

МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МЕДИ

Медь — металл розовато-красного цвета, плотность меди $8,95 \text{ г/см}^3$, температура плавления 1083°C . Медь кристаллизуется в гранецентрированной решетке и не имеет полиморфных превращений. На воздухе при наличии влаги и углекислого газа медь медленно окисляется, покрываясь пленкой так называемой патины зеленого цвета, которая является щелочным карбонатом меди $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$. Эта пленка в определенной мере защищает медь от дальнейшей коррозии.

Чистая медь обладает высокой электрической проводимостью (на втором месте после серебра), пластичностью, коррозионной стойкостью в пресной и морской воде, а также в ряде химических сред. Медь принято считать эталоном электрической проводимости и теплопроводности по сравнению с другими металлами. Характеристики этих свойств меди принимаются за 100 %, в то время как у алюминия, магния и железа они составляют соответственно 60, 40 и 17 % от соответствующих свойств меди. Механические свойства меди в литом состоянии: $\sigma_{\text{в}} = 160 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 35 \text{ МПа}$, $\delta = 25 \%$; в горячедеформированном: $\sigma_{\text{в}} = 250 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 95 \text{ МПа}$, $\delta = 50 \%$. Из-за низких значений предела текучести и высокой стоимости чистая медь как конструкционный материал не применяется. Около половины производимой меди используется в электро- и радиотехнике.

Электрическая проводимость меди зависит от содержания примесей. При наличии даже небольшого количества примесей электрическая проводимость резко падает. Для проводов применяют электролитическую медь марок МЗ, содержащую 99,5 % Cu, М2 - 99,7 %, М1 - 99,9 % Cu, М0 - 99,95 %, М00 - 99,99 % Cu (ГОСТ 859-2001).

Для повышения прочности проводов, например трамвайных и троллейбусных, их дополнительно наклепывают или легируют кадмием в количестве около 1 %. При этом электрическая проводимость уменьшается на 10 %, но прочность увеличивается почти в 2 раза.

Медь и ее сплавы являются традиционными материалами, используемыми в технике низких температур. Применение меди и ее сплавов обусловлено их высокими характеристиками механических свойств при низких температурах, хорошей коррозионной стойкостью и высокой теплопроводностью.

Вредными примесями, снижающими механические и технологические свойства меди и ее сплавов, являются висмут и свинец, сера и кислород. Висмут и свинец почти не растворимы в меди и образуют легкоплавкие эвтектики по границам зерен, что способствует красноломкости и ухудшает способность к горячей деформации. Из-за отрицательного влияния на пластичность меди содержание висмута не должно превышать 0,002 %. Сера с медью образует эвтектику Cu-Cu₂S, обладающую повышенной хрупкостью. Особо вредной примесью является кислород, образующий даже в небольших количествах хрупкую эвтектику Cu-Cu₂O по границам зерен. При нагреве металла с включениями эвтектики в атмосфере, содержащей водород, диффундирующий в глубь меди, проявляется ее так называемая водородная болезнь: $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$, в результате чего пары воды создают высокое давление и возможно образование трещин.

Медь и ее сплавы имеют удовлетворительную технологичность. Медь хорошо деформируется, хорошо сваривается и паяется. Ее недостатком является сравнительно плохая обрабатываемость резанием.

Соединение деталей из меди и ее сплавов часто выполняют посредством твердой и мягкой пайки. Твердые припои изготавливают на основе меди и цинка с добавкой серебра; их температура плавления составляет 600-1000 °C. Мягкие припои изготавливают из сплавов олова со свинцом; их температура плавления 200-300 °C. Паяные медные соединения обычно применяют в криостатах исследовательских установок.

Сплавы меди устойчивы против коррозии, обладают хорошими антифрикционными, технологическими и механическими свойствами и широко используются в качестве конструкционных

материалов. По технологическим характеристикам различают деформируемые и литейные медные сплавы, по химическому составу их делят на латуни и бронзы. Латуни представляют собой сплавы меди с цинком, а бронзы - сплавы меди с другими элементами.

