат по 1% С. ШХ15СГ дополнительно легирована кремнием (0,5%) и марганцем (1,05%) для повышения

прокаливаемости. Отжиг стали на твердость порядка 190 НВ обеспечивает обрабатываемость полуфабрикатов резанием и штампуемость деталей в холодном состоянии. Закалка деталей подшипника (шариков, роликов и колец) осуществляется в масле с температур 840—860°С. Перед отпуском детали охлаждают до 20—25°С для обеспечения стабильности их работы (за счет уменьшения количества остаточного аустенита). Отпуск стали проводят при 150—170°С в течение 1—2 ч. Оптимальные условия обеспечения работоспособности изделий достигаются в том случае, если шарики имеют несколько большую твердость (62—66 HRC) по сравнению с роликами и кольцами (61—65 HRC для стали ШХ15).

Детали подшипников качения, испытывающие большие динамические нагрузки, изготавливают из сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ с последующей их цементацией и термической обработкой. Для деталей подшипников, работающих в азотной кислоте и других агрессивных средах, используется сталь 95Х18, содержащая 0,95% С и 18% Cr (см. табл.9.1, 9.3).

Износостойкая высокомарганцевая аустенитная сталь. Износостойкость деталей обычно в первую очередь обеспечивается повышенной твердостью поверхности. Однако высокомарганцевая аустенитная сталь 110Г13Л (1,25% С, 13% Mn, 1% Cr, 1% Ni) при низкой начальной твердости (180—220 НВ) успешно работает на износ в условиях абразивного трения, сопровождаемого воздействием высокого давления и больших динамических (ударных) нагрузок (такие условия работы характерны для траков гусеничных машин, щек дробилок и др.). Это объясняется повышенной способностью стали упрочняться в процессе холодной пластической деформации. Так, при пластической деформации, равной 70%, твердость стали возрастает с 210 НВ до 530 НВ. Высокая износостойкость стали достигается не только деформационным упрочнением аустенита, но и образованием мартенсита с гексагональной (ϵ) или ромбоэдрической (ϵ') решеткой. При содержании фосфора более 0,025% сталь становится хладноломкой. Структура литой стали представляет собой аустенит с выделившимися по границам зерен избыточными карбидами марганца (Mn_3C), снижающими прочность и вязкость материала. Для получения однофазной аустенитной структуры отливки закаливают в воде с температуры 1050—1100°С. В таком состоянии сталь имеет высокую пластичность $\delta = 34—53\%$, $\psi=34—43\%$, низкую твердость 180—220 НВ и невысокую прочность $\sigma_b=830—654$ МПа.

Изделия, работающие в условиях кавитационного износа, изготавливают из сталей 30Х10Г10, 0Х14П2М.

9.9. НЕРЖАВЕЮЩИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Коррозия — это процесс разрушения металла под воздействием внешней среды. По механизму протекания различают химическую коррозию, возникающую под воздействием газов или неэлектролитов (нефть), и *электрохимическую*, развивающуюся в случае контакта металла с электролитами (кислоты, щелочи, соли, влажная атмосфера, почва, морская вода). Электрохимическая коррозия имеет свои разновидности. Так, однородный (например, однофазный со структурой твердого раствора) сплав может подвергаться равномерной коррозии по всей поверхности (причем с одинаковой скоростью). Неоднородный (многофазный) металл корродирует обычно локально, на отдельных участках поверхности (местная коррозия: точечная, пятнистая с язвами). В неоднородном (и даже в однородном) металле коррозионный процесс часто реализуется за счет возникновения на поверхности сплава микрогальванических элементов в связи с наличием там участков, обладающих различным электрохимическим потенциалом (фазы, границы зерен и другие дефекты структуры, тело зерна), с последующим растворением анодных участков в электролите. Электрохимическая неоднородность может быть вызвана как наличием в сплаве нескольких фаз, так и анизотропией электрохимического потенциала на границе и в объеме зерна. В данном случае по границам зерен реализуется интеркристаллитная (межкристаллитная) коррозия. При одновременном воздействии коррозионной среды и растягивающей нагрузки (коррозия под напряжением) наблюдается усиление коррозии, причем разновидностью этого типа коррозии является коррозионное растрескивание, проявляющееся в образовании тонкой сетки трещин в металле.

Стали, устойчивые против электрохимической коррозии, называются *коррозионностойкими (нержавеющими)*. Устойчивость стали против коррозии достигается введением в нее элементов, образующих на поверхности плотные, прочно связанные с основой защитные пленки, препятствующие непосредственному контакту стали с агрессивной средой, а также повышающие ее электрохимический потенциал в данной среде. Так, введение более 12—14% Cr резко изменяет электрохимический потенциал стали с отрицательного на положительный и делает ее коррозионностойкой в атмосфере и во многих других промышленных средах (рис.9.9).

Нержавеющие стали разделяют на две основные группы: хромистые и хромоникелевые.

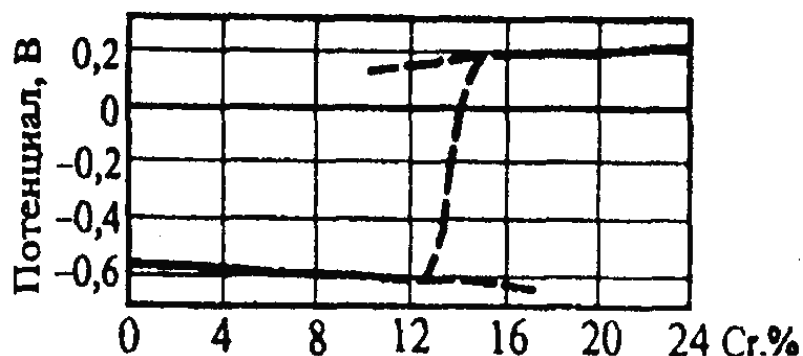


Рис.9.9 - Зависимость электрохимического потенциала железохромистых сплавов от содержания в них хрома

Хромистые коррозионностойкие стали применяют трех типов: с 13, 17 и 27% Cr, при этом в сталях с 13% Cr содержание углерода может изменяться в зависимости от требований в пределах от 0,08 до 0,40%. Структура и свойства хромистых сталей зависят от количества хрома и углерода. В соответствии со структурой, получаемой при нормализации, хромистые стали подразделяют на следующие классы: ферритный (стали 08X13, 12X17, 15X25T, 15X28), мартенситно-ферритный (12X1.3) и мартенситный (20X13,30X13,40X13).

Хромистые стали, содержащие 12—14% Cr, в зависимости от содержания углерода могут испытывать $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение (стали мартенситного класса) или не испытывать его (стали ферритного класса); в стали мартенситно-ферритного класса (12X13) $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение будет неполным. Наличие и полнота $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения определяют способность стали к упрочнению при термообработке: сталь с 0,1% C и 13% Cr не упрочняется при закалке из-за отсутствия $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, чем больше в стали углерода, тем полнее протекает мартенситное превращение, тем выше содержание углерода в мартенсите и его твердость. Однако повышение концентрации углерода в стали приводит к образованию карбидов, уменьшая при этом количество хрома в твердом растворе (а именно содержание хрома в твердом растворе и определяет коррозионную стойкость стали), при этом в стали возникает двухфазная структура. Стали с 13% хрома подвержены коррозионному растрескиванию и точечной коррозии в содержащих ионы хлора средах.

Стали с низким содержанием углерода (08X13, 12X13) пластичны, хорошо свариваются и штампуются. Их подвергают закалке в масле (1000—1050°C) с высоким отпуском при 600—800°C и применяют для изготовления деталей, испытывающих ударные нагрузки (клапаны гидравлических прессов) или работающих в слабоагрессивных средах

(лопатки гидравлических и паровых турбин и компрессора). Эти стали можно использовать при температурах до 450°C (длительная работа) и до 550°C (кратковременно). Стали 30X13 и 40X13 обладают высокой твердостью и повышенной прочностью. Эти стали закалывают с 1000—1050°C в масле и отпускают при 200—300°C. После такой обработки они сохраняют мартенситную структуру, характеризуются высокой твердостью (HRC 50—52) и достаточной коррозионной стойкостью. Стали 30X13 и 40X13 используют для изготовления карбюраторных игл, пружин, хирургических инструментов и т. д. Высокохромистые стали ферритного класса (12X17, 15X25Т и 15X28) обладают более высокой коррозионной стойкостью по сравнению со сталями, содержащими 13% Сг. Эти стали термической обработкой не упрочняются. Они склонны к сильному росту зерна при нагреве свыше 850°C. Для измельчения зерна и повышения сопротивления межкристаллитной коррозии (подробнее МКК рассматривается далее) сталь легируют титаном (15X25Т). Высокохромистые стали ферритного класса используются часто как окалиностойкие.

Хромоникелевые нержавеющие стали в зависимости от структуры подразделяют на аустенитные, аустенито-мартенситные и аустенито-ферритные (рис.9.10). Структура хромоникелевых сталей зависит от содержания углерода, хрома, никеля и других элементов.

Определить, к какому классу по структуре относится та или иная сложнолегированная хромоникелевая сталь, можно с помощью схематической диаграммы Шеффлера (рис. 9.10), в которой использованы в качестве критериев эквиваленты хрома ($\text{Э}_{\text{Cr}} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5\% \text{Si} + 0,5\% \text{Nb}$) и никеля ($\text{З}_{\text{Ni}} = \% \text{Ni} + 30\% \text{C} + 0,5\% \text{Mn}$).

Стали аустенитного класса с 18% Сг и 9—10% Ni (12X18Н9, 17X18Н9 и др.) в результате закалки приобретают аустенитную структуру и характеризуются высокой пластичностью ($\delta = 40—50\%$, $\psi = 50—60\%$), умеренной прочностью ($\sigma_{\text{в}} = 500—600 \text{ МПа}$), хорошей коррозионной стойкостью в окислительных средах. Эти стали технологичны (хорошо свариваются, штампуются, подвергаются холодной прокатке и т. д.).

Стали 12X18Н9, 17X18Н9 после медленного охлаждения из аустенитной области имеют структуру, состоящую из аустенита, феррита и карбидов M_{23}C_6 (Cr_{23}C_6). С целью растворения карбидов (выделение которых снижает коррозионную стойкость), а также предотвращения их выделения в процессе медленного охлаждения аустенитные стали нагревают до 1050—1120°C и закалывают в воде, масле или на воздухе. В процессе холодной пластической деформации (достигающей 60—70%) стали наклепываются ($\sigma_{\text{в}} = 1200—1300 \text{ МПа}$, $\delta = 4—5\%$). Упрочнение в процессе холодной пластической деформации связано с наклепом и частичным мартенситным превращением.

