

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Новотроицкий филиал

---

Кафедра металлургических технологий и оборудования

---

**Братковский Е.В., Шевченко Е.А.**

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

### **Раздел: литейные цветные сплавы**

Учебное пособие

Новотроицк 2017

УДК 621.74 (075.8)  
ББК 30.3  
Б 87

**Рецензенты:**

*Доцент кафедры электроэнергетики и теплоэнергетики  
Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ФГБОУ ВО  
«Оренбургский государственный университет»,  
к.т.н., доцент Ануфриенко О.С.*

*Доцент кафедры электроэнергетики и электротехники ФГАОУ ВО  
НФ НИТУ «МИСиС», к.т.н. Лицин К.В.*

Братковский Е.В., Шевченко Е.А. Материаловедение. Раздел: литейные цветные сплавы. Учебное пособие для бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия». - Новотроицк: НФ НИТУ МИСиС, 2017. - 58 с.

Учебное пособие предназначено для изучения дисциплины «Материаловедение» для бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 «Металлургия».

Приведены основные сведения о литейных цветных сплавах, их характеристики, взаимодействию с легирующими элементами, основные диаграммы состояния и виды термических обработок. Представлены маркировки современных литейных сплавов и области их применения.

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»*

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», 2017

## Содержание

1	Алюминиевые, магниевые и титановые литейные сплавы.....	4
1.1	Общая характеристика алюминия и его взаимодействие с другими элементами.....	4
1.2	Сплавы на основе системы Al-Cu.....	9
1.3	Сплавы на основе системы Al-Mg.....	12
1.4	Сплавы на основе системы Al - Si- Me (силумины) .....	15
1.5	Сложные сплавы Al-Cu-Mg и Al- Mg-Zn.....	19
1.6	Общая характеристика магния и его взаимодействие с другими элементами .....	20
1.7	Магниевые литейные сплавы.....	24
1.8	Титановые литейные сплавы.....	27
2	Медные литейные сплавы .....	34
2.1	Общая характеристика меди и ее взаимодействие с другими элементами.....	34
2.2	Литейные бронзы .....	36
2.3	Литейные латуни .....	42
3	Цинковые литейные сплавы.....	45
4	Никелевые литейные сплавы .....	48
4.1	Общая характеристика никеля и его взаимодействие с другими элементами .....	48
4.2	Никелевые литейные сплавы .....	52
	Рекомендуемая литература.....	57

## 1 Алюминиевые, магниевые и титановые литейные сплавы

### 1.1 Общая характеристика алюминия и его взаимодействие с другими элементами

Алюминий относится к легким цветным металлам (плотность  $2,71 \text{ г/см}^3$ ) с невысокой температурой плавления ( $660^\circ\text{C}$ ), имеет кубическую гранецентрированную решетку и не претерпевает полиморфных превращений. Удельная теплоемкость [ $0,90 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К.)}$ ] и скрытая теплота плавления ( $405 \text{ Дж/г}$ ) у алюминия значительно выше, чем у других металлов. В связи с этим для плавки алюминия и его сплавов не требуются затраты большого количества теплоты. Он имеет высокую теплопроводность и электрическую проводимость, которая составляет до 60 % этих значений для меди. Чистый алюминий - мягкий малопрочный металл; в литом состоянии обладает следующими механическими свойствами:  $\sigma_b \approx 90 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T \approx 35 \text{ МПа}$ ,  $\delta \approx 45 \%$ , НВ 25,  $E = 71 \text{ ГПа}$ .

Алюминий - химически активный металл. В атмосфере он легко покрывается тонкой и плотной окисной пленкой, предохраняющей поверхность от дальнейшего окисления. Удельный объем окисла и металла отличается незначительно. Поэтому окисная пленка обладает хорошим сцеплением с металлом и малопроницаема для всех газов. Благодаря защитному действию окисной пленки алюминий имеет высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях и в среде многих органических кислот. В едких щелочах алюминий быстро растворяется.

Большая распространенность в земной коре (8,8 %), наличие удобных для разработки руд и создание надежной технологии получения металла из руды выдвинули алюминий на ведущее место среди цветных металлов по значимости и объему применения в современном машиностроении и в литейном производстве (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Различные виды профилей, изготовленные из алюминия

Первичный алюминий выпускается в виде чушек и маркируется согласно ГОСТ 11069-74 в зависимости от чистоты. Выделено три группы алюминия: особой чистоты (примеси  $\leq 0,001$  %), высокой чистоты (примеси 0,005- 0,05 %) и технической чистоты (примеси 0,15-1,0 %). Маркировка производится буквой А и числом, указывающим на содержание алюминия. Так, алюминий А85, А7 и А0 содержит 99,85; 99,70 и 99,0 % А1 соответственно (остальное: 0,15, 0,30, 1 % -примеси).

Основные примеси в алюминии - железо и кремний. Наиболее опасно железо, которое практически нерастворимо в алюминии и даже при очень малом содержании ( $<0,005$  %) образует выделения интерметаллида  $FeAl_3$ , имеющего игольчатую форму и поэтому снижающего пластичность алюминия и его сплавов. Предельно допустимое содержание железа в литейных сплавах зависит от способов литья. При литье в песчаные формы допускается 0,5-1,0 % Fe. При литье в кокиль в результате более высокой скорости охлаждения обеспечивается некоторое измельчение включений  $FeAl_3$ , поэтому предельно допустимое содержание железа может быть повышено до 0,8- 1,4 %.

Кремний в литейных сплавах, как правило, не оказывает вредного влияния. Обычно он используется в качестве основного или вспомогательного легирующего элемента.

Многие металлы имеют одинаковую с алюминием кристаллическую решетку, но из-за неблагоприятного объемного фактора или большого различия в электронном строении не образуют с алюминием непрерывных твердых растворов. Тугоплавкие переходные металлы с большим значением температурного фактора  $n_T$  образуют с алюминием блоки перитектического типа с малым значением  $C_p$  (Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, W, Re, Hf, Ta). Расслоение в жидком состоянии в алюминиевых сплавах - редкое явление. Основным шипом взаимодействия является образование эвтектик с различным положением точек  $C_p$  и  $C_3$ .

По статистической диаграмме отсеивания и пороговым значениям  $C_p \geq 1$  %ат,  $K_p > 0,05$  и  $t_3 > 350$  °С выделено семь элементов, которые потенциально могут служить основными легирующими элементами. Все они образуют с алюминием системы эвтектического типа (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Взаимодействие алюминия с некоторыми элементами

Характеристики	Zn	Ag	Li	Mg	Ge	Cu	Si
$C_p$ , %	82,2	55,6	4,2	17,4	7,2	5,65	1,65
$C_3$ , %	95,0	70,5	9,0	33,0	63,0	33,0	11,7
$t_3$ , °С	382	565	601	449 211	424	548	577
$\Delta t_3 = t_{Al}-t_3$ , °С	278	95	59	0,60	236	112	83
$K_p = C_p/C_3$	0,75	0,63	0,38	$Mg_2Al_3$	0,09	0,14	0,19
Химическое соединение	Нет	$Al_2Al$	$LiAl$		Нет	$CuAl_2$	Нет

Цинк отличается очень большой растворимостью в твердом алюминии, является не дефицитным элементом и поэтому используется в качестве

основного или вспомогательного легирующего элемента, главным образом для растворного упрочнения литейных сплавов. Однако из-за малого значения объемного фактора и отсутствия интерметаллидов в двойных сплавах Al-Zn добавка цинка не может обеспечить сильного упрочнения.

Судя по параметрам двойных диаграмм состояния, серебро, германий и литий являются эффективными легирующими элементами, но на практике они применяются очень ограниченно из-за высокой стоимости.

Основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются Mg, Cu, Si. Образование интерметаллидов в сплавах Al-Cu, Al-Mg и Al-Mg-Si, «удобное» расположение эвтектики в сплавах Al-Si, существенная и переменная растворимость элементов в твердом алюминии в сплавах Al-Cu и Al-Mg - все это делает возможным использование различных методов упрочнения сплавов, включая дисперсионное твердение путем закалки и старения.

Группу вспомогательных легирующих элементов составляют элементы, ограниченные на диаграмме отсеивания пороговыми значениями  $C_p = 0,01-1,0\text{ ат. \%}$  и  $K_p > 0,05$ .