Медные сплавы обозначают начальной буквой сплава Л - латунь или Бр - бронза, после чего следуют первые буквы основных элементов, образующих сплав: О - олово, Ц - цинк, Мц - марганец, А - алюминий, Ж - железо, Ф - фосфор, Б - бериллий, Х - хром, Н - никель и т. д., а после них цифры, указывающие содержание легирующих элементов в процентах. В деформируемых латунях не указывается содержание цинка, а в деформируемых бронзах - содержание меди, их концентрации определяются по разности. Например, ЛЖМц-59-1-1 - латунь, содержащая, % : 59 Cu, 1 Fe, 1 Mn и остальное - цинк, или БрОФ6,5-0,15 - бронза: 6,5 Sn, 0,15 P, остальное - медь.

Порядок цифр в обозначениях марок деформируемых и литейных сплавов различен. В марках деформируемых латуней и бронз цифры, отделенные друг от друга дефисом, ставятся в конце обозначения и расположены в той же последовательности, что и буквы, например ЛА60-1-1 или БрОЦ4-3.

В литейных латунях и бронзах содержание всех компонентов сплавов в процентах, в том числе содержание цинка, приведены сразу же после обозначающих их букв. Содержание меди в литейных сплавах определяется по разности от 100 % . Например, ЛЦ16К4 - литейная латунь, содержащая 16 % Zn, 4 % Si, остальное медь; Бр05Ц5С5 - литейная бронза, содержащая 5 % Sn, 5 % Zn, 5 % Pb, остальное - медь.

СПЛАВЫ МЕДИ С ЦИНКОМ, ИЛИ ЛАТУНИ

Двойные или многокомпонентные сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк, называют латунями.

В системе Cu-Zn образуется шесть твердых растворов: α , β , γ , δ , ϵ , η , но практическое применение имеют сплавы, содержащие до 45 % Zn.

На рис. 25.1, а приведена левая часть диаграммы состояния системы Cu-Zn, содержащая область однофазных (α -) и двухфазных ($\alpha + \beta$)-латуней.

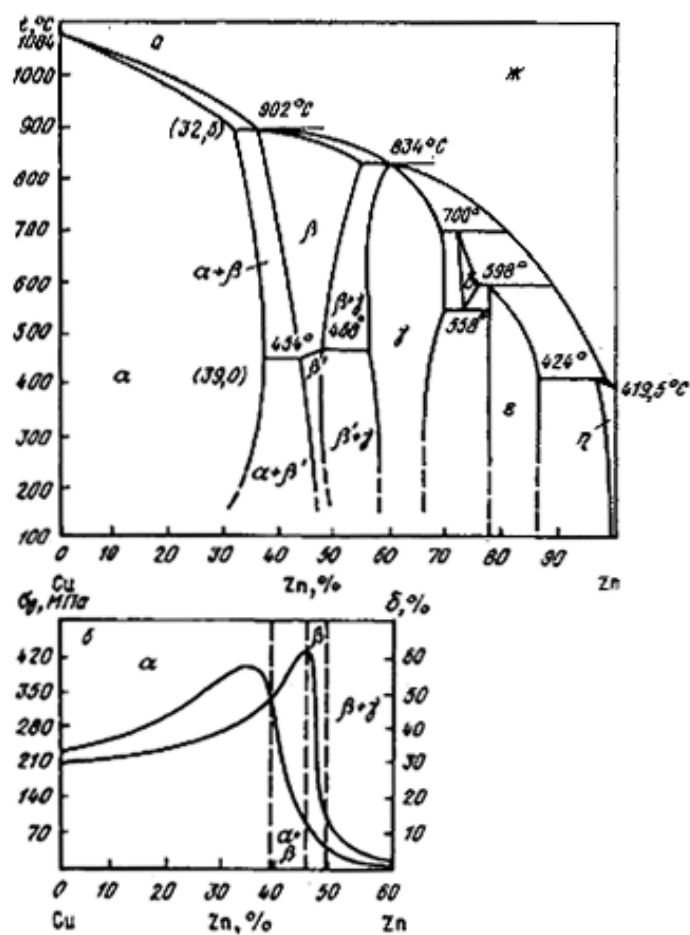


Рис. 25.1. Диаграмма состояния системы Cu-Zn (а) и влияние содержания цинка на механические свойства латуни (б)

Однофазная α -латунь представляет собой твердый раствор цинка в меди с решеткой ГЦК и может содержать до 39 % Zn. Однофазная α -латунь характеризуется высокой пластичностью. При содержании более 39 % Zn в структуре проявляется хрупкая β -фаза, представляющая собой твердый раствор с решеткой ОЦК на базе соединения CuZn с электронным типом связи (число электронов / число атомов = 3/2).