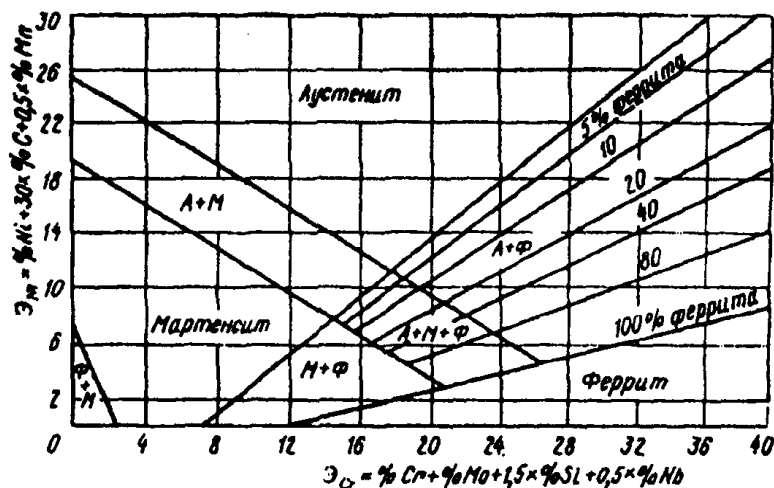


Рис. 9.10. Структурная диаграмма хромоникелевых нержавеющей сталей

Нагрев закаленных сталей в интервале 400—800°С приводит к выделению в пограничных зонах зерен карбидов хрома $M_{23}C_6$ и обеднению в связи с этим указанных зон хромом ниже 12% предела; это вызывает снижение электрохимического потенциала пограничных участков аустенитного зерна и их растворение в коррозионной среде. Коррозионное разрушение имеет межкристаллитный характер, приводит к охрупчиванию стали и называется *межкристаллитной* (интеркристаллитной) *коррозией* (МКК). Для уменьшения склонности сталей к МКК в их состав вводят сильные карбидообразующие элементы — Ti или Nb — в количестве, равном пятикратному содержанию углерода (стали 12X18H10T, 08X18H12Б). В этом случае образуются карбиды типа MC (TiC, NbC), а хром остается в твердом растворе. Стабильность аустенита в этих сталях обеспечивают повышением содержания никеля до 10—12%. Аустенитные стали не склонны к хрупкому разрушению при низких температурах, поэтому хромоникелевые коррозионностойкие стали (особенно с малым содержанием углерода — 08X18H10) широко используют в криогенной технике для хранения сжиженных газов, изготовления оболочек топливных баков, ракет и т.д.

Стали аустенито-мартенситного класса (09X15H8Ю, 09X17H7Ю) получили применение в основном как высокопрочные. Они хорошо свариваются, устойчивы против атмосферной коррозии. С целью обеспечения достаточной прочности и одновременно повышенной коррозионной стойкости сталь 09X15H8Ю подвергается следующей термической обработке: закалке на аустенит (925—975°С) с последующей обработкой холодом (-70 °С) и старением (350—380 °С).

После закалки сталь обладает высокой пластичностью ($\delta = 30\%$, $\sigma_B = 900$ МПа) и может пластически деформироваться и обрабатываться резанием. Обработка холодом вызывает превращение -80% аустенита в

мартенсит. Последующее старение приводит к дополнительному упрочнению стали ($\sigma_b = 1200\text{—}1300$ МПа, $\delta = 10\%$) за счет выделения в мартенсите дисперсных фаз типа Ni_3Al .

Значительное упрочнение стали достигается нагартовкой предварительно закаленной стали и последующим старением при $450\text{—}480^\circ\text{C}$ ($\sigma_b = 1100$ МПа, $\delta = 14\%$). По коррозионной стойкости полуаустенитные стали заметно уступают аустенитным, но в интервале $400\text{—}500^\circ\text{C}$ имеют преимущества по прочности.

Эти стали применяют для изготовления обшивки, сопловых конструкций и силовых элементов узлов летательных аппаратов.

Стали аустенито-ферритного класса (08X22H6T, 03X23H6, 08X21H6M2T, 10X25H5M2 и др.) содержат 18—30% Cr (чаще 20—25%), 5—8% Ni, до 3% Mo, 0,03—0,10% C, а также добавки Ti, Nb, Si, Si и N (иногда никель частично заменяют марганцем, например, в стали 08X18Г8H2T). Эти стали после закалки в воде с $1000\text{—}1100^\circ\text{C}$ имеют структуру, состоящую из равномерно распределенных между собой зерен аустенита и феррита с содержанием последнего порядка 40—60%. В то же время в зависимости от химического состава стали соотношение указанных фаз в ней может существенно изменяться (рис. 9.10). Механические свойства закаленных аустенито-ферритных сталей находятся в следующих пределах: $\sigma_b = 510\text{—}700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 300\text{—}500$ МПа, $\delta = 18\text{—}25\%$ и $\psi = 45\text{—}55\%$. Пластическая деформация стали (08X22H6T) со степенью 35% приводит к значительному ее упрочнению $\sigma_b = 1350$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1200$ МПа, $\delta = 8\%$. Наклеп стали при производстве тонкого листа или проволоки снимают промежуточной термической обработкой. При этом для предотвращения охрупчивания охлаждение стали (после горячей пластической деформации или смягчающей термической обработки) ведут ускоренно. Температуру и продолжительность отпуска сталей для снятия напряжений выбирают с учетом предотвращения их охрупчивания в интервалах температур $450\text{—}500^\circ\text{C}$ (так называемая "хрупкость 475°C ", обусловленная упорядочением и расслоением феррита в приграничных объемах) и $650\text{—}850^\circ\text{C}$ (снижение пластичности и ударной вязкости стали за счет выделения из феррита и аустенита соответственно σ -фазы (FeCr) и карбидов M_{23}C_6). При этом необходимо учитывать, что лишь длительные нагревы аустенито-ферритных сталей выше 400°C вызывают их охрупчивание, а кратковременные технологические — не опасны. Поэтому предельная рабочая температура при длительной эксплуатации сварного оборудования из аустенито-ферритных сталей составляет $300\text{—}350^\circ\text{C}$.

Аустенито-ферритные стали имеют по сравнению с аустенитными ряд преимуществ: более оптимальный комплекс механических свойств (в частности, более высокий предел текучести); меньшую

предрасположенность к МКК и коррозионному растрескиванию; содержат меньше дефицитного никеля. Стали аустенито-ферритного класса не склонны к росту зерна при сохранении двухфазной структуры; они стойки как в окислительных, так и окислительно-восстановительных средах; обладают хорошей свариваемостью; могут деформироваться в режиме сверхпластичности. Повышенное содержание в аустенито-ферритных сталях хрома способствует возрастанию устойчивости аустенита по отношению к мартенситному превращению.

Аустенито-ферритные стали применяют в химическом и пищевом машиностроении, судостроении, авиации, медицине.

9.10. ЖАРОСТОЙКИЕ И ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ

Жаростойкие стали. Под жаростойкостью (окалиностойкостью) понимают сопротивление металла окислению в газовой среде при высоких температурах. К жаростойким относят стали, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии при температурах выше 550°C.

Для повышения окалиностойкости сталь легируют элементами (хромом, алюминием и кремнием), имеющими большее сродство к кислороду, чем железо, и образующими на поверхности стали плотные оксидные пленки типа $(Cr, Fe)_2O_3$, $(Al, Fe)_2O_3$ и др. В связи с тем, что диффузия (особенно кислорода) через эти пленки затруднена, наличие на поверхности указанных тонких пленок приводит к торможению процесса дальнейшего окисления. Стали, легированные Cr и Si, называют сильхромами; Cr и Al — хромами; Cr—Al—Si — сильхромами. Среди сильхромов широкое применение получили жаростойкие (с температурой окалинообразования 850°C) и одновременно жаропрочные (до 600°C) стали мартенситного класса 40X9C2 и 40X10C2M. Стали подвергаются закалке в масле с 1000—1050°C с последующим отпуском при 500—540°C (охлаждение на воздухе; сталь 40X9C2) или при 720—780°C (охлаждение в масле; сталь 40X10C2M). Ускоренное охлаждение после отпуска в масле или на воздухе необходимо для избежания охрупчивания сильхромов в интервале 450—600°C. Сильхромы применяют для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания и деталей печного отопления.

Сталь 10X1 ЗСЮ (сильхромаль) окалиностойка до 950°C, она устойчива в серосодержащих средах. Однако высокое содержание алюминия и кремния в сталях вызывает их охрупчивание, в связи с чем эти элементы добавляют в небольших количествах.

Ферритная сталь 08X17T жаростойка до 900°С и применяется в теплообменниках.

Аустенитные стали 12X18Н9Т и 36X18Н25С2 (см. табл. 9.1 и 9.3) обладают высокой технологичностью и достаточной прочностью при повышенных температурах. Они жаростойки соответственно до 800 и 1100°С.

Сталь 36X18Н25С2 благодаря добавке кремния обладает высокой жаростойкостью в среде с повышенным содержанием серы, она применяется для изготовления сопловых аппаратов и жаровых труб в газотурбинных установках.

Жаропрочные стали. Жаропрочные стали используются при работе под нагрузкой (в течение заданного промежутка времени) и обладают достаточной жаростойкостью при температурах выше 500°С. Легирование вносит существенный вклад в повышение жаропрочности сталей: во-первых, возрастает энергия межатомной связи в твердых растворах (а следовательно, затормаживаются диффузионные процессы); во-вторых, за счет легирования и термической обработки (закалка с последующим старением) формируется специальная гетерогенная структура, состоящая из твердого раствора и вкрапленных в него дисперсных карбидных или интерметаллидных фаз, когерентных с основой.

Жаропрочные стали перлитного класса — это низколегированные стали (12X1МФ, 25X1 МФ, 20X1М1Ф1БР и др.), содержащие 0,08—0,25% С и легирующие элементы — Сг, V, Мо, Nb. Ряд легирующих элементов (например, Мо, Сг), растворяясь в феррите, затормаживает диффузионные процессы, повышая тем самым прокаливаемость, температуру рекристаллизации и жаропрочность сталей. Роль ванадия и ниобия заключается в образовании дисперсных карбидов, упрочняющих твердый раствор. Хром повышает жаростойкость. Предельное максимальное содержание углерода 0,25% ограничивается опасностью обеднения феррита молибденом и снижения в связи с этим уровня прочностных и технологических свойств. Лучший комплекс механических свойств обеспечивается закалкой в масле (или нормализацией) с 880—1080°С с последующим высоким отпуском при 640—750°С. Стали перлитного класса используются для изготовления деталей, длительно (10000 ч и более) работающих в режиме ползучести при температурах до 500—580°С и малых нагрузках: это трубы пароперегревателей, арматура паровых котлов, детали крепежа. Длительная прочность $\sigma_{10^5}^{580}$ для стали 12X1МФ при 580°С равна 120 МПа.

Стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов (15X11МФ, 11X11Н2В2МФ, 15X12ВНМФ, 18X12ВМБФР и др.) используются при температурах до 580—600°С. Введение в

высокохромистые (8—13% Cr) стали вольфрама и ванадия совместно с молибденом способствует существенному повышению их жаропрочности. Стали с меньшим содержанием хрома (до 11% Cr) принадлежат к мартенситному классу, а с большим (11—13% Cr) — к мартенситно-ферритному. Стали закаливают на мартенсит с температур 1000—1100°C в масле или на воздухе. В процессе нагрева под закалку происходит растворение в аустените карбидов $M_{23}C_6$ и M_6C . После отпуска при 600—750°C стали приобретают структуру сорбита (смесь упрочненного легированного феррита и выделившихся мелких карбидов). Длительная прочность стали 15X12ВНМФ составляет при 550°C $\sigma_{10^5}^{580} = 200$ МПа. Стали используют для изготовления деталей газовых турбин и паросиловых установок.

К жаропрочным сталям мартенситного класса можно отнести также сильхромы 40X9C2 и 40X10C2M, рассмотренные в разделе жаростойких сталей.

Аустенитные стали обладают большей жаропрочностью, чем мартенситные, — их рабочие температуры достигают 700—750°C. Аустенитные стали пластичны, хорошо свариваются. По способу упрочнения аустенитные стали подразделяют на три группы:

- 1) твердые растворы, не упрочняемые старением;
- 2) твердые растворы с карбидным (MC , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, M_6C), упрочнением;
- 3) твердые растворы с интерметаллидным (Ni_3Ti , Ni_3Al , $Ni_3(Ti,Al)$, Ni_3Nb и др.) упрочнением.

Стали первой группы (08X15H24B4TP, 09X14H19B2BP) применяют в закаленном состоянии (закалка 1100—1160°C, вода или воздух). Эти стали используют для изготовления трубопроводов силовых установок высокого давления, работающих при 600—700°C.