Большая часть их - переходные металлы, образующие с алюминием эвтектический или перитектический блок, и устойчивые тугоплавкие интерметаллиды (Mn, Cr, V, Ti, Zr, Mo, Ni, Nb и др.). Указанным элементам отводится следующая роль: 1) дополнительное упрочнение по растворному типу; 2) пластифицирование - улучшение технологической пластичности сплава за счет измельчения структуры (многие интерметаллиды переходных металлов являются для алюминия модификаторами I рода); 3) повышение жаропрочности в результате образования сложных, термически устойчивых интерметаллидных фаз и структуры каркасного типа.

Другая часть вспомогательных легирующих элементов - элементы II-V группы периодической системы, с незначительной предельной растворимостью в твердом алюминии (Na, K, Be, Ca, Sr, Ba, Bi, Cd). Они используются в алюминиевых сплавах в виде небольших добавок (до ~0,2 %), главным образом для улучшения технологических свойств. Вследствие малого значения  $K_p$  добавки концентрируются на границах растущих кристаллов, блокируют их рост и измельчают зерно. Кроме того, все они (кроме Be) имеют поверхностное натяжение ниже, чем у алюминия, что также способствует проявлению модифицирующего эффекта. Наиболее эффективными модификаторами II рода для алюминиевых сплавов являются элементы с низким поверхностным натяжением - Na, K, Sr, Ba.

В промышленности применяют большое количество литейных алюминиевых сплавов. Пример литых заготовок для двигателей из алюминия представлен на рисунке 1.2.

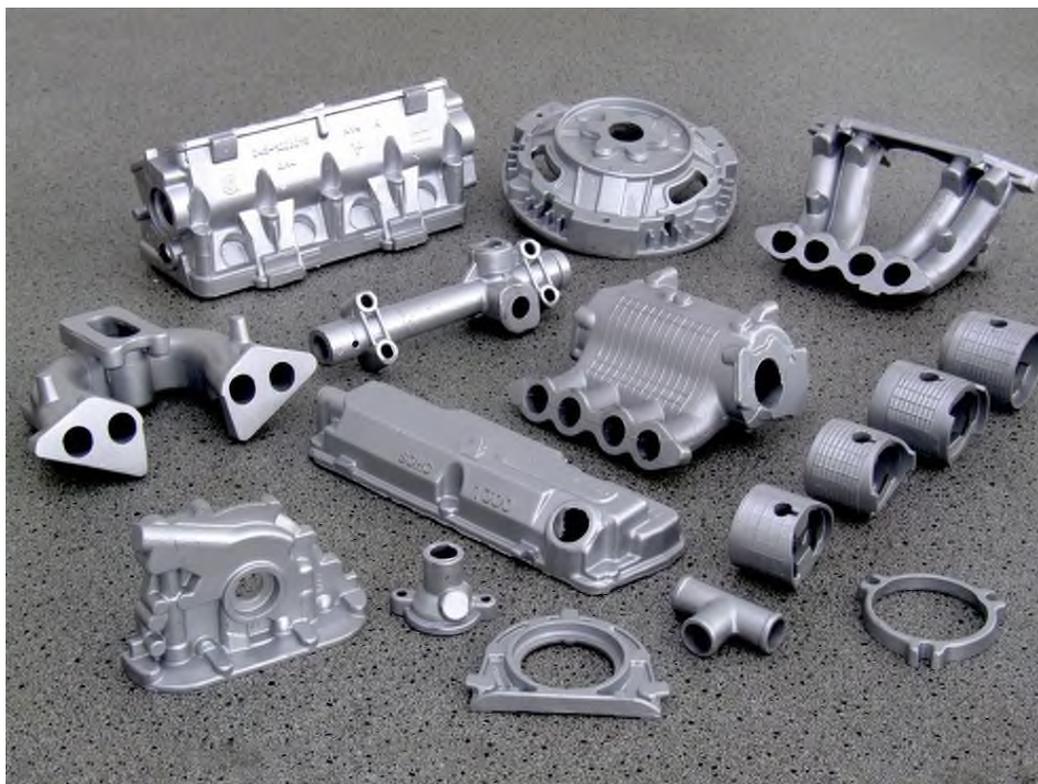


Рисунок 1.2 - Литые заготовки для двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов

Обычно их классифицируют по принципу общности базовой системы, определяющей основной комплекс свойств: сплавы Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Si и т.д. (таблица 1.2) Возможность применения того или иного сплава определяется прежде всего механическими и эксплуатационными свойствами, а также технологическими свойствами и экономической характеристикой, которая во многих случаях является решающим фактором. Прочностные свойства литейных алюминиевых сплавов лежат в пределах  $\sigma_b = 150-450$  МПа,  $\sigma_T = 100-250$  МПа,  $\delta = 1-20$  %; максимальные рабочие температуры составляют до 300-350 °С. Невысокая плотность (2,6-3,2 г/см<sup>3</sup>) обеспечивает хороший показатель удельной прочности (2,6-3,2 г/см<sup>3</sup>), что особенно ценно для таких отраслей машиностроения, как авиационное и транспортное.

Маркировка сплавов для изготовления фасонных отливок по ГОСТ 2685-75 производится буквами АЛ (алюминиевый, литейный) и числом, показывающим номер сплава. Это число не имеет никакой связи с составом или свойствами сплава. Буква В (вторичный) в конце обозначения марки указывает, что для изготовления сплава используются готовые алюминиевые сплавы в чушках.

Таблица 1.2 - Химический состав (ГОСТ 2S85-75) и типичные механические свойства алюминиевых литейных сплавов

Базовая система	Марка сплава	Среднее содержание элементов *, %						Механические свойства	
		Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Прочие элементы	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Al-Si	АЛ2	11,5	-	-	-	-	-	140-180	1-6
Al-Si-(Mg)	АЛ4	9,0	0,23		-	0,35	0,2 Ti;	200-240	2-4
	АЛ9	7,0	0,30				0,3 Be	160-230	1-5
	АЛ34 (ВАЛ5)	7,5	0,45					260-330	2-4
Al-Si-Cu	АЛ6	5,2	-	2,5	-	0,4'0	-	170-250	3-8
	АК4М4 (АЛ 15В)	4,0		4,2				200-260	0,5-1,0
Al-Si-Cu-(Mg): доэвтектические сплавы	АЛ5	5,0	0,5	1,2	-	0,75	-	160-230	0,5-1,0
	АЛ3	5,0	0,5	2,2				150-250	0,5-2,0
	АК5М7 (АЛ10В)	5,5	0,35	7,0				140-220	0,5-1,0
эвтектические сплавы	АЛ25	12,0	1,0	2,2	-	0,45	1,0 Ni;	>190	0,5-1,0
	АЛ30	12,0	1,0	1,1			0,1 Ti; 1,0 Ni	>200	0,5-1,0
заэвтектический сплав	АК21М2, 5Н2,5	21,0	0,35	2,5		0,30	2,5 Ni; 0,3 Cr; 0,2 Ti	180	0,5-1,0
Al-Si- Zn	АЛИ	7,0	0,2	-	9,5	-	-	180-250	1-3
Al-Cu Al-Cu-(Ni)	АЛ7	-	-	4,5	-	-	-	200-230	3-6
	АЛ19	-	-	4,9	-	0,8	0,2 Ti;	300-360	4--8
	АЛ33 (ВАЛ1)	-	-	5,8	-	0,8	1,0 Ni; 0,1 Zr; 0,2 Ce	250-280	2-4
Al-Mg	АЛ8	-	9,7	-	-	-	0,27 Zr; 0,07 Be	>290	9-12
	АЛ27	-	10,0	-	-	-	По ~0,1 Т	>320	12-16
	АЛ23	-	6,5	-	-	-	Zr, Be	190-230	4-6
	АЛ28	-	5,5	-	-	0,7	0,1 Ti	200-220	4-6
Al-Mg-(Si)	АЛ 13	1,0	5,0	-	-	0,25	-	170-200	3-5
	АЛ22	1,0	11,7	-	-	-	0,1 Ti; 0,05 Be	180-260	1-3
Al-Cu-Mg-(Ni)	АЛ1	-	1,5	4,1	-	-	2,0 Ni;	180-230	0,5-1,5
	АЛ21	-	1,0	5,3	-	0,20	3,1 Ni; 0,15 Cr	180-240	0,5-1,0
Al-Mg-Zn	АЛ24	-	1,7	-	4,0	0,35	0,15 Ti	220-300	2-3

Химический состав сплавов- в чушках регламентируется ГОСТ 1583-73 и маркируется несколько иначе: буквой А в начале марки и последующими буквами и цифрами, обозначающими элемент и его содержание в сплаве. Например, сплав АК5М7 содержит 5 % Si, 7 % Cu, Al - остальное. Эта система маркировки применяется также в ГОСТ 2685-75.

