8.2. 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 промыпленности. 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. 8.9).

Таблица 8.9. **Свойства сплавов на основе меди**

Марка сплава	*У*,	λ,	*Е*,	$\sigma_в$, МПа	δ ,%	НВ,	Способ
	Мг/м^3	Вт/(м-К)	ГПа			кгс/мм^2	получения и обработки
Медь Ml	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(0)
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	1.12,	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)
Бр05Ц5С5				147 (176)	6(4)	60 (60)	П(К)
Бр05С25	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*(0)
БрАЖН10-4-4	7,5	75,3	119	1080(700)	5(25)	225 (150)	Н*(0)
БрА9ЖЗЛ				392(490)	10(12)	100(100)	П(К)
БрА11ЖбНб				587(587)	2(2)	250(250)	П(К)
БрБ2,5	8,2	83,7	133	560(1300)	30(2)	130(440)	З(З+С)
БрКМцЗ-1	8,4	37,7	105	750 (400)	13 (60)	200 (90)	Н(О)
БрХ0,5	8,9	167,4	112	240 (410)	50(22)	65 (130)	З(З+С)
БрЦр0,4	8,85	334,7	137	270(480)	35(17)	65 (135)	З(З+Н+С)

Примечание. Н — сплав нагартованный, упрочненный со степенью пластической деформацией 50% (Н) и 40% (Н*), О — отожженный при 600 Х после соответствующей степени деформации; З — закалённый, (З+С) — после закалки и старения, (З+Н+С) — закаленный, нагартованный 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 °С, 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% Cu) и М06 (99,97% Cu), в электротехнике и металлургии МО

(99,95% Cu), Ml (99,9% Cu), M2 (99,7% Cu) и др.

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

Элементы (Ag, A1, 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.

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

Элементы (Se, S, O, Te и др.), образующие с медью хрупкие химические соединения (например, Cu20, 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 °С) в водородсодержащей среде. В данном случае водород, активно диффундирующий в металл, отнимает кислород у закиси меди Cu2O 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.

8.2.1. Латуни

Деформируемые латуни обозначают (по ГОСТ 15527—70) буквой Л и цифрой, указывающей массовое содержание меди в сплаве в процентах (например, Л9б, 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% Cu, 3% A1,2% Ni, Zn — остальное).

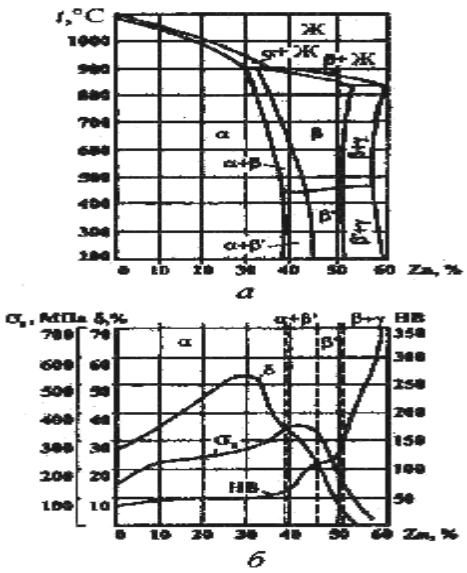

Рис. 8.6. Влияние содержания цинка на фазовый состав (а) и механические свойства (б) сплавов меди

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% Мп.

Как уже указывалось, основной легирующий элемент в латуни — цинк; при его содержании до 39% сплавы являются однофазными α-твердыми растворами цинка в меди (рис. 8.6, а). Количество цинка свыше 39% приводитк выделению из твердого раствора электронного соединения CuZn с не упорядоченной пластичной (β-фаза) или упорядоченной хрупкой (β'-фаза, существует ниже 468—454 °С) структурой. В технике применяют латуни, содержащие до 45—50% цинка (со структурой α, α+β' и β'). поскольку при дальнейшем увеличении цинка в сплаве прочность латуни уменьшается, а хрупкость увеличивается. Как видно из рис. 8;6, б, в области α-твердого раствора с увеличением содержания цинка происходит одновременный рост прочности и пластичности сплава, в двухфазной (α+β')-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 (см. табл. 8.9). Однофазные α-латуни хорошо воспринимают холодную и горячую пластическую деформацию. Двухфазные (α+β')-латуни подвергаются горячей пластической деформации в температурном интервале (α+β)- 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 (α+β"), поскольку дополнительные легирующие элементы (за исключением никеля), снижая растворимость цинка в меди, создают условия для выделения β'-фазы из а-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 0С во избежание коррозионного растрескивания в присутствии влаги, кислорода и аммиака. Латуни подразделяют на деформируемые и литейные в зависимости от технологии получения полуфабрикатов и изделий.

Деформируемые латуни используются при производстве изделий и полуфабрикатов различными способами обработки металлов давлением (см. разд. 3).