Аустенитные жаропрочные стали с карбидным и интерметаллидным упрочнением, как правило, подвергают закалке с 1050—1200°C в воде, масле или на воздухе и последующему старению при 600—850°C. При закалке происходит растворение карбидов и интерметаллидов в твердом растворе (аустените) с их последующим выделением в мелкодисперсном виде при старении. Иногда применяют двойную закалку и ступенчатое старение.

В аустенитных сталях с карбидным упрочнением 45X14H14B2M, 40X15H7Г7Ф2МС высокая жаропрочность достигается введением в хромоникелевый аустенит 0,3—0,5% углерода и карбидообразующих элементов — Mo, W, V и др. После закалки, в процессе последующего старения образуются дисперсные карбиды типа $M_{23}C_6$ и MC , повышающие механические свойства сталей. Сталь 45X14H14B2M в отожженном состоянии (после выдержки при 810—830°C с охлаждением

на воздухе) используют для изготовления клапанов авиационных двигателей (табл. 9.3).

Стали с интерметаллидным упрочнением (10X11H20T3P, 10X11H23T3MP) содержат небольшое количество углерода и дополнительно легированы титаном, алюминием, молибденом и бором. Титан и алюминий образуют основную упрочняющую α' -фазу Ni_3Ti или Ni_3TiAl). Бор упрочняет границы зерен аустенита. Молибден легирует твердый раствор, повышая энергию межатомной связи. Стали используют для изготовления камер сгорания, дисков и лопаток турбин, а также сварных конструкций, работающих при температурах до 700°C.

Жаропрочные сплавы на железоникелевой основе (например, ХН35ВТ, ХН35ВТЮ и др.) дополнительно легированы хромом, титаном, вольфрамом, алюминием, бором (см. табл.9.1). Они упрочняются, как и аустенитные стали, закалкой и старением. Сплав ХН35ВТЮ применяют для изготовления турбинных лопаток и дисков, колец соплового аппарата и других деталей, работающих при температурах до 750°C.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы называют легированными сталями и сплавами?
2. Какова область применения легированных сталей?
3. Каковы особенности выплавки легированных сталей?
4. Правила маркировки легированных сталей.
5. Легирующие элементы и их влияние на свойства стали и сплавов.
6. Как называют основные группы легированных сталей и сплавов? Охарактеризуйте.
7. Особенности жаростойких и жаропрочных сталей.

10. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

10.1. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Алюминий отличают низкая плотность, высокие тепло- и электропроводность, хорошая коррозионная стойкость во многих средах за счет образования на поверхности металла плотной оксидной пленки Al_2O_3 . Технический отожженный алюминий АДМ (М — мягкий; $\sigma_B=80$ МПа, $\delta = 35\%$) упрочняется холодной пластической деформацией. Свойства нагартованного (Н) технического алюминия АДН: $\sigma_B=150$ МПа, $\delta = 6\%$. Алюминий высокопластичен и легко обрабатывается давлением, однако при обработке резанием возникают осложнения, одной из причин которых является налипание металла на инструмент.

Основные легирующие элементы в алюминиевых сплавах Zn, Mg, Ni, Fe, Mn - элементы, формирующие упрочняющие зоны и фазы. Марганец одновременно повышает коррозионную стойкость. Кремний является основным легирующим элементом в ряде литейных алюминиевых сплавов (силуминов), поскольку он участвует в образовании эвтектики.

Ni, Ti, Cr, Fe повышают жаропрочность сплавов, затормаживая процессы диффузии и образуя стабильные сложнолегируемые упрочняющие фазы. Литий в сплавах способствует возрастанию их модуля упругости. Вместе с тем магний и марганец снижают тепло- и электропроводность алюминия, а железо — его коррозионную стойкость.

Маркировка алюминиевых сплавов. В настоящее время одновременно «сосуществуют» две маркировки сплавов:

- 1) старая буквенно-цифровая (табл.10.1, 10.2) и
- 2) новая цифровая (рис.10.2).

Таблица 10.1 – Буквенно-цифровая маркировка алюминиевых сплавов

Принцип классификации	Сплав	
	название	обозначение
По химическому составу	—	АМг,АМц
По названию сплава	Дюралюмин	Д1,Д6
По технологическому назначению	Ковочный	АК6,АК8
По свойствам	Высокопрочный	В95,В96
По методу получения полуфабрикатов и изделий	Спеченный литейный	САП, САС, АЛ2
По виду полуфабрикатов	Проволочный	Амг5П

Наряду с этим имеется буквенно-цифровая маркировка технологической обработки полуфабрикатов и изделий, качественно отражающая механические, химические и другие свойства сплава (табл.8.4).

Примеры обозначения сплавов с помощью буквенно-цифровой и цифровой маркировок приведены в табл. 8.5.

Таблица 10.2 – Буквенно-цифровая маркировка технологической обработки деформируемых и литейных сплавов

Обозначение	Вид обработки, характеристика свойств материала	
	Деформируемые сплавы	Литейные сплавы
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
М	Мягкий, отожженный	Модифицированный
Т	Закаленный и естественно состаренный	—
Т1	Закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность	Состаренный
Т2	Закаленный и искусственно состаренный по смягчающему режиму для повышения вязкости разрушения	Отожженный
Т3	Закаленный и искусственно состаренный по смягчающему режиму для повышения сопротивления коррозии под напряжением	—
Т4	—	Закаленный
Т5	—	Закаленный и частично состаренный
Т6	—	Закаленный и полностью состаренный на максимальную твердость
Т7	—	Закаленный с последующим стабилизирующим отпуском
Т8	—	Закаленный с последующим смягчающим отпуском
Н	Нагартованный (5 — 7%)	—
П	Полунагартованный	—
Н1	Усиленно нагартованный (20%)	—
ТН	Закаленный, естественно состаренный и нагартованный	—
Т1Н	Закаленный, нагартованный и искусственно состаренный	—
ТП1	Закаленный и естественно состаренный, повышенной прочности	—

1	2	3
ГК	Горячекатаные (листы, плиты)	—
А	Нормальная плакировка	—
У	Утолщенная плакировка (8% на сторону)	—

Примечание. Буква П, входящая в маркировку сплава, указывает на то, что сплав проволочный.

10.2. КЛАССИФИКАЦИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Алюминиевые сплавы в основном подразделяются на *деформируемые* и *литейные*, поскольку в производстве порошковых (в том числе и гранулируемых) сплавов и *композиционных* материалов в той или иной мере используются процессы пластической деформации и литья.

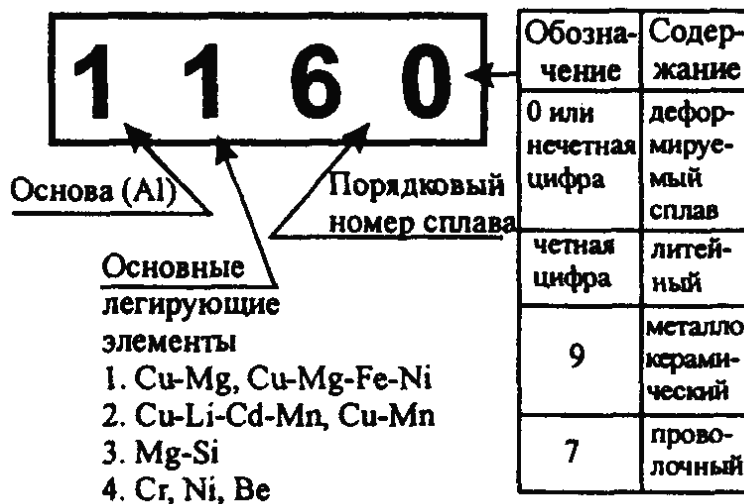


Рис.10.1 - Принципы цифровой маркировки алюминиевых сплавов

Таблица 10.3 – Примеры маркировок алюминиевых сплавов

Легирующие элементы	Маркировка		Легирующие элементы	Маркировка	
	буквенная	цифровая		буквенная	цифровая
Al (чистый)	АД00	1010	Cu, Mg, Mn, Si	AK6	1360
Mn	AMц	1400		AK8	1380
Mg— Mn	AMг1	1510	Cu, Mg, Fe, Ni, Si	AK4	1140
	AMг5	1550		AK4-1	1141
Mg— Si	AB	1343	Zn— Mg	—	1911
Si— Mg	Д1	1100	Zn-Mg-Si	B95	1950
	Д16	1160		B96Ц1	1960
	ВАД1	1191	Si— Mn	Д20	1200
	Д18	1187			

Алюминиевые сплавы разделяют также по способности упрочняться термической обработкой на упрочняемые (закалка с 435 - 545°С, естественное старение при 20°С или искусственное - при 75 - 225°С, 3 - 48ч) и не упрочняемые ей. Они могут подвергаться гомогенизационному (480 - 530°С, 6 - 3ч), рекристаллизационному (300 - 500°С, 0,5 - 3ч) и разупрочняющему (закаленные и состаренные сплавы - 350 - 430°С, 1 - 2ч) отжигу. Состав и механические свойства сплавов приведены в табл.10.4, 10.5.

Деформируемые алюминиевые сплавы. Коррозионностойкие сплавы повышенной пластичности разделяют на две основные группы:

а) сплавы на основе систем Al—Mn (АМц) и Al—Mg (АМгб), не упрочняемые термической обработкой. Их используют в отожженном (М), нагартованном (Н) или полунагартованном (П) состояниях. Эти сплавы хорошо свариваются. Их применяют для изготовления коррозионностойких изделий, получаемых методами глубокой вытяжки и сварки (например, сварных бензобаков, трубопроводов для масла и бензина, корпусов и мачт судов);

Таблица 10.4 - Классификация алюминиевых сплавов

Технология получения и обработки	Основные характеристики группы сплавов	Основные химические элементы и компоненты сплавов	Примеры сплавов
1	2	3	4
Деформируемые	Коррозионностойкие, повышенной пластичности	Al—Mn Al—Mg Al—Mg—Si	АМц АМгб АВ, АД31, АД33
	Пластичные при комнатной температуре	Al—Cu—Mg	Д18, В65
	Среднепрочные	Al—Si—Mg	Д1, Д16
	Высокопрочные	Al—Zn—Mg—Si	В95, В96Ц1
	Малой плотности, высоко модульные	Al—Mg—Li—Zr	1420
	Ковочные, пластичные при повышенной температуре	Al—Mg—Si—Cu	АК6, АК8
	Жаропрочные	Al—Si—Mg—Fe—Ni Al—Si—Mn	АК4-1 Д20, Д21
Спеченные	Жаропрочные	Al—Al ₂ O ₃ Al—Si—Mg—Al ₂ O ₃ Al—Cr—Zr	САП-1, САП-2 СПАК-4 01419
	Высоко модульные с пониженной плотностью	Al—Mg—Li—Zr	01429
	Сплавы с низким коэффициентом линейного расширения	Al—Si—Ni Al—Si—Fe	САС1-50 САС-2
	Высокопрочные	Al—Zn—Mg—Si	ПВ90

Продолжение табл.10.4

1	2	3	4
Литейные	Герметичные	Al— Si Al— Si— Mg Al— Si— Си—	АЛ2,АЛ4,АЛ9 АЛ34 АЛ4М.АЛ32
	Высокопрочные и жаропрочные	Al— Си— Mn Al— Си-Mn-Ni Al-Si-Си-Mg	АЛ19 АЛ33 АЛ3,АЛ5
	Коррозионностойкие	Al— Mg Al— Mg— Zn	АЛ8,АЛ27 АЛ24
Композиционные	Волокнистые: армированные борным волокном (Б. В.)	АД1— Б.В. АД33— Б.В.	ВКА-1 ВКА-2
	Сплавы, армированные стальной проволокой	Матрица: АД1, АВ; проволока 18Х15Н5АМ3	КАС-1,КАС-1А