## 1.2 Сплавы на основе системы Al-Cu

Для анализа структурообразования в литейных сплавах Al-Cu используется участок диаграммы состояния от алюминия до первого химического соединения  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ), образующегося при ~50% Cu. Отметим ряд особенностей диаграммы, представленной на рисунке 1.3.

1. Значительная предельная растворимость в твердом состоянии ( $C_p = 5,65\% \text{ Cu}$ ) и быстрое уменьшение ее с понижением температуры определяют возможность упрочняющей термической обработки сплавов (закалка + старение).

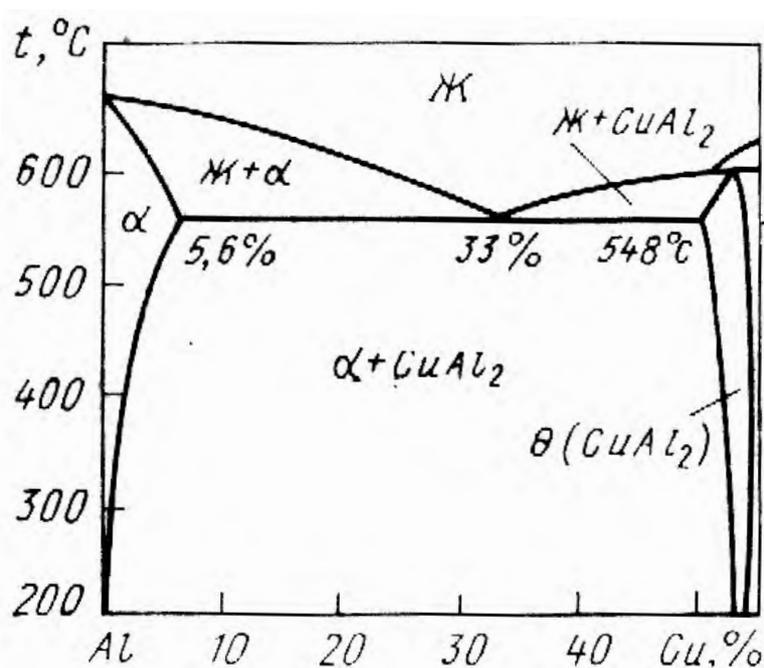


Рисунок 1.3 - Диаграмма состояния Al-Cu

Упрочняющей фазой являются дисперсные вторичные выделения  $\text{CuAl}_2$ . Часть меди сохраняется в твердом растворе и дополнительно упрочняет сплав по растворному типу. Повышенная прочность и жаропрочность - основные достоинства сплавов Al-Cu.

2. Эвтектическая точка сдвинута к интерметаллиду ( $C_e = 33\%$ ), поэтому эвтектика более чем наполовину (по объему) состоит из хрупкого и твердого соединения  $\text{CuAl}_2$ . В результате сплавы эвтектического состава (с наилучшими литейными свойствами) совершенно не пригодны к использованию из-за высокой хрупкости. Кроме того, значительное содержание меди приводит к заметному увеличению плотности сплавов: от 2,7 для чистого алюминия до 3,3 г/см<sup>3</sup> для сплава с 10% Cu. Указанные обстоятельства ограничивают концентрацию добавок меди в литейных сплавах с нижней стороны 1,0-1,5% (для обеспечения достаточного растворного упрочнения), с верхней стороны 6-8% (во избежание излишней хрупкости из-за образования  $\text{CuAl}_2$ ).

3. Невысокая температура плавления эвтектики ( $t_e = 548\text{ °C}$ ) в сочетании с большим значением  $C_p$  приводит к образованию в промышленных сплавах

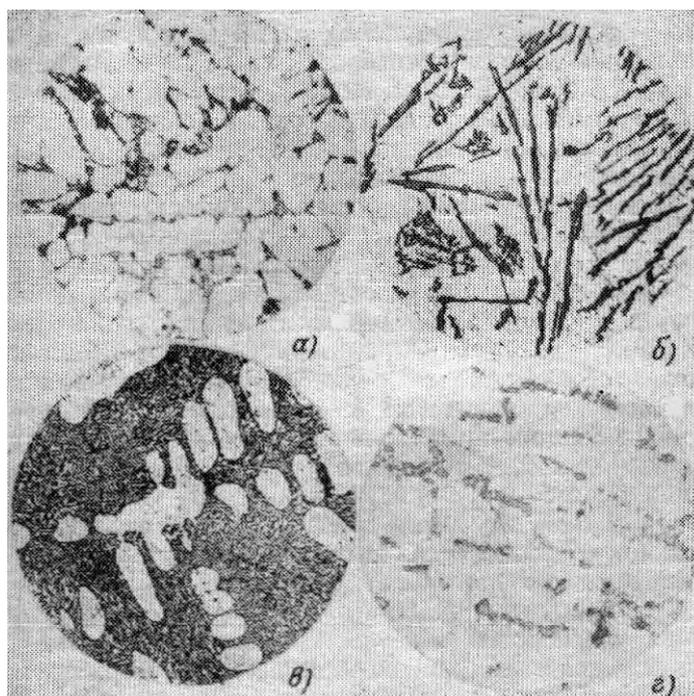
широкого интервала кристаллизации ( $\Delta t_{кр} \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Такие сплавы отличаются пониженной жидкотекучестью, склонностью к пористости и образованию горячих трещин, в них сильно развита ликвация; неравновесная эвтектика появляется уже при 1,5-2,5 % Cu. Таким образом, на примере сплавов Al-Cu встречаемся с характерной ситуацией, когда для получения требуемого комплекса механических свойств приходится жертвовать литейными технологическими свойствами.

Сплав AL7 упрочняется по растворному типу, а также за счет дисперсных выделений фазы  $\text{CuAl}_2$ . Кроме того, примеси железа и кремния образуют нерастворимые железосодержащие фазы, выделяющиеся в виде ободков по границам дендритных ячеек. Термическая обработка заключается в закалке от  $515 \text{ }^\circ\text{C}$  в горячей воде и искусственном старении при  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2-4 ч. В результате сплав приобретает следующие свойства:  $\sigma_b = 200-250 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T = 120-150 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 3-6 \%$ . В тех случаях, когда требуется повышенная пластичность сплава (при некотором снижении прочности), ограничиваются только закалкой. Сплав AL7 имеет повышенную усадку (1,4 %), склонен к образованию горячих трещин и по этой причине не рекомендуется для литья в кокиль. Он применяется для литья средненагруженных деталей, небольших по размеру и простых по конфигурации, работающих при температуре до  $200-250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Сплав AL19 помимо меди содержит марганец и титан, которые образуют сложные интерметаллидные фазы:  $\text{T}(\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu})$  и  $\text{TiAl}_3$  (примеси железа жестко ограничены). Эти фазы совместно с  $\text{CuAl}_2$  формируют твердый каркас по границам дендритных ячеек и придают сплаву повышенную жаропрочность. Термическая обработка отличается более высокими температурами (закалка от  $545 \text{ }^\circ\text{C}$ , старение при  $175 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Сравнительно высокое содержание меди в сплаве (до 5,5 %) приводит к образованию в литом состоянии неравновесной тройной эвтектики.

Микроструктуры литейных алюминиевых сплавов представлены на рисунке 1.4.