Существуют две модификации β -фазы: выше 454-486 °С устойчива гомогенная пластичная β -фаза, имеющая неупорядоченное расположение атомов, ниже этих температур - более твердая и хрупкая β' -фаза, характеризующаяся упорядоченным расположением атомов меди и цинка.

Двухфазные ($\alpha + \beta$)-латуни могут содержать до 45 % Zn. Так как β' -фаза, существующая при комнатной температуре, имеет большую хрупкость и твердость, то двухфазные латуни менее пластичны и более прочны.

Влияние химического состава на свойства латуней показано на рис. 25.1, б. В отличие от равновесного состояния β' -фаза практически появляется уже при концентрации цинка более 30 %. Поэтому в сплавах, содержащих менее 30 % Zn, увеличение его концентрации повышает и прочность, и пластичность. При увеличении содержания цинка выше 30 % пластичность сплавов начинает уменьшаться, а после появления в структуре значительных количеств β' -фазы происходит резкое падение пластичности. Прочность при увеличении содержания цинка растет до 45 %, а потом также резко падает. При дальнейшем увеличении содержания цинка (области β , $\alpha + \beta$, и т. д.) свойства сохраняют свои низкие значения.

Латуни обычно хорошо обрабатываются давлением. Однофазные α -латуни высокопластичны и хорошо деформируются в холодном состоянии. Двухфазные ($\alpha + \beta$)-латуни лучше деформируются при нагреве выше температуры ($\beta \leftrightarrow \beta'$)-превращения. Обычно их деформируют при температуре несколько выше 700 °С.

По технологическим признакам различают деформируемые и литейные латуни (табл. 25.1).

α -Латуни редко легируют дополнительно другими элементами; они представляют собой обычно двойные сплавы меди с цинком. В марках этих латуней Л62, Л68, Л80, Л90 цифры показывают содержание меди. Цинк дешевле меди. Чем больше цинка в латуни, тем ниже ее стоимость. Из однофазных α -латуней холодным деформированием изготавливают ленты, гильзы патронов, трубки теплообменников, проволоку.

Латунь, содержащая до 10 % Zn, так называемый томпак, имеет цвет золота и применяется для изготовления украшений.

($\alpha + \beta$)-Латуни легируют дополнительно алюминием, железом, никелем для увеличения прочности, а также для улучшения обрабатываемости на станках. Высокими коррозионными свойствами обладают латуни, легированные оловом (ЛО70-1, ЛО62-1) и называемые морскими латунями. Наибольшей прочностью обладают латуни, дополнительно легированные алюминием, железом, марганцем.

Структура однофазной α -латуни и двухфазной ($\alpha + \beta$)-латуни показана на рис. 25.2.

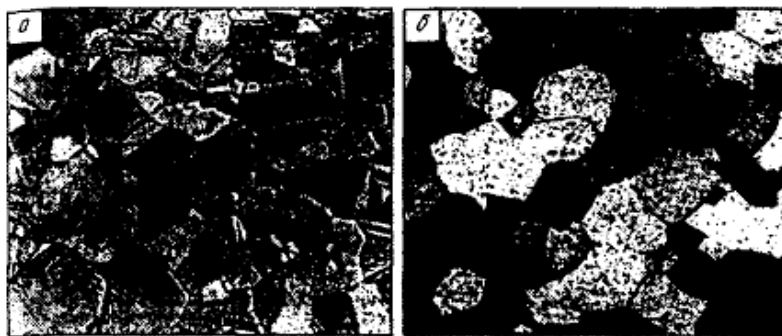


Рис. 25.2. Структура однофазной α -латуни (а) и двухфазной ($\alpha + \beta$)-латуни (б): а - х 200; б - х 100

Отрицательным свойством деформированных латуней, содержащих более 20 % Zn, является склонность к растрескиванию при вылеживании во влажной атмосфере, содержащей следы аммиака. «Сезонное растрескивание» обусловлено коррозией по границам зерен в местах неравномерной концентрации примесей.