Таблица 10.5 – Химический состав и механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание легирующих элементов, %						Режим технологической обработки	Механические свойства	
	Си	Mg	Mn	Si	Zn	другие элементы		σ_B , МПа	δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амц	—	—	1,3	—	—	—	П	170	10
Амгб	<0,1	6	0,65	<0,4	<0,2	Fe<0,4, Ti < 0,06	Н1	400	9
АВ	0,3	0,7	0,25	0,85	<0,2	Fe<0,5, Ti < 0,15	Т1	350	13
АД33	0,28	1,0	<0,15	0,6	<0,25	Fe<0,7, Cr = 0,25, Ti < 0,15	Т1	310	14
Д18	2,6	0,35	<0,2	<0,5	<0,1	Fe<0,5, Ti < 0,1	Т	300	24
Д16	4,35	1,5	0,6	<0,5	<0,3	Ni < 0,1, Fe<0,5	Т1	480	12
В96Ц1	2,3	2,65	0,55	<0,3	8,5	Zr = 0,13, Fe<0,3	Т2	660	8
1420	—	5,5	<0,3	0,2	—	Li = 24, Zr = 0,12	Т1	450	10
АК8	4,35	0,6	0,7	0,9	<0,3	Fe<0,7, Ni<0,1, Ti<0,1	Т1	480	10
АК4-1	2,3	1,5	<0,2	<0,35	<0,3	Ni = 1,1, Fe = 1,1, Cr<0,1	Т1	400	8
Д20	6,5	—	0,6	—	—	Ti = 0,15	Т1	400	12
САП-2	—	—	—	—	—	0,25 Fe, 10% Al ₂ O ₃	Н	350	7

Продолжение табл.10.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
САС1-50	—	—	—	27,5	—	Ni = 6,0	H	350	3
01419	—	—	—	—	—	Zr = 1,5, Cr = 1,5	T1	350	12
ПВ90	1,5	2,5	<1,0	—	8	Co = 1,5, Zr = 0,3	T1	780	7
АЛ2	<0,6	<0,1	<0,5	11,5	<0,3	Fe<1,5, Zr<0,1	—	170	6
АЛ34	<0,3	0,45	<0,1	7,5	<0,2	Ti = 0,2, Be = 0,27, B<0,1 Zr<0,2	T5	360	5
АЛ32	1,25	0,4	0,4	8,0	<0,3	Ti = 0,2, Zr<0,1, Fe<0,9	T1	200	2,5
АЛ19	4,9	<0,05	0,8	<0,3	<0,2	Ni<0,1, Ti = 0,25, Zr<0,2	T5	340	4
АЛ5	1,25	0,48	<0,5	5,0	<0,3	Be,Zr, Ti < 0,15, Pb < 0,01	T7	240	1,5
АЛ33	5,8	<0,05	0,8	<0,3	—	Ni = 1, Zr = 0,12, Ce = 0,22	T6	300	1,0
АЛ27	<0,15	10	<0,1	<0,2	<0,1	Ti = 0,1, Be = 0,1, Zr = 0,12	T4	360	18
АЛ24	<0,2	1,75	0,35	<0,3	4,0	Be, Zr<0,1, Ti = 0,15	T5	310	3

Примечание. Приведен ориентировочный состав алюминиевых сплавов.

б) сплавы системы Al—Mg—Si (АВ, АД31, АД33), упрочняемые закалкой (520—530°С) и искусственным старением (150—170°С, 10-42 ч). Эти сплавы, вне зависимости от состояния материала, не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением. Они удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии, а также свариваются с помощью точечной, шовной и аргонодуговой сварки. Большой коррозионной стойкостью обладают сплавы АД31 и АД33, работающие в интервале -70 до +50°С; сплав-авиаль АВ из указанной группы сплавов характеризуется большей прочностью. Из сплавов АВ, АД31 и АД33 изготавливают лопасти и детали кабин вертолетов, барабаны колес гидросамолетов.

Хорошим сочетанием прочности и пластичности отличаются сплавы системы Al—Cu—Mg— дюралюмины Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17 и

др. Они упрочняются термической обработкой, хорошо свариваются точечной сваркой, удовлетворительно обрабатываются резанием (в термоупрочненном состоянии), однако склонны к межкристаллитной коррозии после нагрева (особенно Д1, Д16 и В65). Значительное повышение коррозионной стойкости сплавов достигается плакированием (покрытием их техническим алюминием А7, А8). Сплавы Д19 и ВД17 работают при нагреве до 200—250°С (например, из сплава ВД17 изготавливают лопатки компрессора двигателя). В авиации дюралюмины применяют для изготовления лопастей воздушных винтов (Д1), силовых элементов конструкций самолетов (Д16, Д19), заклепок (В65.Д 18) и др.

В строительной индустрии с каждым годом увеличивается применение строительных алюминиевых сплавов в качестве основного конструкционного материала в несущих конструкциях зданий и сооружений, а не только в ограждающих элементах, оконных и дверных переплетах.

Основными достоинствами деформируемых и литейных сплавов являются: значительная удельная прочность, высокая технологичность (в холодном и в горячем состоянии), сохранение высоких прочностных свойств при отрицательных температурах, повышенная жаростойкость, значительная стойкость против коррозии.

Из сплавов марок Д1, Д6, Д16 изготавливают клепаные несущие конструкции сооружений и зданий (арки, фермы, балки и др.), а также различные элементы конструкций, совмещающих функции ограждающих и несущих конструкций (кровельные панели, каркасы стеновых панелей, подвижные потолки и др.). Для силовых элементов конструкций рекомендуется применять дюралюминий Д6 и Д16, а для элементов конструкций средней прочности сплав Д1. Сварку можно применять только в тех конструкциях, в которых сварные швы мало нагружены. Ответственные конструкции не рекомендуется сваривать, так как в околошовной зоне в результате нагрева прочность значительно понижается. Это не относится к сплавам АВ, АД31, АД33.

Высокопрочные сплавы системы Al—Zn—Mg—Cu (В93, В95, В96Ц) характеризуются большими значениями временного сопротивления (до 700 МПа). При этом достаточная пластичность, трещиностойкость и сопротивление коррозии достигаются режимами коагуляционного ступенчатого старения (Т2, Т3), а также применением сплавов повышенной (В95оч) и особой (В95оч) чистоты. В данном случае сплавы обладают лучшей коррозионной стойкостью, чем дюралюмины. Рабочая температура высокопрочных сплавов не превышает 120°С, так как они не являются теплопрочными. Сплавы используются для изготовления высоконагруженных изделий, как правило, работающих в условиях сжатия (стрингеры, шпангоуты, лонжероны и др.).

Высокомодульный сплав 1420 обладает за счет легирования алюминия литием и магнием (система Al—Mg—Li) с пониженной (на 11%) плотностью и одновременно с повышенным (на 4%) модулем упругости по сравнению со свойствами сплава Д16.

Сплав 1420 характеризуется коррозионной стойкостью (аналогичной сплаву АМгбМ) после закалки с искусственным старением (Т1), а также после сварки. Сплав может быть использован для замены в изделиях сплава Д16, обеспечивая при этом снижение их массы на 10—15%.

Высокой пластичностью при горячей обработке давлением обладают ковочные сплавы АКб и АК8 (система Al—Mg—Si—Сi). Они удовлетворительно свариваются, хорошо обрабатываются резанием, но склонны к коррозии под напряжением. Для обеспечения коррозионной стойкости детали из сплавов АКб и АК8 анодируют (электрохимически оксидируют) или наносят лакокрасочные покрытия. Из ковочных сплавов изготавливают ковкой и штамповкой детали самолетов, работающие под нагрузкой (рамы, пояса лонжеронов, крепежные детали). Эти сплавы способны работать при криогенных температурах.

Жаропрочные алюминиевые сплавы системы Al—Сi—Mn (Д20, Д21) и Al—Сi—Mg—Fe—Ni (АК4-1) применяют для изготовления деталей (поршни, головки цилиндров, диски и лопатки компрессоров), работающих при повышенных температурах (до 300°С). Жаропрочность достигается за счет легирования сплавов никелем, железом и титаном, затормаживающими диффузионные процессы и образующими сложнелегированные мелкодисперсные упрочняющие фазы, устойчивые к коагуляции при нагреве. Сплавы обладают высокой пластичностью и технологичностью в горячем состоянии, хорошо (Д20) или удовлетворительно (Д21, АК4-1) свариваются, однако отличаются пониженной коррозионной стойкостью; их защищают от коррозии анодированием и лакокрасочными покрытиями. При 250°С большей жаропрочностью обладают сплавы Д21 ($\sigma_{100}^{250} = 130$ МПа) и Д20 ($\sigma_{100}^{250} = 125$ МПа) по сравнению со сплавом АК4-1 ($\sigma_{100}^{250} = 90$ МПа).

10.3. ЛИТЕЙНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Основные требования к сплавам для фасонного литья — это сочетание хороших литейных свойств (высокой жидкотекучести, небольшой усадки, малой склонности к образованию горячих трещин и пористости) с оптимальными механическими и химическими (сопротивление коррозии) свойствами. Лучшими литейными свойствами

обладают сплавы эвтектического состава. Больше распространены сплавы на основе систем Al—Si, Al—Si, Al—Mg.

Конструкционные герметичные сплавы систем Al—Si (АЛ2) и Al—Si—Mg (АЛ4, АЛ9, АЛ34) получили название силумины. АЛ2 близок к эвтектическому составу (10—13% Si) и отличается высокими литейными свойствами, коррозионной стойкостью, большой плотностью отливок. В то же время структура сплава АЛ2, представляющая собой игольчатую грубую эвтектику с включениями кристаллов первичного кремния, не обеспечивает требуемых механических свойств материала. Повышение пластичности сплава за счет изменения структуры (измельчение структуры эвтектики, появление избыточных кристаллов α -твердого раствора вместо кремния) достигается модифицированием АЛ2 натрием (0,065%) посредством введения в расплав смеси солей (67% NaF + 33% NaCl) (рис.10.2). Термической обработкой сплав АЛ2 не упрочняется. Легированные силумины АЛ4, АЛ9, АЛ34 упрочняются термической обработкой по режимам Т1, Т4, Т5, Т6. Силумины обладают хорошими литейными свойствами, удовлетворительной обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозионной стойкостью, для повышения которой детали анодируют и защищают лакокрасочными покрытиями. Сплав АЛ2 используют для изготовления мелких, а АЛ4 и АЛ9 — средних и крупных литых деталей (корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания). Сплав АЛ34 (ВАЛ5) превосходит сплавы АЛ4 и АЛ9 по прочности на 25—50%. Сплав АЛ34 применяется для отливок, получаемых литьем под давлением (блоков цилиндров автомобильных двигателей), и отличается хорошим комплексом технологических свойств.

Высокопрочные и жаропрочные литейные сплавы. В эту группу входят сплавы систем Al—Si—Mn (АЛ 19), Al—Si—Mn—Ni (АЛ33) и Al—Si—Si—Mg (АЛ3, АЛ5).

Легирование сплава АЛ19 титаном обеспечивает ему высокие механические свойства (в том числе при динамическом нагружении) при комнатной и низких температурах, а дополнительное легирование церием и цирконием — жаропрочность при температурах до 300⁰С. Сплав отличается хорошей обрабатываемостью резанием и свариваемостью, но пониженной коррозионной стойкостью. Сплав АЛ19 упрочняется термообработкой по режимам Т4, Т5, Т7, он широко используется для литья крупногабаритных отливок в песчаные формы.

Сплав АЛ33 характеризуется высокой жаропрочностью ($\sigma_{100}^{300} = 90$ МПа), хорошей обрабатываемостью резанием, однако имеет пониженные литейные свойства и коррозионную стойкость. Он термически упрочняется по режимам Т5—Т7. Температура работы сплава АЛ33 — до 350⁰С.

Сплавы АЛ3 и АЛ5 отличаются повышенной жаропрочностью при температурах до 250—270°С, но пониженной коррозионной стойкостью. Сплавы упрочняют по режимам Т5—Т8, из них изготавливают корпуса приборов, головки цилиндров двигателей, работающие при повышенных температурах (250—270°С).