В связи с этим нагрев при закалке проводят ступенчато - с выдержкой при  $530 \text{ }^\circ\text{C}$  для рассасывания неравновесной эвтектики. Это типичный прием при термической обработке ряда литейных сплавов, склонных к сильной дендритной ликвации. Сплав AL 19 характеризуется высокими прочностными свойствами ( $\sigma_b = 300-370 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T = 170-250 \text{ МПа}$ ) при хорошей для литейных сплавов пластичности ( $\delta=5-8 \%$ ). Усадка сплава составляет 1,25 %, жидкотекучесть и трещиностойкость несколько лучше, чем у сплава AL7 (благодаря добавке титана, измельчающей структуру). Сплав широко применяют для изготовления высоконагруженных силовых деталей, работающих при нормальной и повышенных температурах (до  $250-300 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



а - сплав АЛ19, дендритные ячейки  $\alpha$ -твердого раствора и включения эвтектики (по данным И. В. Мальцева); б - сплав АЛ2 в немодифицированном состоянии, грубые эвтектические выделения кремния в матрице  $\alpha$ -твердого раствора; в - сплав АЛ2 в модифицированном состоянии, первичные дендриты  $\alpha$ -твердого раствора на фоне дисперсной эвтектики  $\alpha + \text{Si}$ ; г - сплав АЛ5, ячейки дендритов твердого раствора и эвтектики

Рисунок 1.4 - Микроструктуры литейных алюминиевых сплавов (x200)

Сплав АЛ33 (ВАЛ1) отличается от предыдущих добавками Ni, Zr и Се, поэтому его структура имеет более сложный фазовый состав. Никелевая фаза' ( $\text{Al}_6\text{CuNi}$ ) образует твердый каркас, увеличивающий прочностные свойства сплава при повышенных температурах. В результате сплав АЛ33 менее прочен при нормальной температуре ( $\sigma_{\text{в}} = 280 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{т}} = 180 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 2 \%$ ), но более жаропрочен при рабочих температурах 250-350 °С, значительно превосходя по этим показателям сплавы Al-Mg и Al-Si. Ниже приведены значения длительной (100 ч) прочности некоторых алюминиевых литейных сплавов при температуре 300 °С.

Сплав.....	АЛ8	АЛ2	АЛ4	АЛ5	АЛ7	АЛ19	АЛ33.
$\sigma_{100}$ , МПа.....	15	25	30	35	30	65	90.

Сплав АЛ33 обладает удовлетворительными литейными свойствами и применяется для тех же целей, что и сплав АЛ19.

Все сплавы Al-Cu имеют пониженную по сравнению с другими алюминиевыми сплавами коррозионную стойкость и нуждаются в тщательной защите от коррозии путем анодирования или нанесения лакокрасочных покрытий. Заварка дефектов производится аргонодуговой или газовой сваркой. Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

### 1.3 Сплавы на основе системы Al-Mg

В системе Al-Mg имеется несколько химических соединений. Ближайшее к алюминию соединение  $\beta$  ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ) образует с алюминием эвтектическую систему. Отметим некоторые особенности системы, определяющие состав сплавов и их технологические свойства (рисунок 1.5 и рисунок 1.6).

1. Концентрация эвтектической точки ( $C_3 = 33\% \text{Mg}$ ) незначительно отличается от концентрации магния (38 %) в соединении  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , поэтому эвтектика практически целиком состоит из интерметаллида. Как и в случае сплавов Al-Cu, эта особенность исключает промышленное использование эвтектических сплавов.

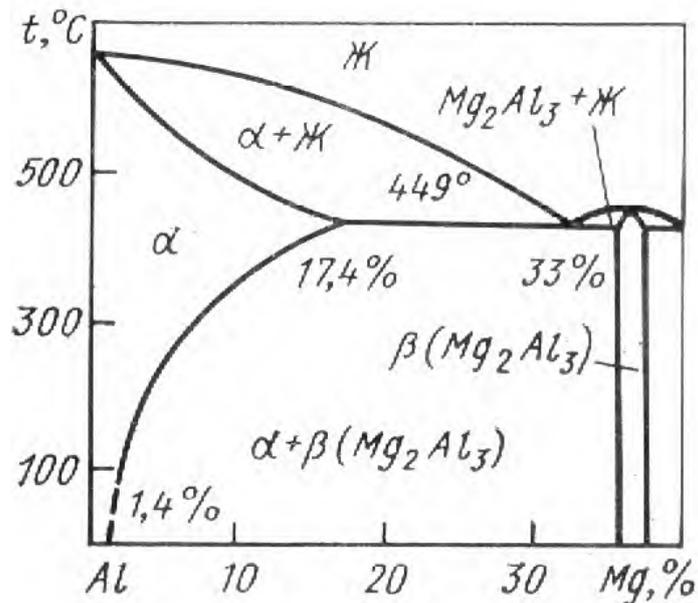
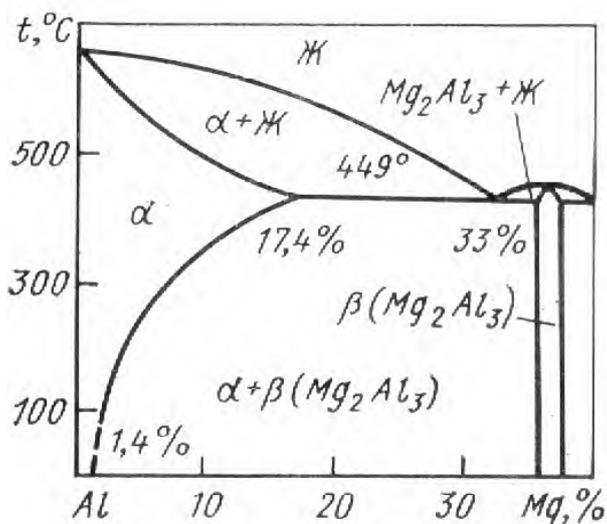


Рисунок 1.5 - Диаграмма состояния Al-Mg

2. Магний очень хорошо растворим в алюминии ( $C_p = 17,4\%$ ). Несмотря на значительное изменение растворимости с понижением температуры, выделение вторичных дисперсных частиц  $\beta$ -фазы не дает существенного упрочнения. Поэтому искусственное старение для сплавов этой группы не применяется. Упрочнение в сплавах достигается главным образом за счет растворного механизма; объемный фактор благоприятствует этому.

3. Низкая эвтектическая температура ( $T_3 = 449^\circ\text{C}$ ) приводит к образованию широкого температурного интервала кристаллизации; при концентрации  $C_p$  он составляет  $\sim 150^\circ\text{C}$ . Значение  $K_p = 0,50$  при  $C_p = 17,4\%$  указывает на высокую склонность сплавов к дендритной ликвации, что приводит к появлению в структуре сплава неравновесной эвтектики уже при содержании магния более  $2,0 - 2,5\%$ . Сильное смещение неравновесного солидуса дополнительно расширяет температурный интервал кристаллизации  $\Delta t_{\text{кр}}$ , который в сплавах с  $10\%$  Mg превышает  $150^\circ\text{C}$ . Все пригодные к промышленному использованию сплавы Al-Mg находятся в области широкого

температурного интервала  $\Delta t_{кр}$  и обладают низким комплексом литейных свойств.



1 - сплавы Л1 - Mg в закаленном состоянии; 2, 3 - сплавы Л1-Si соответственно в модифицированном и немодифицированном состояниях

Рисунок 1.6 - Влияние добавок магния (1) и кремния (2, 3) на прочность (сплошные линии) и пластичность (штриховые линии) алюминиевых сплавов в литом состоянии (литье в песчаную форму)

В системе Al-Mg с увеличением концентрации магния до 13 % прочность сплавов возрастает, но пластичность начинает резко снижаться при содержании свыше 11 % Mg. В связи с этим для литейных сплавов используются две области концентраций: 1) 4,5-7 % Mg - сплавы средней прочности, применяемые без термической обработки (АЛ 13, АЛ23); 2) 9,5-13% Mg - сплавы повышенной прочности, применяемые в закаленном состоянии (АЛ8, АЛ27, АЛ22). Для улучшения технологических свойств в большинство сплавов вводят добавки титана и циркония в количестве до 0,15-0,20 %. Они образуют более тугоплавкие, чем основа сплава, интерметаллиды  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{ZrAl}_3$  и являются модификаторами I рода. В процессе старения дисперсные частицы этих интерметаллидов несколько повышают прочность. Добавку 0,05-0,2 % Ве вводят для уменьшения окисляемости сплава.