Применяемые α-латуни (Л96, Л90) обладают высокой пластичностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью. С повышением содержания цинка в α-(Л70) и (α+β')-латунях (Л62) достигается более высокая прочность (табл. 8.9), 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 (α+β')-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 окалины от металла его охлаждение после отжига осуществляют на воздухе

или в воде.

Литейные латуни используют для фасонного литья. В основном применяют сложнолегированные 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 сложнолегированные деформируемые латуни по составу близки к литейным сплавам (например, ЛС59-1 и ЛЦ40С).

8.2.2. 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, Cu — 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, БрО3Ц12С5 содержит 3% Sn, 12% Zn и 5% Pb.

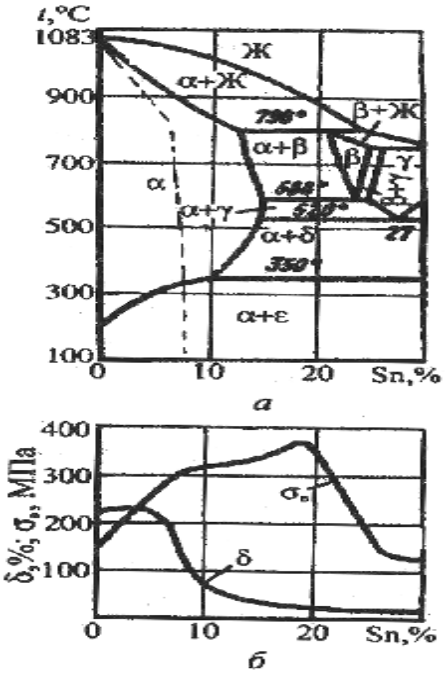

Рис. 8.7. Влияние содержания олова на фазовый состав (а) и механические свойства (б) сплавов меди (пунктиром показан неравновесный солидус диаграммы состояния)

Оловянные бронзы по структуре бывают однофазными (а-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 Cu—Sn (рис. 8.7, 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 °С δ-фаза должна распадаться с образованием α- и ε-фаз. Однако это превращение протекает настолько медленно, что при реальных условиях охлаждения (20—500 °С/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: а-твердого раствора и эвтектоида (α+δ). 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 8.7, 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, PЬ). 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 (см. табл. 8.9). По усталостным характеристикам они уступают лишь бериллиевой бронзе.

Литейные оловянные бронзы (БрОЗЦ12С5, БрОЗЦ7С5Н1, Бр05Ц5С5, Бр05С25, 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.

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 4—5% А1 бронзы характеризуются высокой пластичностью. При ускоренном охлаждении сплавов с 6—8% А1 в структуре наряду с пластичным а-твердым раствором алюминия в меди появляется твердая, хрупкая γ'-фаза (Cu32 A119). Поэтому двухфазные сплавы (α+γ') обладают высокой прочностью, но пониженной пластичностью по сравнению с однофазными (см. табл. 8.9). Никель и железо повышают механические свойства бронз и их износостойкость. Алюминиевые бронзы хорошо пластически деформируются как в холодном (сплавы, содержащие менее 7-8%А1), 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 °С. Алюминиевые бронзы бывают деформируемыми и литейными. Многокомпонентные бронзы (например, БрАЖН10-4-4), содержащие более 9-11% А1, упрочняются закалкой (с температуры 980 °С для указанной марки сплава) и старением (при 400 °С). При этом твердость повышается в два раза (с 200 НВ до 400 НВ).

Кремнистые бронзы (БрКМц3-1) характеризуются хорошей прочностью (см. табл. 8.9) 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 (см. табл. 8.9). 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 масс. %). Бериллиевые бронзы упрочняются закалкой (760—800 °С) со старением (300—350 °С. 2 ч). В результате закалки фиксируется пересыщенный α-твердый раствор легирующих элементов в меди. При этом бронза имеет , высокую пластичность (δ = 30—40%), невысокую прочность (σВ= 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 ста- А рения обладают высокой прочностью (σВ = 1250—1300 МПа), но малой пластичностью (δ = 2—5%). Промежуточная холодная пластическая деформация обеспечивает дополнительное повышение прочности до σВ = 1400 МПа.

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

Циркониевые бронзы (см. табл. 8.9) сочетают в себе высокую тепло- и электропроводность, близкую к меди, и жаропрочность (в частности, сопротивление ползучести). Бронзы содержат 0,1—0,8% Zr (БрЦрО,2—БрЦрО,7). Упрочняются они комплексной обработкой: закалкой (~920 °С), последующей холодной пластической деформацией (степень деформации до 75%) и старением (~4500С, 1 ч). При старении из а-твердого раствора выделяется упрочняющая фаза (Cu3Zr).

Области применения меди и ее сплавов весьма разнообразны. Чистая медь широко используется в электротехнике, в различного рода теплообменниках. Из высокотехнологичных латуней получают изделия глубокой вытяж-кой (радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны. гибкие шланги). Латуни, 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.).