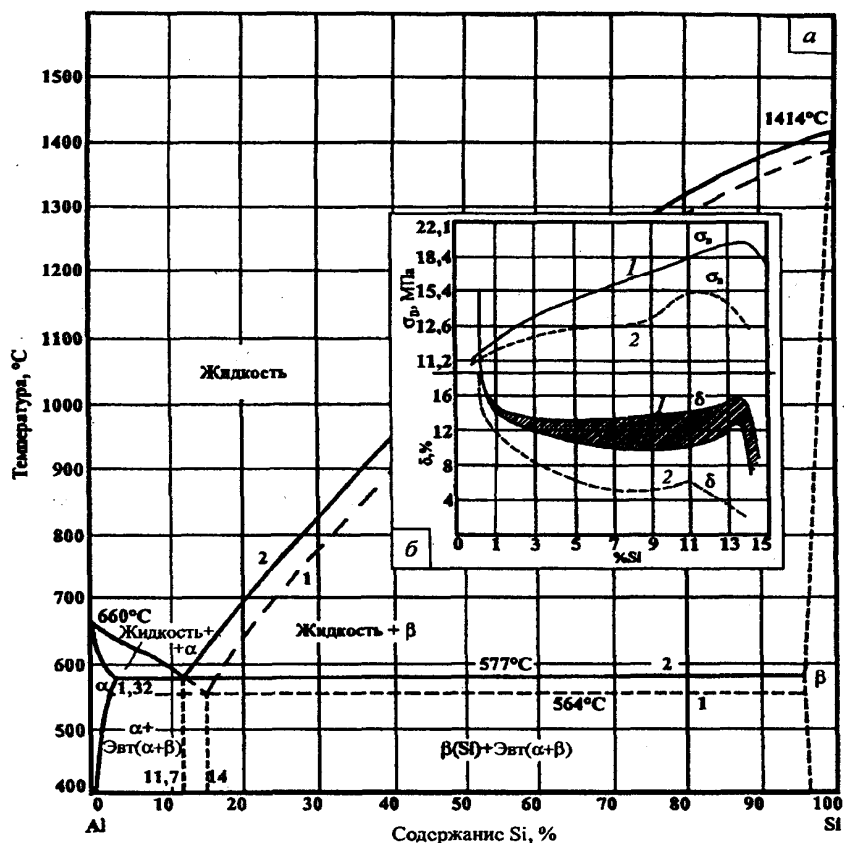


Рис.10.2 - Влияние модифицирования на вид диаграммы состояния Al—Si (а) и механические свойства сплавов этой системы (б): 1 — после модифицирования; 2 — до модифицирования

Коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы. Сплавы систем Al—Mg (АЛ8, АЛ27) и Al—Mg—Zn (АЛ24) обладают высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, обрабатываются резанием и свариваются. Дополнительное легирование сплавов системы Al—Mg бериллием, титаном и цирконием вызывает измельчение зерна и затормаживание процесса естественного старения, приводящего к снижению пластичности и коррозионной стойкости. Поэтому сплавы системы Al—Mg упрочняются только закалкой в масле без последующего старения (Т4). Сплавы АЛ8, АЛ27 и АЛ27-1 характеризуются невысокими литейными свойствами и низкой жаропрочностью (рабочие

температуры до 80°C). Сплавы способны работать в условиях коррозии морской воды вместо дефицитных бронз, латуней и нержавеющей сталей.

Сплавы системы Al—Mg—Zn (АЛ24) обладают стабильными механическими свойствами, хорошей жаропрочностью (до 150°C) и удовлетворительными литейными свойствами. Сплав АЛ24 упрочняется естественным или искусственным старением без предшествующей закалки (Т1) либо закалкой с 550°C (на воздухе или в кипящей воде) с последующим искусственным старением (165°C, 22 ч) для повышения прочности.

Спеченные алюминиевые сплавы (порошковые и гранулированные) характеризуются повышенными механическими и физическими свойствами.

Спеченный алюминиевый порошок (САП) — это материал, полученный холодным, а затем горячим брикетированием (прессованием под давлением 700 МПа при 500—600°C) предварительно окисленной алюминиевой пудры (чешуек толщиной до 1 мкм). Потом из горячепрессованных брикетов ковкой, прокаткой или прессованием изготавливают изделия или полуфабрикаты. Поскольку каждая частичка пудры покрыта тонким слоем оксида алюминия, то чем тоньше пудра, тем больше в САПе оксида алюминия, выше его прочность, но ниже пластичность; в САПе содержится Al₂O₃ от 6 до 22%. САП характеризуется высокой прочностью и жаропрочностью при повышенных температурах (350—500°C). Так, временное сопротивление САПа при 500°C колеблется в интервале 80—120 МПа (в зависимости от содержания Al₂O₃). Разновидностью САПа является сплав СПАК-4 (системы Al—Si—Mg—Al₂O₃), в котором впервые использовано совместное упрочнение алюминиевой матрицы оксидами (Al₂O₃) и интерметаллидами (например, Al₃FeNi и др.). Обладая высокой длительной прочностью при 350°C (в 2—2,5 раза большей, чем у сплава АК4-1), сплав СПАК4 может применяться для работающих на форсированных режимах поршней.

Спеченные алюминиевые сплавы систем Al—Si—Ni (САС-1) и Al—Si—Fe (САС-2), отличающиеся низким коэффициентом термического расширения, изготавливают из порошков, полученных пульверизацией жидких сплавов. Это обеспечивает сплавам достаточно равномерную дисперсную структуру, содержащую мелкие включения кремния и интерметаллидов.

В настоящее время получили распространение гранулируемые алюминиевые сплавы, отличающиеся высоким содержанием легирующих элементов (Mn, Cr, Zr, Ti, V), нерастворимых или малорастворимых в алюминии. Гранулирование (получение гранул — литых частиц с диаметром от нескольких миллиметров до десятых долей миллиметра) осуществляют распылением расплава с высокими скоростями охлаждения

(10^4 — 10^8 °C/c) в воде. При этом образуются пересыщенные переходными металлами твердые растворы на основе алюминия; одновременно изменяется структура: грубые первичные и эвтектические включения интерметаллидов (присущие слиткам, получаемым по обычной технологии) становятся более тонкими и равномерно распределенными, что повышает механические свойства сплавов. Из гранул изготавливают прессованные полуфабрикаты и листы любых алюминиевых сплавов. В процессе горячей деформации при получении полуфабрикатов аномально пересыщенные твердые растворы распадаются с выделением дисперсных частиц интерметаллидов. Таким образом, технологический нагрев до 400—450°C при изготовлении полуфабрикатов является упрочняющим старением сплава. Роль закалки для таких сплавов играет кристаллизация при больших скоростях охлаждения.

Дисперсионно твердеющим гранулируемым является сплав 01419 системы Al—Cr—Zr, который упрочняется вследствие выделения фаз Al_3Zr , Al_7Cr при прессовании прутков. Сплав обладает повышенной жаропрочностью до 350°C.

Другой группой гранулируемых сплавов являются высокопрочные сплавы типа В95, В96Ц системы Al—Zn—Mg—Si (например, ПВ90), упрочняемые термической обработкой. Сплав ПВ90Т1 превосходит по прочности и температуре рекристаллизации все серийные деформируемые алюминиевые сплавы. Сплав ПВ90 хорошо полируется и обрабатывается резанием. Обладая размерной стабильностью, он перспективен для изготовления зеркал, узлов трения и других ответственных деталей высокоточных приборов.

Композиционные алюминиевые сплавы. Волокнистые композиционные материалы получают, армируя алюминиевые сплавы АД1, АД33 борными волокнами (ВКА-1, ВКА-2). Эти материалы используют для изготовления стрингеров, труб. Для композиционных материалов ВКА-1 и ВКА-2 характерны высокие значения циклической прочности. *Алюминиевые сплавы, армированные стальной проволокой* (КАС-1, КАС-1А, см. табл. 8.6), могут подвергаться гибке, обладают высокой ударной вязкостью и жаропрочностью, большим сопротивлением распространению усталостной трещины и значительной прочностью. Применение накладок (стопперов) из материала КАС уменьшает скорость распространения трещины более чем в пять раз по сравнению с накладками из титановых сплавов.

10.4. МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ

Медь и ее сплавы находят широкое применение в электротехнике, электронике, приборостроении, литейном производстве,

двигателестроении. Так, 50% полученной меди потребляется электротехнической и электронной отраслями промышленности. Она стоит на втором месте (вслед за алюминием) по объему производств среди цветных металлов.

Медь обладает ценными техническими и технологическими свойствами: высокими электро- и теплопроводностью, достаточной коррозионной стойкостью, хорошо обрабатывается давлением, сваривается всеми видами сварки, легко поддается пайке, прекрасно полируется. У чистой меди небольшая прочность и высокая пластичность (табл.10.6).

Таблица 10.6 - Свойства сплавов на основе меди

Марка сплава	γ Мг/м ³	λ , Вт/(м·К)	E , ГПа	σ_b , МПа	δ , %	НВ, кгс/мм ²	Способ получения и обработки
1	2	3	4	5	6	7	8
Медь М1	8,94	386,2	132	400 (240)	6(58)	110(45)	Н(О)
Л96	8,85	244,8	114	400 (240)	2(52)	145 (53)	Н(О)
Л90	8,8	188,3	110	660(260)	4(44)	130(53)	Н(О)
Л70	8,53	121,3	112	680(330)	3(55)		Н(О)
ЛС59-1	8,5	104,6	105	650(400)	6(45)	170(75)	Н(О)
ЛЖМц59-1-1	8,5	75,3	106	700(420)	10(50)	170(75)	Н(О)
ЛЦ16К4				294 (343)	15 (15)	100(110)	П(К)
ЛЦ40С				215 (215)	12(20)	70 (80)	П(К)
БрОФ6,5-0,4	8,8	73,2	112	750 (400)	10(65)	180 (80)	Н(О)
БрОЦ4-3	8,8	83,7	100	680(400)	4(40)	160(60)	Н(О)
БрОЦС4-4-2,5	9,02	83,7	75	600 (350)	2(40)	160(60)	Н(О)
БрОЗЦ12С5				176 (206)	8(5)	60 (60)	П(К)
БрО5Ц5С5				147 (176)	6(4)	60 (60)	П(К)
БрО5С25	9,1	58,6	70	147(137)	5(6)	45 (60)	П(К)
БрО10Ф1				216 (245)	3(3)	80 (90)	П(К)
БрА5	8,2	104,6	105	780 (380)	4(55)	190 (60)	Н(О)
БрАЖ9-4	7,5	58,6	113	980 (600)	5(33)	180 (110)	Н*(О)
БрАЖН10-4-4	7,5	75,3	119	1080(700)	5(25)	225 (150)	Н*(О)
БрА9ЖЗЛ				392(490)	10(12)	100(100)	П(К)
БрАИЖ6Н6				587(587)	2(2)	250(250)	П(К)
БрБ2,5	8,2	83,7	133	560 (1300)	30(2)	130 (440)	3(3+С)
БрКМц3-1	8,4	37,7	105	750 (400)	13 (60)	200 (90)	Н(О)

Продолжение табл.10.6

1	2	3	4	5	6	7	8
БрХ0,5	8,9	167,4	112	240 (410)	50(22)	65 (130)	3(3+С)
БрЦр0,4	8,85	334,7	137	270 (480)	35 (17)	65 (135)	3(3+Н+С)

Примечание. Н — сплав наторгованный, упрочненный со степенью пластической деформацией 50% (Н) и 40% (Н*), О — отожженный при 600°C после соответствующей степени деформации; З — закаленный, (З+С) — после закалки и старения, (З+Н+С) — закаленный, наторгованный и состаренный; П — литье в песчаные формы, К — литье в кокиль.