Сплавы АЛ13, АЛ23, АЛ28 применяют без термической обработки, что значительно упрощает технологический процесс. Однако комплекс механических свойств при этом невысок ( $\sigma_b = 170-210$  МПа,  $\sigma_T = 100-120$  МПа,  $\delta = 3-4$  %). Низкая пластичность объясняется наличием в структуре неравновесных включений  $\beta$ -фазы. Гомогенизация сплава (при температуре  $420^\circ\text{C}$ ) значительно повышает пластичность. Кремний вводят в сплав АЛ 13 для улучшения жидкотекучести, так как он увеличивает количество эвтектики. Сплавы используются для изготовления деталей средней степени нагруженные.

Сплавы АЛ8, АЛ27 применяют только в закаленном состоянии. Термическая обработка производится по режиму: нагрев до  $430^\circ\text{C}$ , выдержка 12-20 ч (для рассасывания неравновесной эвтектики и выравнивания

ликвационных неоднородностей состава), охлаждение в масле. При закалке фиксируется состояние пересыщенного твердого раствора и повышается прочность сплавов до 315 МПа (сплав АЛ8) - 375 МПа (сплав АЛ27);  $\sigma_T = 170-200$  МПа. Одновременно резко возрастает пластичность (в сплаве АЛ27 от 1 % в литом до 20 % в закаленном состоянии), увеличивается также коррозионная стойкость.

Сплавы Al-Mg выделяются наиболее высокой прочностью и пластичностью среди всех литейных алюминиевых сплавов, превосходя по этим показателям многие деформируемые сплавы. К недостаткам следует отнести низкий предел текучести, а также склонность к потере пластичности при естественном старении. Кроме того, все прочностные свойства быстро снижаются с повышением температуры, и по показателям жаропрочности сплавы Al-Mg занимают одно из последних мест. Добавка кремния несколько повышает жаропрочность, но все же рабочие температуры алюминиево-магниевого сплава не превышают 100-120 °С.

Характерной особенностью сплавов Al-Mg является очень высокая общая коррозионная стойкость в атмосфере и в морских условиях, которая может быть еще более повышена путем анодирования или нанесения лакокрасочных покрытий. Это ценное свойство определяет возможность применения сплавов в судостроении. Сплавы используются также в других отраслях машиностроения для изготовления деталей, несущих высокие статические и динамические нагрузки. Однако при общей высокой коррозионной стойкости сплавы АЛ8 и АЛ27 подвержены коррозии под напряжением или коррозионному растрескиванию. Поэтому большее распространение в настоящее время получили сплавы со сравнительно небольшим содержанием магния 4,5-7 % Mg - АЛ13, АЛ23, АЛ28. Пример применения данных сплавов представлен на рисунке 1.7.

Широкое использование алюминиево-магниевого сплава сильно затруднено из-за низких технологических литейных свойств, определяемых в значительной степени большим  $\Delta t_{кр}$ . Сплавы очень склонны к дендритной ликвации, - а также к образованию горячих трещин (хотя и в меньшей степени, чем сплавы Al-Cu). По жидкотекучести сплавы Al-Mg уступают силуминам, но превосходят сплавы Al-Cu.

Жидкотекучесть алюминиевых сплавов приведена ниже.

Система.....	Al-Cu	Al-Mg	Al-Cu-Mg	Al-Si	Al-Si-Me				
Сплав.....	АЛ7	АЛ19	АЛ13	АЛ8	АЛ1	АЛ21	АЛ2	АЛ4	АЛ5
АЛ9									
Жидкотекучесть $l_{ж}$ , мм..	163	205	320	318	270	360	420	360	344
	350								

Получению качественных отливок из сплавов Al-Mg сильно препятствует их высокая газонасыщенность и склонность к образованию газовой и газоусадочной пористости.

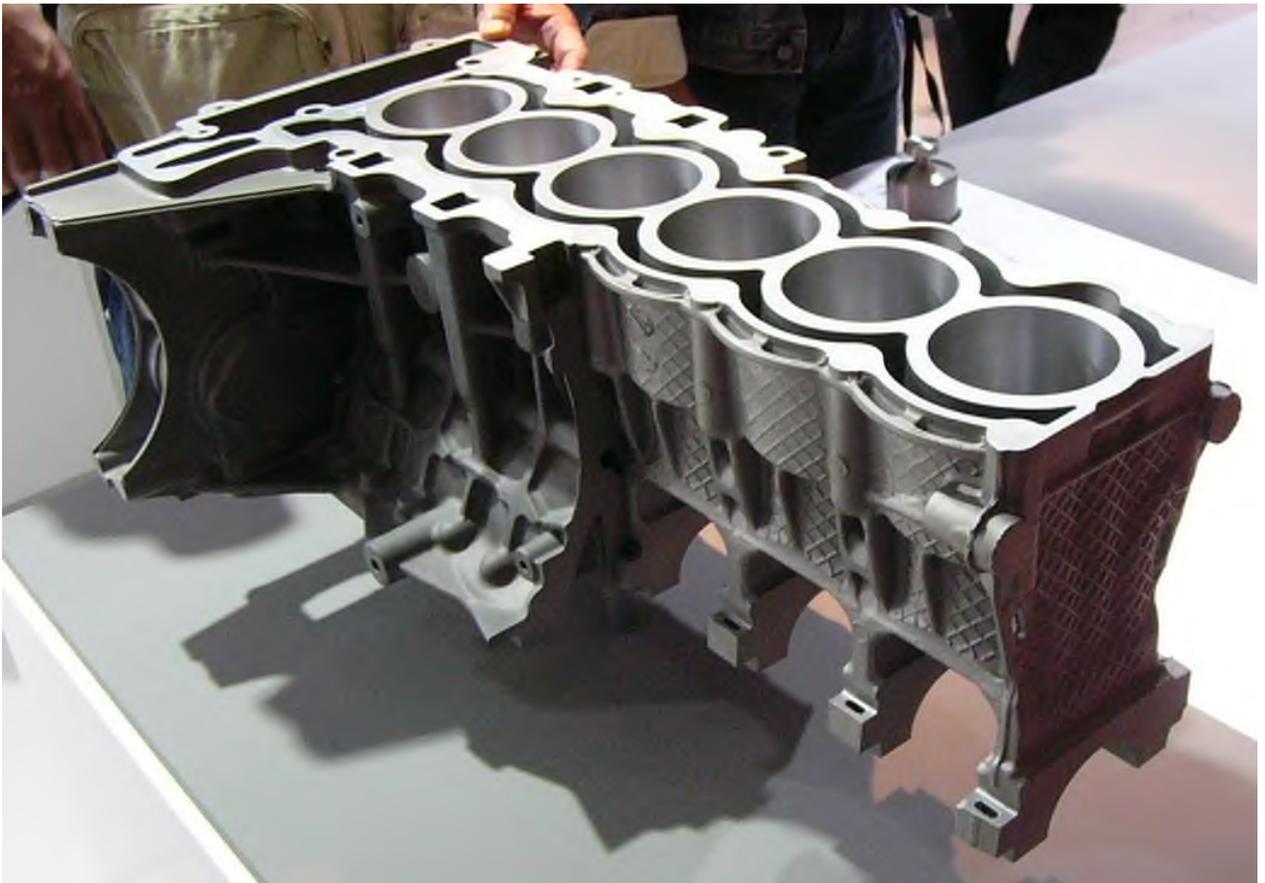


Рисунок 1.7 - Блок цилиндров из сплава Al-Mg

Повышенная окисляемость в расплавленном состоянии, а также взаимодействие с азотом воздуха и парами воды приводят к образованию неметаллических включений и окисных плен. Они обнаруживаются в изломе отливки в виде серых и черных пятен. Механические свойства в этом случае значительно снижаются. В настоящее время ведутся широкие исследования по устранению недостатков, свойственных алюминиево-магниевым сплавам, и более полной реализации их положительных свойств.