Т а б л и ц а 1

Химический состав и механические свойства некоторых марок латуней

Марка латуни	Структура	Содержание, %		$\sigma_{\text{в}}$, МПа,	δ , %	НВ	Назначение
		Cu	легирующие элементы				
Деформируемые латуни (ГОСТ 15527-70)							
Л90 (томпак)	<i>a</i>	88-91	-	260	45	530	Ленты, листы, трубы, художественные изделия, мембраны, змеевики
Л80	<i>a</i>	79-81	-	320	52	550	Ленты, проволока,

							трубы конденсаторов, теплообменников
Л63	$\alpha + \beta$	62-65	-	330	50	560	Ленты, проволока, прутки, трубы деталей радиаторов, патрубков, прокладки
ЛС59-1	$\alpha + \beta$	57-60	0,8-1,9 Рb	400	45	900	Полосы, прутки, штулки, краны, тройники, прокладки
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	57-60	0,6-1,2 Fe; 0,1-0,4 Al; 0,3-0,7 Sn; 0,5-0,8 Mn	450	50	880	Проволока, трубы
ЛАЖ60-1-1	$\alpha + \beta$	58-61	0,75-1,5 Al; 0,75-1,5 Fe; 0,1-0,6 Mn	450	45		Трубы, прутки, свариваемые эле- менты аппаратуры
Литейные латуни (ГОСТ 17711-93)							
ЛЦ16К4	$\alpha + \beta$	78-81	3,0-4,5 Si	300	15	100	Арматура, детали приборов
ЛЦ40МцЗЖ	$\alpha + \beta$	53-58	3,0-4,0 Mn; 0,5-1,5 Fe	500	10	100	Детали ответственного назначения, гребные винты и их лопасти
ЛЦ23А6ЖЗМц2	$\alpha + \beta$	64-68	4,0-7,0 Al; 2,0-4,0 Fe; 1,5-3,0 Мп	700	7	160	Гайки нажимных винтов, червячные винты

Для снижения этого дефекта после деформации латуни подвергают отжигу при температурах ниже температуры рекристаллизации (обычно около 250 °С).

Из деформированных латуней изготавливают трубы, прутки, полосы, проволоку. Литейные латуни отливают в землю, в кокиль, под давлением, они идут на изготовление арматуры и деталей для судостроения, гаек нажимных болтов для сложных условий работы, штуков, вкладышей и подшипников.

Благодаря узкому интервалу между линиями ликвидуса и солидуса, литейные латуни не подвержены ликвации и усадочной пористости.

БРОНЗЫ

Двойные или многокомпонентные сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом, бериллием, кремнием, хромом и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим, называются бронзами. По главному легирующему элементу различают бронзы оловянные, свинцовые, кремниевые и т. д.

Оловянные бронзы (ГОСТ 5017-74, ГОСТ 10025-78)

Особенно широко применяются в машиностроении оловянные бронзы, в которых олово является основным легирующим элементом, а также в качестве легирующих добавок используют цинк, свинец, никель и др. Диаграмма состояния системы медь - олово (рис. 25.3) характеризуется сравнительно большим расстоянием между линиями ликвидуса и солидуса.