Недостатками меди являются ее высокая стоимость, значительная плотность, большая усадка при литье, горячеломкость, сложность обработки резанием.

Температура плавления меди 1083°C, плотность 8,94 Мг/м³. Она обладает ГЦК решеткой, диамагнитна и не имеет полиморфизма. Удельное электрическое сопротивление меди равно 0,0178 мкОм·м. Нашей промышленностью производится 11 марок меди с различным содержанием примесей. В электронике применяют бескислородную (б) медь марок МООб (99,99% Си) и МОб (99,97% Си), в электротехнике и металлургии МО (99,95% Си), М1 (99,9% Си), М2 (99,7% Си) и др.

По характеру взаимодействия с медью легирующие элементы и примеси разделяют на три группы:

1.Элементы (Ag, Al, As, Au, Cd, Fe, Ni, Pt, P, Sb, Sn, Zn), взаимодействующие с медью с образованием твердых растворов. Они повышают ее прочность, но при этом существенно уменьшаются значения (в первую очередь, из-за присутствия сурьмы и мышьяка) тепло- и электропроводности.

2.Элементы (Bi, Pb), практически нерастворимые в меди в твердом состоянии и образующие с ней легкоплавкие эвтектики. Возникновение эвтектик по границам зерен приводит к разрушению слитков меди в процессе их горячей прокатки (явление красноломкости). Повышенное (более 0,005%) содержание висмута вызывает хладноломкость меди.

3.Элементы (Se, S, O, Te и др.), образующие с медью хрупкие химические соединения (например, Cu₂O, Cu₂S). Увеличение содержания серы в меди, с одной стороны, обеспечивает повышение качества ее механической обработки (резанием), с другой стороны, вызывает хладноломкость меди. Присутствие кислорода в меди является причиной ее «водородной болезни», проявляющейся в образовании микротрещин и разрушении при отжиге (t > 400°C) в водородсодержащей среде. В данном случае водород, активно диффундирующий в металл, отнимает кислород у окиси меди Си₂О с образованием паров воды. В металле возникают области с высоким давлением, вызывающим разрушение материала.

Сплавы меди с цинком называют латунями, томпаками (до 10% Zn) или полутомпаками (от 10 до 20% Zn), за исключением сплавов с никелем, все другие ее сплавы называют бронзами.

10.5. ЛАТУНИ

Деформируемые латуни обозначают (по ГОСТ 15527—70) буквой Л и цифрой, указывающей массовое содержание меди, в сплаве в процентах (например, Л96, Л63). Если латунь легирована наряду с цинком другими элементами, то после буквы Л ставят условное обозначение этих элементов: С — свинец; О — олово; Ж — железо; А — алюминий; К — кремний, Мц — марганец; Н — никель. Числа после букв показывают массовое содержание меди и последующих (согласно буквам) легирующих элементов, кроме цинка (например, ЛАН59-3-2 содержит 59% Си, 3% А1, 2% Ni, Zn — остальное).

Маркировка литейных латуней (по ГОСТ 17711—93) начинается также с буквы Л. После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего (как в сталях) ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23% Zn, 6% А1, 3% Fe и 2% Mn.

Как уже указывалось, основной легирующий элемент в латуни — цинк; при его содержании до 39% сплавы являются однофазными α -твердыми растворами цинка в меди (рис.10.3, а). Количество цинка свыше 39% приводит к выделению из твердого раствора электронного соединения CuZn с неупорядоченной пластичной (β -фаза) или упорядоченной хрупкой (β' -фаза, существует ниже 468—454°C) структурой. В технике применяют латуни, содержащие до 45—50% цинка (со структурой $\alpha, \alpha + \beta, \beta'$), поскольку при дальнейшем увеличении цинка в сплаве прочность латуни уменьшается, а хрупкость увеличивается. Как видно из рис.10.3, в области α -твердого раствора с увеличением содержания цинка происходит одновременный рост прочности и пластичности сплава, в двухфазной ($\alpha + \beta'$)-области пластичность уменьшается с повышением концентрации цинка, а прочность сохраняет рост ориентировочно до 43% Zn; в области β' - фазы из-за ее хрупкости наблюдается резкое снижение прочности латуни по мере увеличения доли цинка.

По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, твердостью, коррозионной стойкостью и жидкотекучестью. Однофазные α -латуни хорошо воспринимают холодную и горячую пластическую деформацию. Двухфазные ($\alpha + \beta'$)-латуни подвергаются горячей пластической деформации в температурном интервале ($\alpha + \beta$)- или β -

областей, поскольку эти сплавы при температурах холодной деформации обладают малой пластичностью.

В сложных (специальных) латунях общее содержание дополнительных легирующих компонентов обычно не превышает 9%. Многие из них (Al, Mn, Fe, Si и др.), подобно цинку (но с более значительным эффектом) повышают прочность и твердость латуни, однако при этом уменьшают ее пластичность. Специальные латуни часто бывают двухфазными ($\alpha+\beta'$), поскольку дополнительные легирующие элементы (за исключением никеля), снижая растворимость цинка в меди, создают условия для выделения β' -фазы из α -твердого раствора. Добавка свинца приводит к улучшению антифрикционных свойств и обрабатываемости резанием. Al, Mn, Sn, Ni повышают коррозионную стойкость латуней. Нагартованные латуни с содержанием Zn более 20% необходимо отжигать при 250—300°C во избежание коррозионного растрескивания в присутствии влаги, кислорода и аммиака. Латуни подразделяют на деформируемые и литейные в зависимости от технологии получения полуфабрикатов и изделий.

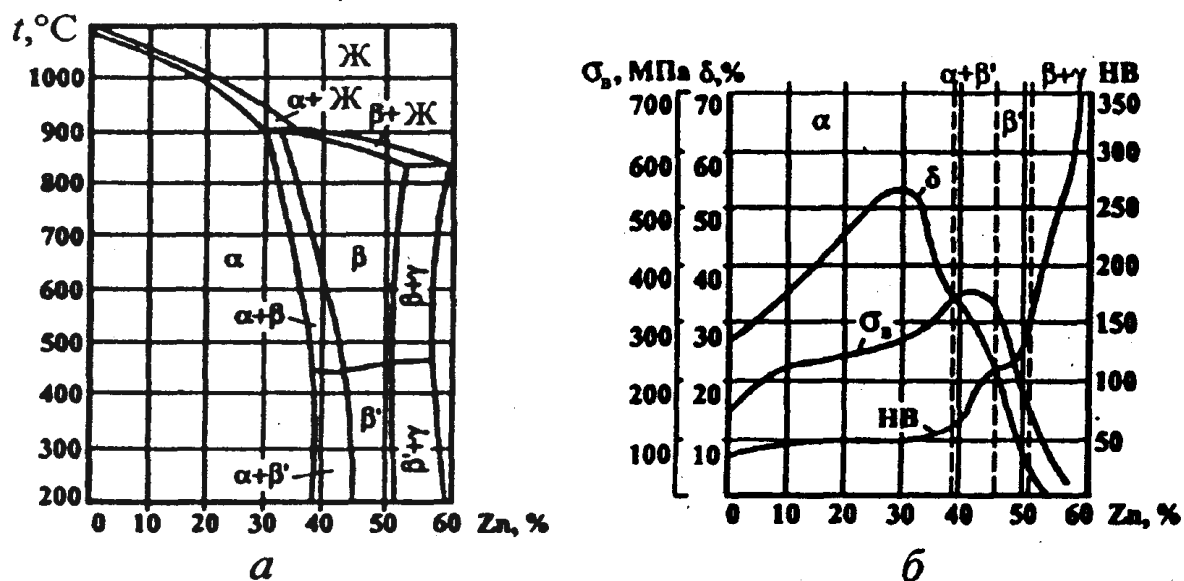


Рис.10.3 - Влияние содержания цинка на фазовый состав (а) и механические свойства (б) сплавов меди

Деформируемые латуни используются при производстве изделий и полуфабрикатов различными способами обработки металлов давлением.

Применяемые α -латуни (Л96, Л90) обладают высокой пластичностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью. С повышением содержания цинка в α - (Л70) и ($\alpha+\beta'$)-латунях (Л62) достигается более высокая прочность, но снижается коррозионная

стойкость. Эти латуни лучше обрабатываются резанием, чем медь или томпак. Специальные латуни, легированные железом (ЛЖМц59-1-1) или особенно оловом (ЛО70-1), отличаются высокой коррозионной стойкостью в условиях воздействия атмосферных явлений, а также в пресной и морской воде. «Автоматная» латунь ЛС59-1, обладающая сыпучей стружкой, используется для изготовления деталей, в том числе метизов (винтов, болтов, гаек, шайб и др.) на станках-автоматах. Структура и свойства ($\alpha+\beta'$)-латуней изменяются в зависимости от скорости охлаждения после отжига, что обусловлено протеканием процессов рекристаллизации и фазовых превращений. Так, быстрое охлаждение обеспечивает повышение количества β' -фазы и, как следствие, твердости латуни, а медленное, наоборот, увеличивает количество α -фазы и тем самым, пластичность материала. Перед пластическим деформированием проводят рекристаллизационный отжиг латуней при 500—600°С с целью уменьшения их твердости и обеспечения полуфабрикатам необходимого комплекса свойств. При этом для облегчения отделения окалина от металла его охлаждение после отжига осуществляют на воздухе или в воде.

Литейные латуни используют для фасонного литья. В основном применяют сложнелегированные сплавы. Легирующие элементы по-разному влияют на литейные свойства сплавов. Так, железо и марганец снижают жидкотекучесть латуни, а олово (до 2,5%) ее повышает. Алюминий и кремний (в отдельности) повышают жидкотекучесть двойных латуней. В то же время наличие примесей алюминия в кремнистой латуни ЛЦ16К4 приводит к снижению ее жидкотекучести и способствует возникновению в отливках пористости.

Для литья арматуры часто используют кремнистую латунь ЛЦ16К4, а втулки и сепараторы шариковых и роликовых подшипников льют из свинцовой латуни ЛЦ40С. Необходимо отметить, что некоторые сложнелегированные деформируемые латуни по составу близки к литейным сплавам (например, ЛС59-1 и ЛЦ40С).

10.6. БРОНЗЫ

Маркируют бронзы буквами Бр, затем буквами последовательно указывают легирующие элементы и в конце их содержание в сплаве. Так обозначают деформируемые бронзы (по ГОСТ 5017—74, 18175—78). Например, БрОФ6,5-0,4 содержит 6,5% Sn и 0,4% P, Si — остальное. Обозначение элементов в бронзах то же, что и при маркировке латуней. Кроме того, фосфор обозначают буквой Ф, цинк — Ц, хром — Х, бериллий — Б, цирконий — Цр. Маркировка литейных бронз (по ГОСТ 613—79, 493—79) начинается также с букв Бр, а дальше производится

аналогично обозначению литейных латуней. Например, БрОЗЦ12С5 содержит 3% Sn, 12% Zn и 5% Pb.

Оловянные бронзы по структуре бывают однофазными (α -твердый раствор олова в меди) и двухфазными, состоящими из α - и δ (Cu₃₁Sn₈)-фаз. Обычно δ -фаза выделяется при содержании олова, большем 7—9%. Она повышает твердость и хрупкость бронз.