#### **1.4 Сплавы на основе системы Al - Si- Me (силумины)**

Сплавы Al-Si и Al-Si-Me являются наиболее распространенными литейными алюминиевыми сплавами (рисунок 1.8). Это связано с хорошим комплексом литейных технологических свойств, определяемых, в свою очередь, видом диаграммы состояния. Эвтектическая точка (11,7% Si) смещена к чистому алюминию, поэтому основой эвтектики  $\alpha + \text{Si}$  (каркасно-матричного типа) является  $\alpha$ -твердый раствор. Если выделения кремния в эвтектике находятся в виде крупных образований, то пластичность сплава резко ухудшается с увеличением доли эвтектики в структуре, и для эвтектических сплавов  $\delta \approx 0,5 - 1 \%$ . Модифицирование натрием (используются также Li, K, Sr) резко измельчает включения кремния в эвтектике, в результате повышается комплекс пластических свойств ( $\delta = 5-8 \%$ ). Натрий вводят путем обработки расплава солями NaF+NaCl.

При этом сплавом усваивается около 0,01 % Na. При модифицировании натрием отмечается переохлаждение эвтектики на 15-30 °С, а эвтектическая точка сдвигается к 13-15 % Si. Эффект модифицирования тем больше, чем выше содержание кремния в сплаве, так как модификатор воздействует только на эту фазу. Для силуминов, содержащих менее 5-7 % Si, модифицирование теряет практический смысл, так как выигрыш в свойствах незначителен.

Небольшое количество хрупкого кремния в эвтектике и модифицирование структуры позволяют использовать эвтектические сплавы с наилучшим комплексом литейных свойств (сплав АЛ2). Доэвтектические сплавы с 5-9 % Si и другими добавками также находят широкое применение (АЛ4, АЛ9, АЛ5); заэвтектические сплавы (АК21М2, 5Н2.5 и др.) применяют реже.

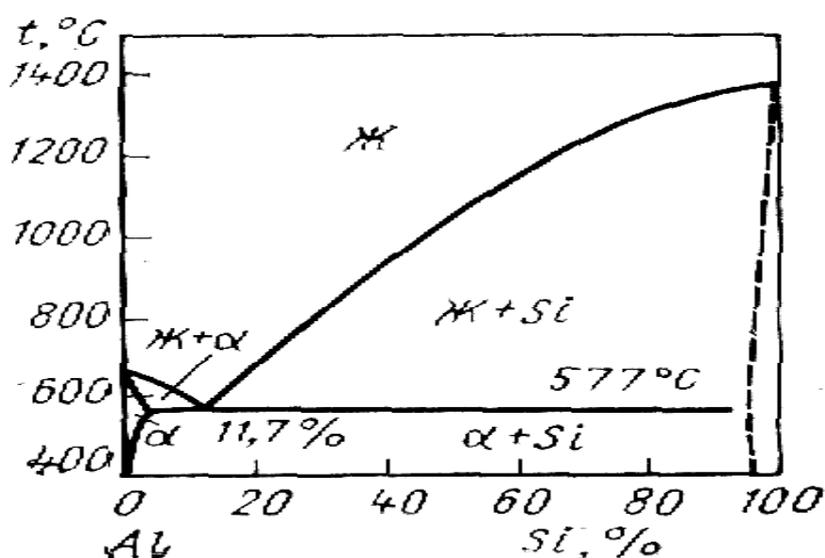


Рисунок 1.8 - Диаграмма состояния Al - Si

В двойных сплавах Al-Si, получивших название простые силумины, вследствие малого значения  $C_p = 1,65\%$  и отсутствия интерметаллидов эффект упрочнения от выделения вторичных фаз очень незначителен и не имеет практического значения. В связи с этим двойные сплавы относятся к числу термически неупрочняемых и обладают невысокими прочностными свойствами.

Для получения эффекта упрочнения при термической обработке (закалка + искусственное старение) в двойные сплавы вводят добавки магния и меди отдельно или совместно. Такие сплавы названы специальными силуминами. Компоненты сплава образуют интерметаллиды с переменной растворимостью в твердом состоянии, которые служат эффективными упрочнителями при термической обработке. Прочностные свойства таких сплавов повышаются до  $\sigma_B = 250-330$  МПа,  $\sigma_T = 180-280$  МПа при пластичности  $\delta = 3-6\%$ .

Примеси железа в сплавах Al-Si образуют сложное соединение  $\beta$  (Al-Fe-Si) в виде хрупких пластин, которые резко снижают пластичность. Особенно опасны примеси железа в специальных термически упрочняемых силуминах.

Отрицательное влияние железа эффективно снижает добавка 0,2-0,5 % Mn. В присутствии марганца вместо  $\beta$  (Al-Fe-Si) образуется фаза  $\alpha$  (Al-Fe-Si-Mn) в виде компактных равноосных полиэдров, в меньшей степени влияющих на пластичность.

Механические свойства силуминов заметно отличаются при различных способах литья. Характерные отливки из сплавов системы: Al-Si и Al-Si-Me, полученные литьем в кокиль и методом литья под давлением представлены на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 - Отливки из сплавов Al-Si и Al-Si-Me

Ниже всего свойства при литье в песчаные формы; при литье в кокиль или под давлением  $\sigma_b$  и  $\sigma_T$  увеличиваются на 20-30 МПа при одновременном возрастании пластичности. Объясняется это тем, что более высокая скорость кристаллизации приводит к измельчению структурных составляющих. Кроме того, в твердом растворе удерживается большая концентрация легирующих элементов. Это дает возможность для кокильных отливок из некоторых специальных силуминов (АЛ5) проводить искусственное старение без предварительной закалки. Различие скоростей кристаллизации приводит также

к тому, что свойства на образцах, вырезанных из отливок (особенно толстостенных), заметно ниже, чем на отдельно отлитых образцах.

Сплав АЛ2-единственный промышленный двойной сплав системы Al-Si. Он характеризуется невысокими механическими свойствами, которые в зависимости от условий литья и размеров сечения отливки (скорости охлаждения) колеблются в пределах  $\sigma_b = 120-220$  МПа при  $\delta=0,5-10$  %. Эвтектический состав сплава (10-13 % Si) обеспечивает ему отличный комплекс литейных свойств: наиболее высокую жидкотекучесть среди всех алюминиевых сплавов; отсутствие склонности к образованию трещин и пористости. Из сплава получают плотные, герметичные отливки с концентрированной усадочной раковинной. Линейная усадка не превышает 0,8 %. Сплав широко используется для всех способов литья в различные формы, применяется в модифицированном состоянии, без термической обработки.

Доэвтектические специальные силумины (АЛ4, АЛЯ, АЛ34, АЛ5) по технологическим свойствам несколько уступают эвтектическому сплаву АЛ2, но превосходят его по комплексу механических свойств. В сплавах АЛ4, АЛ9 упрочнение достигается путем введения небольшой добавки магния (0,2-0,4 %) при одновременном снижении содержания кремния до 6-10 % (во избежание излишней хрупкости). Эти сплавы по существу относятся к тройной системе Al-Si-Mg, так как образующееся соединение  $Mg_2Si$  играет определяющую роль в формировании прочности. Сплав АЛ4 подвергается закалке от 535 °С в горячей воде и искусственному старению при 175 °С в течение 15 ч, во время которого происходит выделение дисперсных частиц упрочняющей фазы  $Mg_2Si$ . Эта термическая обработка является типичной для всех специальных силуминов. Пониженное содержание кремния позволяет использовать сплавы без модифицирования в тех случаях, когда обеспечиваются повышенные скорости кристаллизации - при литье под давлением и в кокиль. При литье по выплавляемым моделям и в песчаные формы рекомендуется модифицировать сплавы. В зависимости от условий литья и термической обработки прочность колеблется в пределах  $\sigma_b = 180-260$  МПа,  $\sigma_T = 100-200$  МПа при относительном удлинении  $\delta = 3-6\%$ .

В сплаве АЛ34 (ВАЛ5) увеличено содержание магния до 0,55 и введены добавки 0,1-0,3 % Ti и 0,15-0,40 % Вe, модифицирующие и упрочняющие сплав. В результате сплав по прочности превосходит другие специальные силумины ( $\sigma_b = 300-340$  МПа) и позволяет получать плотные высокогерметичные отливки.