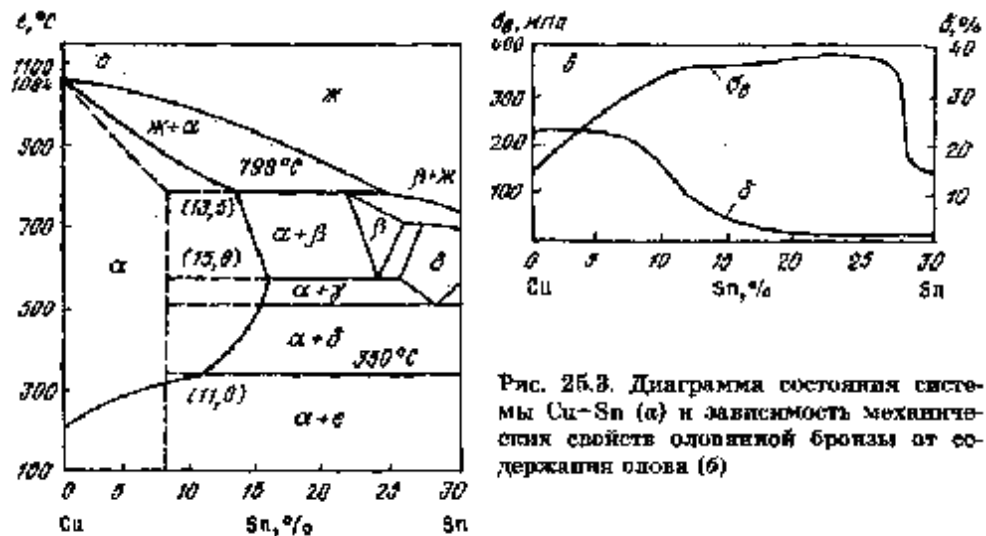


Рис. 25.3. Диаграмма состояния системы Cu-Sn (а) и зависимость механических свойств оловянной бронзы от содержания олова (б)

Поэтому особенностью двухкомпонентных оловянных бронз являются их повышенная склонность к ликвации, вызванная медленно проходящим процессом диффузии, низкая жидкотекучесть и рассеянная пористость. В соответствии с диаграммой состояния предельная растворимость олова в меди составляет 15,8%. Учитывая склонность сплавов системы Cu-Sn к неравновесной кристаллизации, при обычных условиях охлаждения область α -твердого раствора сужается (пунктирные линии). Уже при содержании олова 5-6 % в структуре появляется $(\alpha + \beta)$ -эвтектоид, в котором δ -фаза представляет собой твердое и хрупкое электронное соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$. С появлением δ -фазы снижаются пластичность и вязкость сплавов. Бронзы с содержанием олова более 12 % из-за повышенной хрупкости как конструкционный материал практически не применяются.

На рис. 25.4 приведена микроструктура оловянной бронзы в литом состоянии и после деформации и отжига. Светлые включения произвольной формы (рис. 25.4, б) представляют собой эвтектоид $(\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8)$.



Рис.25.4. Микроструктура оловянной бронзы (x200): а - после литья, б - после деформации и отжига

Двойные оловянные бронзы дороги и имеют пониженные литейные свойства. Их обычно дополнительно легируют цинком, свинцом, никелем, фосфором.

Таблица 25.2

Химический состав и механические свойства некоторых марок оловянных бронз

Марка сплава	Содержание, %				ОВ, М Па	δ, %	НВ	Назначение
	Sn	Zn	Pb	P				
Бронзы, обрабатываемые давлением (ГОСТ5017-74)								
БрОФ4-0,25	3,5-4,0	-	-	0,2-0,3	340	52	650	Трубки аппаратов и приборов
БрОФ6.5-0,15	6-7	-	-	0,1-0,25	400	65	700	Ленты, полосы, пружинящие контакты электрооборудования. мембраны, сетки
БрОЦ4-3	3,5-4,0	2,7-3,3	-	-	350	40	600	Ленты, полосы, прутки, проволока для пружин, крепежные детали
БрОЦС4-2,5	3-5	3,5	1,5-3,5	-	350	40	600	Ленты и полосы для прокладок во втулках и подшипниках
Литейные бронзы (ГОСТ 613-79)								
БрО10Ф1	9-11	-	-	0,4-1,1	250	7	800	Сложное литье. подшипники, шестерни, червячные передачи
Бр05Ц5С5	4-6	4-6	4-6	-	180	4	600	Водная и паровая арматура, шестерни
Бр06Ц6С2	5-7	5-7	1-3	-	-	-	-	Сложные отливки, художественное литье

Различают деформируемые и литейные оловянные бронзы (табл. 25.2). Деформируемые оловянные бронзы содержат 3-7 % Sn, до 5 % Zn и Pb и до 0,4 % P. Они состоят из однородного твердого раствора и после отжига имеют однофазную структуру. Благодаря хорошей пластичности они легко подвергаются обработке давлением и поставляются в виде прутков, труб и лент. Этот вид бронз используется также для

изготовления различных деталей с высокими упругими свойствами. Их прочность $\sigma_b = 320-350$ МПа при относительном удлинении $\delta = 30-50$ %.