Для анализа превращений, протекающих в оловянных бронзах, представляют интерес следующие фазы, образующиеся в системе Си—Sn (рис.10.4, а): α -твердый раствор олова в меди с ГЦК решеткой, три электронных соединения β (Cu₅Sn)-, δ (Cu₃₁Sn₈)- и ϵ (Cu₃Sn)-фазы, а также γ -фаза (твердый раствор на базе химического соединения). При температурах ниже 350°C δ -фаза должна распадаться с образованием α - и ϵ -фаз. Однако это превращение протекает настолько медленно, что при реальных условиях охлаждения (20—500°C/мин.) оно не происходит. Поэтому низкооловянные бронзы (до 7% Sn) имеют однофазную структуру α -твердого раствора, а структура высокооловянных (более 7—9% Sn) сплавов состоит из двух структурных составляющих: α -твердого раствора и эвтектоида ($\alpha+\delta$). С увеличением скорости затвердевания возрастает количество эвтектоида и формируется дендритная структура сплава. Повышение содержания олова приводит к возрастанию прочности литейных бронз, но с появлением большого количества хрупкой δ -фазы она резко падает (рис.10.4,б). При этом также заметно снижается пластичность. Легирующие элементы в оловянных бронзах улучшают их литейные свойства (Zn, P, Ni), повышают твердость, прочность, износостойкость (P, Ni), коррозионную стойкость (Ni), а также антифрикционные свойства (P, Pb). В то же время алюминий и кремний, присутствующие даже в очень малых (сотые доли процента) количествах, резко снижают механические свойства и герметичность отливок.

Деформируемые оловянные бронзы (БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-2,5) имеют однофазную структуру (α -твердый раствор), поскольку содержат до 7% Sn. Их дополнительно легируют фосфором (до 0,4%), цинком (до 4%) и свинцом (до 2,5%). Полуфабрикаты (лента, проволока, прутки) поставляются как в нагартованном, так и отожженном виде. Из них изготавливают упругие элементы (пружины, мембраны и др.). По сравнению с литейными деформируемые бронзы характеризуются более высокой прочностью, вязкостью, пластичностью (в отожженном состоянии) и сопротивлением усталости. По усталостным характеристикам они уступают лишь бериллиевой бронзе.

Литейные оловянные бронзы (БрОЗЦ12С5, БрОЗЦ7С5Н1, БрО5Ц5С5, БрО5С25, БрО10Ф1) имеют двухфазную структуру (α и δ). По сравнению с деформируемыми литейные бронзы содержат большее количество легирующих элементов (цинка, свинца, фосфора). Оловянные бронзы склонны к образованию усадочной пористости, что вызвано

широким интервалом (150—200°С) кристаллизации сплавов. Для них характерна невысокая жидкотекучесть, но в то же время малая линейная усадка. Оловянные бронзы коррозионностойки и обладают высокими антифрикционными свойствами.

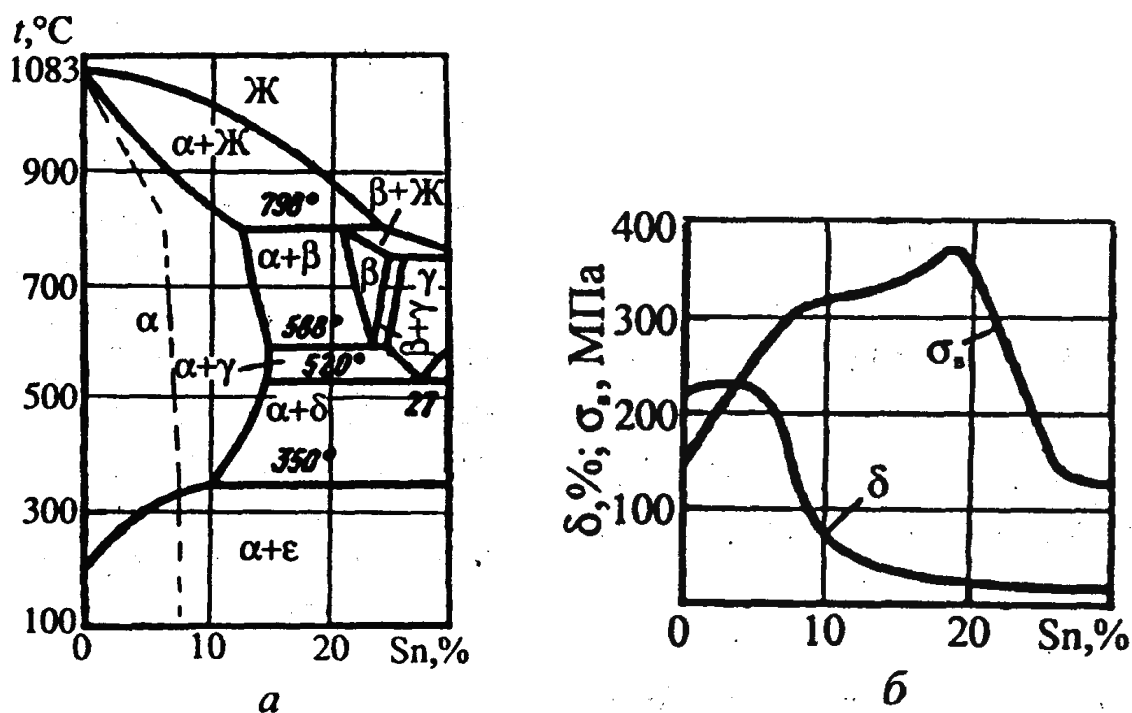


Рис.10.4 - Влияние содержания олова на фазовый состав (а) и механические свойства (б) сплавов меди (пунктиром показан неравновесный солидус диаграммы состояния)

В промышленности применяют бронзы, содержащие до 10—12% Sn из-за возрастающей хрупкости при увеличении концентрации олова. Повышение пластичности бронзы достигается гомогенизацией при 700—750°С с последующим быстрым охлаждением сплава. При этом уменьшается дендритная ликвация в сплаве и его структура приближается к равновесной. Отжиг отливок при 550°С устраняет внутренние напряжения в них.

Алюминиевые бронзы могут быть как двойными (например, БрА5), так и дополнительно легированными никелем, марганцем, железом и др. Содержащие до А—5% Al бронзы характеризуются высокой пластичностью. При ускоренном охлаждении сплавов с 6—8% Al в структуре наряду с пластичным α -твердым раствором алюминия в меди появляется твердая, хрупкая γ' -фаза ($\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$). Поэтому двухфазные сплавы ($\alpha+\gamma'$) обладают высокой прочностью, но пониженной пластичностью по сравнению с однофазными. Никель и железо повышают механические свойства бронз и их износостойкость.

Алюминиевые бронзы хорошо пластически деформируются как в холодном (сплавы, содержащие менее 7—8% Al), так и горячем состоянии, коррозионностойки, обладают высокими механическими свойствами. Они имеют хорошие литейные свойства, однако при литье образуется концентрированная усадочная раковина. Устранение ликвации достигается гомогенизацией при 700—750°C. Алюминиевые бронзы бывают деформируемыми и литейными. Многокомпонентные бронзы (например, БрАЖН10-4-4), содержащие более 9—11% Al, упрочняются закалкой (с температуры 980°C для указанной марки сплава) и старением (при 400°C). При этом твердость повышается в два раза (с 200 НВ до 400 НВ).

Кремнистые бронзы (БрКМцЗ-1) характеризуются хорошей прочностью и пластичностью. Они немагнитны, морозостойки. Никель и марганец повышают механические и коррозионные свойства кремнистых бронз. Сплавы свариваются, подвергаются пайке.

Бериллиевые бронзы обладают высокими механическими (в частности, упругими) свойствами, стойкостью против коррозии и удовлетворительной электро- и теплопроводностью, хорошо свариваются. Широко известны бронзы, содержащие 1,6—2,6% Be, 0,2—0,5% Ni, 0,1—0,25% Ti (БрБ2; БрБ2,5; БНТ-1,9; БНТ-1,7, где цифры указывают содержание бериллия в мас.%). Бериллиевые бронзы упрочняются закалкой (760—800°C) со старением (300—350°C, 2 ч). В результате закалки фиксируется пересыщенный α -твердый раствор легирующих элементов в меди. При этом бронза имеет высокую пластичность ($\delta = 30—40\%$), невысокую прочность ($\sigma_b = 450—560$ МПа) и может подвергаться пластической деформации в закаленном состоянии. При старении происходит выделение из пересыщенного α -твердого раствора дисперсных частиц γ -фазы (CuBe). Бронзы БрБ2 и БрБ2,5 после закалки и старения обладают высокой прочностью ($\sigma_b = 1250—1300$ МПа), но малой пластичностью ($\delta = 2—5\%$). Промежуточная холодная пластическая деформация обеспечивает дополнительное повышение прочности до $\sigma_b = 1400$ МПа.

Хромовые бронзы (БрХ0,5) обладают высокими механическими свойствами, хорошей электро- и теплопроводностью, повышенной температурой рекристаллизации (450—500°C). Бронзы содержат 0,4—1% Cr, 0,2% Ag. Серебро повышает механические свойства и температуру рекристаллизации бронз. Бронзы упрочняются закалкой (-950°C) в воде и последующим старением (400°C, 6 ч).

Циркониевые бронзы сочетают в себе высокую тепло- и электропроводность, близкую к меди, и жаропрочность (в частности, сопротивление ползучести). Бронзы содержат 0,1—0,8% Zr (БрЦр0,2—БрЦр0,7). Упрочняются они комплексной обработкой: закалкой (~920°C), последующей холодной пластической деформацией (степень деформации

до 75%) и старением (-450°C , 1 ч). При старении из α -твердого раствора выделяется упрочняющая фаза (Cu_3Zr).

Области применения меди и ее сплавов весьма разнообразны. Чистая медь широко используется в электротехнике, различного рода теплообменниках. Из высокотехнологичных латуней получают изделия глубокой вытяжкой (радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги). Латунни, содержащие свинец, используют при работе в условиях трения (в часовом производстве, в типографских машинах).

Оловянные бронзы применяют для литья художественных изделий. При дополнительном легировании фосфором их используют для изготовления деталей, работающих на трение в коррозионной среде: подпятники, подшипники, уплотняющие втулки, пояски поршневых колец, клапаны. Алюминиевые бронзы прежде всего используются в качестве заменителей оловянных. Высокопрочные алюминиевые бронзы идут на изготовление шестерен, втулок, подшипников, пружин, деталей электрооборудования. Из бериллиевой бронзы делают детали точного приборостроения, упругие элементы электронных приборов и устройств, мембраны. Для менее ответственных деталей используют кремнистые бронзы. Хромовые и циркониевые бронзы применяют в двигателестроении (внутренний кожух ЖРД, держатели форсунки и др.).

10.7. ЖАРОПРОЧНЫЕ И ЖАРОСТОЙКИЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ

В качестве сплавов для деталей, работающих при $700\text{—}1000^{\circ}\text{C}$, наибольшее применение находят сплавы на основе никеля. Никелевые сплавы могут быть разделены на гомогенные (нихромы, инконели), которые служат, в основном, как жаростойкие материалы, и стареющие (нимоники), имеющие высокую жаропрочность.

Жаростойкие сплавы на никелевой основе (нихромы) представляют собой малоуглеродистые Ni — Cr , Ni — Cr — Fe или Ni — Cr — W — Fe твердые растворы, легированные Si , Al , Ti . Эти сплавы, имея, в основном, структуру гомогенных твердых растворов, отличаются сочетанием высокой жаростойкости и значительным электрическим сопротивлением ($1,05\text{—}1,40 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$); их температура плавления составляет $1370\text{—}1420^{\circ}\text{C}$, предел прочности на растяжение — $700\text{—}1000\text{ МПа}$, относительное удлинение — $20\text{—}40\%$. Они имеют хорошие технологические свойства, что позволяет их сваривать, изготавливать из них проволоку, лист, ленту. Нихромы применяют для изготовления нагревательных элементов электрических печей и бытовых приборов, изделий, эксплуатируемых при высокой температуре и небольших механических нагрузках. В промышленности нашли применение нихромы типа X10H90, X20H80, X40H60, X50H50, а также нихромы с

дополнительным легированием — Х20Н75БТЮ, Х25Н60В15Т. Наибольшей жаростойкостью в окислительных средах обладают нихромы Х20Н80, Х30Н70.