В сплаве АЛ5 дополнительно к магнию вводится добавка 1,0-1,5 % Си, что изменяет фазовый состав - образуются новые упрочняющие фазы  $\theta$  ( $CuAl_2$ ) и W ( $Al_xMg_5Cu_4Si_4$ ). Они обуславливают лучшие механические свойства при повышенных температурах. Сплав АЛ5 и близкий к нему по составу сплав АЛ3 являются наиболее жаропрочными среди специальных силуминов. Изготовленные из них детали могут длительное время работать при температурах до 270 °С. Механические свойства при нормальной температуре  $\sigma_b = 180-230$  МПа,  $\delta = 0,5-1,0$  %. В связи с пониженным содержанием кремния (4,5-5,5 %) сплавы

АЛ5 и АЛ3 применяют без модифицирования. Термическая обработка аналогична термической обработке сплава АЛ4.

Двойные сплавы Al-Si (АЛ2) характеризуются высокой коррозионной стойкостью, добавки магния и особенно марганца 0,2-0,5 % (в сплаве АЛ4) дополнительно повышают ее. Медь, напротив, резко снижает коррозионную стойкость (в сплавах АЛ5, АЛ3).

Специальные силумины имеют отличные литейные свойства-высокую жидкотекучесть, хорошую герметичность, относительно небольшую линейную усадку (0,8-1,0 %). Все они относятся к узкоинтервальным сплавам:  $\Delta t_{кр} = 30-50$  °С. Сплавы АЛ4 и АЛ2 имеют повышенную склонность к поглощению газов и образованию газовой пористости, сплав АЛ9 менее склонен к этим дефектам. Для повышения герметичности крупногабаритных отливок заливку и кристаллизацию рекомендуется вести в автоклавах при избыточном давлении.

Сплавы АЛ4 и АЛ9 применяют для наиболее ответственных, сложных и крупногабаритных деталей, несущих большие нагрузки, например, картеров двигателей внутреннего сгорания. Сплав АЛ34 предназначен для литья сложных по конфигурации корпусных деталей, работающих под высоким внутренним давлением; рабочие температуры сплава не более 150-200 °С. Сплав АЛ5 применяют для отливок крупногабаритных, нагруженных деталей, работающих в условиях повышенных температур (головки цилиндров двигателей воздушного охлаждения и др.). Сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, кроме того, широко используют для литья мало- и средненагруженных деталей приборов, агрегатов и двигателей, а также для бытовых изделий.

Эвтектические специальные силумины (АЛ25, АЛ30), обладая хорошими литейными свойствами, отличаются более высокой жаропрочностью, так как содержат добавку 1-2 % Ni, образующего сложные фазы в виде жесткого каркаса; добавка титана улучшает технологичность сплава.

Заэвтектический силумин АК21М2,5Н2,5 содержит 20-22 % Si. Структура сплава состоит из первичных кристаллов кремния и эвтектики. Сплав имеет высокую жидкотекучесть, хорошую твердость и износостойкость. Добавки никеля и хрома обеспечивают высокую жаропрочность до 300-320 °С. Сплавы АЛ25 и АК21М2,5Н2,5 в настоящее время заменяет склонный к объемным изменениям сплав АЛ10В для производства поршней и других ответственных деталей, работающих при повышенных температурах.

Цинковый силумин АЛ11 содержит добавку 7-12 % Zn, который очень хорошо растворим в твердом алюминии и создает растворное упрочнение. Это позволяет использовать сплав АЛ11 в литом состоянии без термической обработки. Механические свойства сплава АЛ11 выше, чем механические свойства сплава АЛ2 ( $\sigma_b = 200-250$  МПа,  $\delta = 1,5-2$  %).

### **1.5 Сложные сплавы Al-Cu-Mg и Al- Mg-Zn**

Литейные сплавы на основе системы Al-Cu-Mg по своей природе близки к дуралюминам. Упрочнение в них достигается за счет растворного механизма и интерметаллидных фаз, образующих дисперсные частицы при термической

обработке (закалка + старение). В отличие от деформируемых дуралюминов к литейным сплавам предъявляют менее строгие требования по пластичности. Поэтому в сплавы этой группы для повышения жаропрочности вводят малорастворимые или практически нерастворимые добавки Ni, Cr и Fe, обеспечивающие каркасное упрочнение.

Сплав АЛ1 (система Al-Cu-Mg) является одним из первых литейных жаропрочных сплавов. По составу и свойствам к нему близок сплав АЛ21. Высокая жаропрочность в этих сплавах достигается в результате образования сложных интерметаллидных фаз  $\Gamma$  ( $Al_6Cu_3Ni$ ) и  $\delta$  ( $Al_3Cu_2Ni$ ), а также фазы  $Al_9FeNi$  и S ( $Al_2CuMg$ ). Сплавы имеют удовлетворительные литейные свойства и применяются для литья деталей двигателей, длительное время работающих при температурах до 300 °С (поршни, головки цилиндров и др.). В настоящее время эти сплавы оттесняются на второй план разработанными в более позднее время сплавами Al-Cu. Так сплавы АЛ19 и АЛ39 превосходят АЛ1 по прочности и жаропрочности; кроме того, они имеют несомненные преимущества по технологическим литейным свойствам.

Сплав АЛ24 относится к системе Al-Zn-Mg, где основным упрочнителем является фаза  $\Gamma$  ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ). Свойства сплава после термической обработки:  $\sigma_b = 350$  МПа,  $\sigma_T = 280$  МПа,  $\delta = 3,5$  %. Высокая устойчивость твердых растворов цинка и магния в алюминии обеспечивает «самозакалку» сплава в процессе охлаждения отливки. Поэтому сплав может применяться без специальной закалки, в литом и естественно или искусственно состаренном состоянии. В этом случае обеспечиваются механические свойства;  $\sigma_b > 220$  МПа,  $\sigma_T > 170$  МПа,  $\delta = 2,5$  %. Сплав обладает удовлетворительными литейными свойствами, их улучшение достигается введением добавки титана (0,1-0,2 %). К недостатку сплава АЛ24 относится склонность к коррозии под напряжением.

## **1.6 Общая характеристика магния и его взаимодействие с другими элементами**

Магний плавится при 651 °С и кипит при 1103°С. Он не имеет полиморфных модификаций и при всех температурах в твердом состоянии сохраняет гексагональную плотноупакованную структуру. Удельная теплоемкость [1,03кДж/(кг·К)] приблизительно такая же, как у алюминия, но скрытая теплота плавления существенно меньше (293 Дж/г).

Механические свойства технически чистого литого магния невысоки:  $\sigma_b = 125$  МПа,  $\sigma_T = 30$  МПа,  $\delta = 10$  %, НВ 30,  $E = 45$  ГПа. Обращают на себя внимание низкие значения пластичности и модуля нормальной упругости, обусловленные гексагональной кристаллической решеткой. Однако все прочностные свойства следует оценивать с учетом малой плотности магния (1,74 г/см<sup>3</sup>): по удельному значению модуля упругости он не уступает алюминию, а по удельной прочности превосходит его.

Магниевого сплавы обладают высокой демпфирующей способностью (хорошо поглощают механические вибрации). Этот комплекс свойств обеспечивает рациональное применение магниевых сплавов прежде всего в

транспорте (наземном и водном), в авиации и ракетной технике. Магний в различных видах представлен на рисунке 1.10.



кристаллический магний

магний в виде чушек

Рисунок 1.10 - Вид магния в исходной кристаллической форме и в чушках

Магний - химически активный металл и быстро окисляется на воздухе. При высоких температурах скорость окисления возрастает, а при 623 °С магний воспламеняется; он горит, излучая ослепительно-яркий белый свет и выделяя большое количество теплоты. Окисная пленка не обладает достаточными защитными свойствами, так как растрескивается вследствие различных плотностей MgO и металла.

Первичный магний выпускают трех марок: Mg90, Mg95 и Mg96 (соответственно примесей не более 0,1; 0,05 и 0,04 %). Большинство вредных примесей имеют очень незначительную растворимость в твердом магнии и поэтому либо выделяются в свободном состоянии (Fe, Na, K), либо уже при ничтожном содержании образуют хрупкие интерметаллидные включения по границам зерен (Cu, Ni). Кроме того, эти элементы сильно снижают коррозионную стойкость магния. В литейных сплавах содержание вредных примесей ограничено: не более 0,08 % Fe, 0,01 % Ni и 0,1 % Cu.