При концентрации олова 9-11 % в структуре увеличивается количество хрупкой составляющей - эвтектоида, содержащего соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, что исключает возможность пластической деформации. Такие бронзы применяются только в литом состоянии.

Литые оловянные бронзы с цинком и свинцом имеют высокие литейные свойства: малую объемную усадку (менее 1 %) и хорошую жидкотекучесть. Из бронзы изготавливают сложные отливки, в частности художественное литье.

Высокая коррозионная стойкость позволяет использовать литейные бронзы в качестве арматуры, работающей в агрессивных средах и обладающей высокой электрической проводимостью и теплопроводностью.

Наличие включений твердого эвтектоида обеспечивает высокую стойкость против истирания, а мягкие частицы облегчают «приработку» и образуют на поверхности мельчайшие каналы, по которым может циркулировать смазка. Поэтому бронзы, содержащие 9-10 % Sn, являются одним из лучших антифрикционных материалов и применяются для изготовления подшипников. Для улучшения антифрикционных свойств в состав бронз также вводят свинец.

Литые оловянные бронзы имеют предел прочности $\sigma_b = 170-200$ МПа при относительном удлинении $\delta = 5-10\%$.

Среди оловянных бронз следует выделить так называемую колокольную бронзу. Она содержит около 20 % Sn с небольшими добавками других элементов.

Из безоловянных бронз наибольшее применение нашли алюминиевые, кремниевые и бериллиевые бронзы.

Алюминиевые бронзы

Из диаграммы состояния системы Cu—Al (рис. 25.5) следует, что медь образует с алюминием широкую область α -твердых растворов замещения с кристаллической решеткой ГЦК, а также β -фазу на базе электронного соединения Cu_3Al . (β -Фаза претерпевает эвтектоидное превращение при 565 °С по реакции $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$).

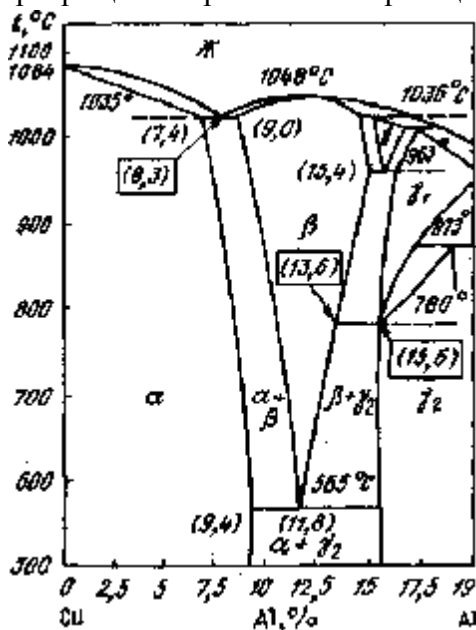


Рис. 25.5. Диаграмма состояния системы Cu—Al

Сплавы, содержащие до 9 % Al, однофазные и состоят только из α -твердого раствора алюминия в меди. Увеличение содержания Al более 9 % приводит к появлению в структуре эвтектоида $\alpha + \gamma_2$, в котором γ_2 представляет собой твердое и хрупкое электронное соединение $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$.

Гетерогенная структура, состоящая из мягкой основы α - твердого раствора и твердых дисперсных включений эвтектоида, обеспечивает высокие антифрикционные свойства алюминиевых бронз, которые применяются для изготовления деталей, работающих в условиях трения. Однофазные алюминиевые бронзы характеризуются высокой пластичностью, их используют для глубокой штамповки. Двухфазные бронзы подвергают горячей обработке давлением или используют в виде фасонного литья.