Для агрессивных сред (продукты сгорания топлива, содержащие соединения серы и др.) используют нихромы Х50Н50 и Х40Н60, имеющие двухфазную ($\alpha+\gamma$)-структуру. Недостатком этих сплавов является их хрупкость, что не позволяет использовать их в качестве материалов для деталей, работающих в напряженном состоянии и при динамических нагрузках.

Развитие жаропрочных никелевых сплавов началось с небольших добавок титана и алюминия к обычному нихрому. Оказалось, что добавление менее 2% титана и алюминия без термической обработки заметно повышает показатели ползучести нихрома при температурах около 700°C. Сплав, содержащий 2,5% титана, 1,5% алюминия, 20% хрома, на основе никеля получил название нимоник-80 и стал первым в большом ряду последующих модификаций жаропрочных сплавов. Аналог этого сплава — сплав ХН77ТЮ (ЭИ 437). Кроме никеля он содержит 19—22% Cr; 2,3—2,7% Ti; 0,55—0,95% Al. Широкое применение находит также сплав ХН77ТЮР, дополнительно легированный бором (не более 0,01%). После закалки при 1080—1120°C этот сплав имеет структуру пересыщенного γ -раствора с ГЦК-решеткой, небольшую прочность и высокую пластичность, допускающую глубокую штамповку, гибку и профилирование. После закалки и старения при 700°C сплав приобретает высокую жаропрочность и следующие механические свойства: $\sigma_b = 1000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 600$ МПа, $\delta = 25\%$, $\psi = 28\%$ (рис.10.5).

В качестве сплава с высокой жаропрочностью широкое применение находит сплав ХН70ВМТЮ (13—16% Cr, 1,8—2,3% Ti, 1,7—2,3% Al, 5—7% W, 2—4% Mo, 0,1—0,5% V, не более 0,02% B, не более 0,02% Se, (рис.10.5, б). Этот сплав имеет после двойной закалки при 1190 и 1050 °C и старении при 800°C следующие механические свойства: $\sigma_b = 1140$ МПа, $\sigma_{0,2} = 750$ МПа, $\delta = 14\%$, $\psi = 15\%$.

Для рабочих лопаток турбин с кратковременным и длительным (до 10000 ч) сроком службы применяют также сплав ХН55ВМТФКЮ, содержащий 9—12% Cr, 12—16% Co, 1,4—2,0% Ti, 3,6-4,5% Al, 4,5—6,5% W, 4—6% Mo, 0,02% B, 0,2—0,8% V. После двойной закалки при 1220 и 1050°C на воздухе и старении при 850°C сплав имеет высокую жаропрочность.

Главной упрочняющей фазой в жаропрочных сплавах на никелевой основе является γ' -фаза Ni₃(Ti, Al); в некоторых сплавах, легированных ниобием, такой является фаза типа Ni₃(Nb, Al, Ti). Такие фазы, как бориды, нитриды, карбиды, вызывают незначительное дополнительное упрочнение при низких температурах из-за их небольшой объемной доли. Однако эти фазы могут существенно изменять скорость ползучести и

срок службы изделий. Прочность никелевых сплавов, упрочняемых γ' -фазой, зависит от следующих факторов: объемной доли γ' -фазы; радиуса частиц γ' -фазы; прочности частиц γ' -фазы.

Основа γ' -фазы — Ni_3Al — имеет гранецентрированную упорядоченную кубическую решетку с температурой упорядочения вблизи температуры плавления (1385°C). Она существует в довольно узкой области составов вблизи стехиометрического, но легирующие элементы могут в значительной степени заменять как никель, так и алюминий.

Богатая никелем матрица благоприятствует выделению γ' -фазы при малом изменении размерного фактора. Совместимость периодов решетки матрицы и γ' -фазы (несоответствие периодов менее 0,1%) создает предпосылки для зарождения выделений с низкой поверхностной энергией, которые могут быть стабильными в течение длительного времени.

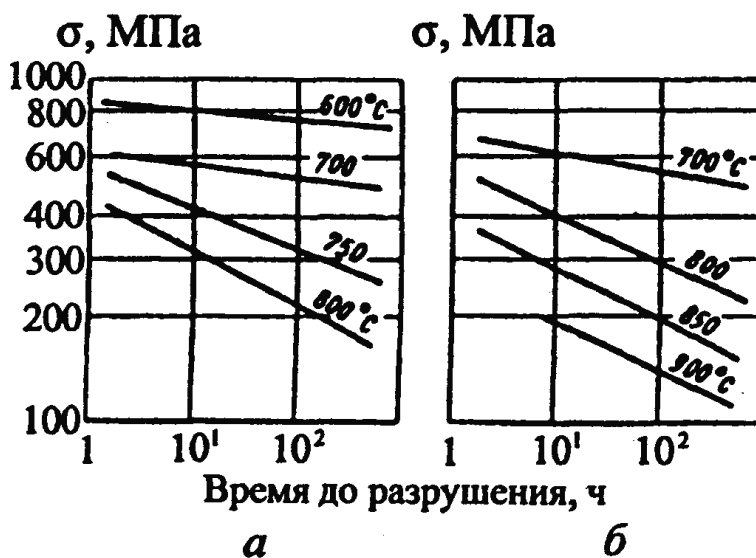


Рис.10.5 - Длительная прочность жаропрочных никелевых сплавов:
а – сплав XH77TiO; б- сплав XH70VMTiO

Жаропрочные никелевые сплавы подразделяют на деформируемые и литейные. Жаропрочные свойства деформируемых сплавов формируются при термической обработке.

Литейные жаропрочные никелевые сплавы по составу сходны с деформируемыми, но обычно содержат большее количество алюминия и титана. Так, сплав марки ЖС6К содержит 11% Cr, 2,75% Ti, 5,5% Al, 4% Mo, 4,5% Co, < 2% Fe, 5% W, 0,16% C, 0,02% B, < 0,4% Mn и < 0,4% Si.

У литейных жаропрочных сплавов высокие прочностные характеристики при повышенных температурах. Так, длительная прочность сплава марки ЖС6К составляет 320 МПа при 900°С и 160МПа при 1000°С. Эти сплавы применяют для изготовления сопловых и рабочих лопаток газотурбинных авиационных двигателей.

Свойства некоторых жаростойких и жаропрочных никелевых сплавов при комнатной и рабочей температурах приведены в табл.10.7.

Таблица 10.7 - Свойства некоторых жаропрочных и жаростойких никелевых сплавов

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	при 20°С			при 800°С		
ХН78Т	700	—	30	220	100	34
ХН75МБТЮ	750	—	40	250	—	40
ХН70Ю	750	—	30	360	—	14
ХН70ВМТЮ	1140	750	12	750	580	8
ХН80ТБЮ	880	480	40	600**	390**	37**

* Свойства сплавов даны после термической обработки.

**Свойства при 700°С.

10.8. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Общим принципом термической обработки жаропрочных сплавов на никелевой основе является определенная последовательность операций, характерная для дисперсионно-твердеющих материалов: гомогенизирующий нагрев, быстрое охлаждение и старение при одной или нескольких температурах. Особенностью термообработки жаропрочных сплавов по сравнению с термической обработкой конструкционных сталей является необходимость весьма точной регулировки температуры и контроль за однородностью температурного поля. Детали должны быть защищены от непосредственного радиационного действия нагревателей. Это достигается установкой экранов или использованием муфельных печей. Лучше всего использовать обработку в печах с инертной или защитной средой (аргон, гелий, азот и другие газы).

Старение при температурах ниже 750—800°С ведут в печах с воздушной атмосферой, так как скорость окисления при этих температурах незначительна. Для нагрева до более высоких температур

следует использовать печи с инертной средой; после такого нагрева детали охлаждают в этой среде до 600 — 700°С, а затем на воздухе.

На механические свойства и твердость жаропрочных сплавов большое влияние оказывает скорость охлаждения от температуры закалки. С увеличением степени легированности сплава — повышением содержания в нем титана, алюминия, вольфрама, молибдена — распад твердого раствора с образованием γ' -фазы заметно ускоряется. В результате этого при одних и тех же скоростях охлаждения твердость сплава увеличивается, возрастает прочность, но уменьшается пластичность.

Для сплавов типа ХН77ТЮР и нимоник-80 достаточная пластичность листов и ленты может быть обеспечена охлаждением на воздухе от температур выше 1000°С. Чем более легирован сплав, тем выше должна быть температура нагрева для растворения упрочняющих фаз и тем выше должна быть скорость охлаждения для предотвращения их выделения.

Рассмотрим примеры режимов термической обработки некоторых промышленных сплавов. Термическая обработка сплава ХН77ТЮР заключается в закалке от температуры 1080 ± 10°С, охлаждении на воздухе и последующем старении при 750—790°С в течение 16 ч, охлаждении на воздухе. Смысл операций состоит в следующем: температура растворения γ' -фазы в этом сплаве — около 930—950°С. Таким образом, для полного выделения этой фазы при старении достаточно нагреть сплав выше этой температуры. Растворение карбидов хрома происходит при 1150°С, но при этой температуре резко начинает расти зерно. Температура 1080°С выбрана для того, чтобы некоторое количество нерастворенных карбидов ограничивало рост зерна и обеспечивало места для последующего зарождения карбидов при старении. Старение проводят при температуре на 40—50°С выше, чем температура эксплуатации, чтобы γ' -фаза выделилась в полной мере и достигла некоторого стабильного размера, который бы незначительно изменялся при длительной выдержке в интервале более низких температур. Малая объемная доля γ' -фазы и, соответственно, низкая скорость ее выделения позволяют вести охлаждение от температуры закалки на воздухе. При термической обработке таких сплавов, как ХН70ВМТЮ (ЭИ617) или ХН55ВМТФКЮ (ЭИ929), применяют иной режим термической обработки: нагрев при 1200°С в течение 2 ч, охлаждение на воздухе; повторный нагрев до 1050°С, выдержка в течение 4ч, охлаждение на воздухе; старение при 850—950°С 8 ч, охлаждение на воздухе. В этих сплавах температура растворения γ' -фазы составляет около 1180°С. Первый нагрев необходим для растворения γ' -фазы и карбидов, т. е. для максимального насыщения матрицы легирующими элементами с целью увеличения эффекта последующего старения. При

повторном нагреве до 1050°C происходит частичное выделение очень крупных частиц γ' -фазы и карбидов, преимущественно по границам зерен. Эти выделения обеспечивают упрочнение границ при ползучести. Старение при более низких температурах имеет целью достичь наиболее полного выделения основной массы γ' -фазы в объеме зерен. Задача этих более мелких выделений γ' -фазы — обеспечить сопротивление движению дислокаций в объеме материала, т. е. высокий уровень прочности при низких температурах и высокую скорость установившейся ползучести. В высоколегированных сплавах с большой скоростью выделения γ' -фазы при замедленном охлаждении от температуры второго старения до комнатной могут происходить дополнительные выделения некоторого количества очень мелких частиц γ' -фазы, упрочняющих матрицу. Причиной их выделения является разница в растворимости алюминия и титана при комнатной температуре и при 900°C, поэтому они могут растворяться при повторном нагреве до температуры эксплуатации. Однако их роль достаточно важна, так как при таких операциях, как остановка и запуск двигателя, эти частицы дополнительно упрочняют охлажденный сплав.

Контрольные вопросы

1. Какие цветные металлы называют легкими? Какие тяжелыми? Почему? Объясните.
2. Классификация алюминиевых сплавов.
3. Каковы особенности маркировки алюминиевых сплавов? Поясните.
4. Какова цель модификации силуминов?
5. Как называют основные группы медных сплавов?
6. Правила маркировки латуней и бронз.
7. Жаропрочные никелевые сплавы. Какой термической обработкой они упрочняются?
8. Области применения цветных металлов и сплавов. Поясните.