Согласно диаграмме состояния, алюминиевые бронзы могут подвергаться термической обработке - улучшению. При нагреве до температуры около 900 °С они приобретают однофазное строение β -твердого раствора, который в результате закалки переходит в игольчатую структуру, подобную мартенситной. Отпуск позволяет в широких пределах менять свойства алюминиевых бронз.

Алюминиевые бронзы по коррозионной стойкости в морской воде и тропической атмосфере превосходят оловянные бронзы и латуни и конкурируют в этом отношении с хромоникелевыми аустенитными коррозионностойкими сталями.

Дополнительное легирование алюминиевых бронз железом (до 5,5 %), марганцем (до 2 %) и никелем (до 5,5 %) повышает их механические свойства; введение никеля, кроме того, увеличивает жаропрочность и сопротивляемость коррозии.

Механические свойства алюминиевых бронз приведены в табл. 25.3.

Алюминиевые бронзы применяют для изготовления нагруженных деталей, работающих в тяжелых условиях повышенного нагрева, износа и коррозионного воздействия среды. Из них изготавливают фрикционные шестерни, зубчатые колеса, втулки, краны, детали водяных и паровых турбин.

Кремнистые бронзы

Кремнистые бронзы обычно содержат до 3 % Si, часто их дополнительно легируют никелем или марганцем. В соответствии с диаграммой состояния (рис. 25.6) растворимость кремния в меди составляет 5,3 % при 842 °С.

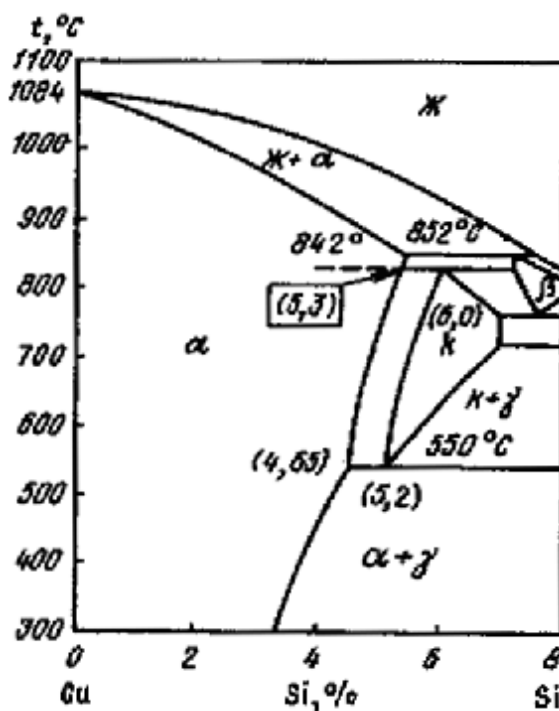


Рис. 25.6. Диаграмма состояния системы Cu-Si

С понижением температуры растворимость уменьшается, на уменьшение растворимости существенно влияет добавка марганца.

Таблица 25.3

Механические свойства и назначение безоловянных бронз (ГОСТ 18175-78, ГОСТ 493-79)

Марка бронзы	Содержание, %	Механические свойства		Назначение
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	
Алюминиевые бронзы				
БрАЖ9-4	9Al, 4Fe	600	40	Для изготовления проката, штампованных шестерен, втулок, труб
БрАЖН10-4-4				
БрА10ЖЗМц2	10Al, 3Fe, 2Mn	390	10	
К р е м н и с т а я бронза				
БрКМц3-1	3Si, 2Mn	380	35	Прутки, лента, проволока для пружин
Свинцовая бронза				
БрС30	30Pb	600	4	Антифрикционные детали
Бериллиевая бронза				
БрБ2	2Be	1200	4	Полосы, лента, прутки, проволока, пружины, мембраны, контакты

Сравнительно небольшой интервал кристаллизации обеспечивает кремнистым бронзам хорошие литейные свойства. Их обычно используют в качестве заменителя оловянных бронз, например бронза БрКЦ4-4 может заменять БрОЦС5-5-5. Уступая оловянной бронзе по величине усадки, она имеет более высокие механические свойства, плотность отливок и коррозионную стойкость.

Бронза БрКМц3-1 (табл. 25.3) хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии, хорошо сваривается, обладает высокими литейными свойствами. Она рекомендована в качестве заменителя оловянных бронз; в некоторых случаях может заменять дорогую бериллиевую бронзу.

Свинцовая бронза

Свинец практически нерастворим в меди. После затвердевания сплав состоит из кристаллов меди, перемежающихся включениями свинца. Благодаря такой структуре бронза БрС30 имеет высокие антифрикционные свойства, что позволяет ее использовать взамен оловянных бронз для подшипников скольжения. Высокая теплопроводность бронзы БрС30 позволяет эффективно отводить тепло из зоны трения.

Свинцовая бронза имеет невысокие механические свойства ($\sigma_b = 70$ МПа, $\delta = 4\%$). Для повышения надежности вкладышей подшипников тонкий слой бронзы наплавляют на основу из стальной ленты.

Дополнительное повышение механических и антифрикционных свойств достигается легированием свинцовой бронзы небольшими добавками никеля и олова/

Бериллиевая бронза

На рис. 25.7 представлена диаграмма состояния сплавов системы Cu—Be.

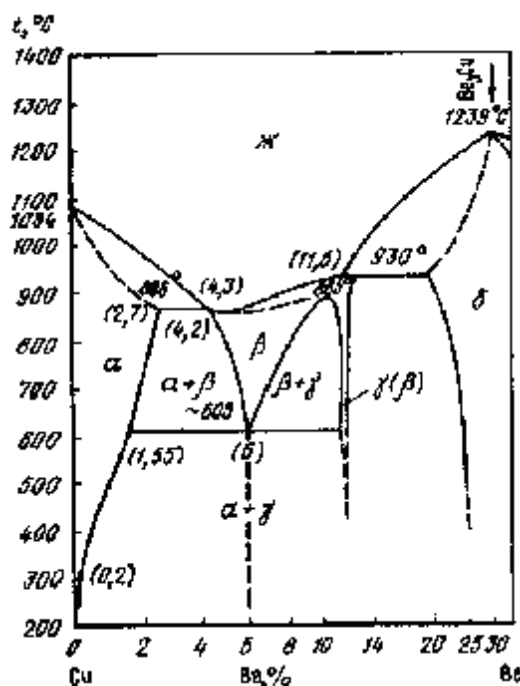


Рис. 25.7. Диаграмма состояния системы Cu—Be

531

Медь образует с бериллием α -твердые растворы замещения с решеткой ГЦК, причем с понижением температуры растворимость бериллия в меди падает с 2,7 % при 886 °С до 0,2 % (мас.) при 300 °С. Использование переменной растворимости позволяет достичь значительного упрочнения при термической обработке.

При нагреве бериллиевой бронзы, содержащей 2,0-2,5 % Be, до 760-780 °С образуется однородный α -твердый раствор. После быстрого охлаждения эта структура сохраняется при комнатной температуре.

Закаленная бериллиевая бронза БрБ2 имеет малую прочность ($\sigma_b = 500$ МПа) при высокой пластичности ($\delta = 30$ %). В результате старения при 300-350 °С из пересыщенного α -твердого раствора выделяются дисперсные частицы γ -фазы (CuBe). Дисперсионное твердение резко увеличивает прочностные свойства: $\sigma_b \approx 1200$ МПа при $\delta \approx 4$ %. Упрочнению при старении способствует предварительный наклеп бронзы. После закалки, холодной пластической деформации с обжатием 30 % и старения прочность возрастает до $\sigma_b = 1400$ МПа при $\delta = 2$ %.

Благодаря более высокому уровню временного сопротивления и предела упругости бронзы БрБ2 по сравнению с другими медными сплавами бериллиевые бронзы находят применение для изготовления пружин, мембран, пружинящих контактов. Инструменты из бериллиевой бронзы не дают искр, поэтому их применяют в производстве взрывчатых веществ.

Бериллиевые бронзы хорошо сопротивляются коррозии, они технологичны при сварке и обработке резанием. В связи с высокой сопротивляемостью истиранию они используются для изготовления деталей, работающих на износ.

Широкое применение бериллиевых бронз ограничивается высокой стоимостью бериллия.