Взаимодействие магния с легирующими элементами определяется его промежуточным положением в периодической таблице элементов между щелочными и переходными металлами (таблица 1.3).

Основные легирующие элементы могут быть выбраны из группы элементов, образующих с магнием системы с  $C_p > 1,0\%$  и  $K_p > 0,1$ .

Кадмий - единственный элемент, с которым магний образует неограниченные твердые растворы. Введение большого количества кадмия нецелесообразно из-за высокой плотности (8,65 г/см<sup>3</sup>), поэтому он применяется только в виде небольших добавок. Четыре элемента (Sn, Al, Zn, Li) образуют с

магнием системы с  $C_p > 5 \%$ . Литий является очень интересной добавкой с точки зрения возможности получения сверхлегких сплавов, но высокая стоимость ограничивает его промышленное применение. Олово не применяется из-за большой плотности, а также высокой стоимости и дефицитности. В итоге вне конкуренции оказывается алюминий, образующий с магнием систему эвтектического типа со значительной растворимостью в твердом состоянии ( $C_p = 12,7 \%$ ) и интерметаллидной фазой; кроме того, алюминий, как и магний, имеет небольшую плотность и малую стоимость. Значительную роль в магниевых сплавах играет цинк, образующий с магнием эвтектическую систему с большой растворимостью ( $C_p = 8,4 \%$ ); он, как и алюминий, -дешевый и недефицитный элемент.

Таблица 1.3 - Взаимодействие магния с некоторыми элементами

Характеристики	Sn	Al	Zn	Li	Th	Zr	Nd	Mn	Ca	La
$C_p, \%$	15,0	12,7	8,4	5,5	5,0	3,6	3,6	2,2	1,0	1,0
$C_3 (C_{II}), \%$	36,9	32,3	53,5	8,0	40,0	0,6	33,0	1,0	16,2	12,0
$t_3 (t_{II}), ^\circ\text{C}$	567	437	340	588	588	564	552	653	517	616
$\Delta t_3 = t_{Mg} - t_3, ^\circ\text{C}$	83	213	310	62	62	-	98	-	133	34
Плотность компонента, $\text{г/см}^3$	7,30	2,70	7,14	0,53	11,7	6,49	7,00	7,43	1,55	6,17
Химическое соединение	$\text{Mg}_2\text{Sn}$	$\text{Mg}_4\text{Al}_3$	$\text{Mg}_7\text{Zn}_8$	Нет	$\text{ThMg}_2$	Нет	$\text{Mg}_2\text{Nd}$	Нет	$\text{Mg}_2\text{Ca}$	$\text{LaMg}_{17}$

Элементы Zr, Nd, La, Ce, Th применяют в сплавах как основные или вспомогательные упрочнители. Они существенно повышают жаропрочность магниевых сплавов, так как образуют интерметаллидные фазы, обеспечивающие в литом состоянии каркасное упрочнение. Химические соединения магния с соседними по периодической системе элементами (Al, Zn) нежаропрочны и при  $300^\circ\text{C}$  теряют 70-90 % исходной твердости. Поэтому сплавы Mg-Al, Mg-Zn не обладают жаропрочностью. В то же время фазы магния с переходными и редкоземельными металлами  $\text{Mg}_4\text{Th}$ ,  $\text{Mg}_9\text{Nd}$ ,  $\text{Mg}_9\text{Ce}$  более устойчивы и при  $300^\circ\text{C}$  сохраняют не менее 50 % исходной твердости. Марганец используется главным образом как добавка, повышающая коррозионную стойкость сплавов с одновременным незначительным упрочнением. За рубежом распространены также сплавы с торием, применение которого в нашей стране ограничено в связи с его радиоактивностью. Все рассмотренные элементы образуют с магнием либо эвтектические системы, либо перитектические. Магниевые литейные сплавы классифицируют по химическому составу - базовым диаграммам состояния и температурной области эксплуатации, Основная группа промышленных сплавов принадлежит к трем системам: Mg-Al-Zn (наиболее распространенные), Mg-Zn-Zr и Mg-РЗМ-Zr. Кроме того, находят ограниченное применение сплавы Mg-Mn (коррозионно-стойкие), Mg-Li (сверхлегкие) и Mg-Th (жаропрочные). По температуре эксплуатации сплавы подразделяют на

предназначенные для работы: 1) при нормальной температуре; 2) при температуре до 200 °С; 3) при температуре 250-300 °С; 4) при криогенных температурах.

Механические свойства литейных магниевых сплавов лежат в пределах:  $\sigma_B = 150-340$  МПа,  $\sigma_T = 90-200$  МПа,  $\delta = 2-9$  %. Это ниже предельных прочностных показателей алюминиевых сплавов, но если их отнести к плотности, то удельная прочность окажется более высокой: 16-19 км против 14--17 км для алюминиевых сплавов (таблица 1.4).

Таблица 1.4 - Химический состав и механические свойства магниевых литейных сплавов (ГОСТ 2856-79)

Базовая система	Марка сплава	Среднее содержание элементов (основа Mg), %					Вид термической обработки	Способ литья	Механические свойства, не менее			Предельные рабочие температуры, °С
		Al	Zn	Mn	Zr	Прочие элементы			$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta, \%$	
Mg-Mn	МЛ2	-	-	1,5	-	-	-	-	90	-	3	150
Mg-Al-Zn	МЛ4	6,0	2,7	0,3	-	-	T4	З, О	216	83	0	150
	МЛ5	8,2	0,5	0,3	-	-	T4	З, О, К	226	108	5	150
	МЛ6	9,6	0,9	0,3	-	-	T4	З, К	216	-	4	150
Mg-Zn-Zr-(Me)	МЛ12	-	4,5	-	0,8	-	T1	З, О, К,	226	127	5	200
	МЛ8	-	6,0	-	0,9	0,5 Cd	T6	В, Г	264	166	4	150
	МЛ15	-	4,5	-	0,9	0,9 La Cd	T1	З, О, К, В, Г З, О, К, В, Г	206	127	3	150
Mg-Th-Zn-Zr	МЛ14	-	-	-	0,7	2,7 Th	T1	-	200	-	8	350
Mg-Nd-Zr, Mg-PЗЭ-Zr	МЛ9	-	0,4	-	0,7	0,5 In	T6	З, О, К,	226	108	4	250
	МЛ10	-	0,3	-	0,7	-	T6	В, Г	226	137	3	250
	МЛ19	-	0,4	-	0,7	1,8 Y	T6	З, О, К,	216	118	3	300
	МЛН	-	-	-	0,7	3,2PЗМ	T6	В, Г З, К З, О, К, В, Г	137	98	2	350

Примечания. 1. Обозначение видов термической обработки; T1 - старение; T4 - гомогенизация и закалка на воздухе; T6 - гомогенизация, закалка и старение.

2. Сплавы МЛ2, МЛ14 в действующий ГОСТ 2856-79 не включены.

3. Обозначение способов литья: З - в песчаные формы; К - в кокиль; О - в оболочковые формы; В - по выплавляемым моделям; Г - в гипсовые формы.

Маркировка магниевых литейных сплавов производится буквами МЛ (магний литейный) и числом, обозначающим порядковый номер. В конце маркировки в необходимых случаях ставятся буквы «он» - общего назначения и «пч» - повышенной чистоты.

## 1.7 Магниевые литейные сплавы

Сплавы Mg-Al-Zn (МЛ4, МЛ5, МЛ6) являются наиболее распространенными. Содержание цинка в них значительно ниже предела растворимости - не превышает 3 %; добавка марганца -до 0,5 % - вводится для повышения коррозионной стойкости. Основным легирующим элементом является алюминий, по содержанию которого различают три основных сплава этой группы: МЛ4, МЛ5 и МЛ6. Эвтектические сплавы Mg-Al и Mg-Zn не находят применения из-за высокого содержания интерметаллидов в эвтектике и недопустимой хрупкости. Наличие интерметаллидов и переменная растворимость в твердом состоянии делают в принципе возможной упрочняющую термическую обработку - закалку + старение. Однако эффект упрочнения при старении сплавов Mg-Al и Mg-Al- Zn невелик-не превышает 25-35%. Поэтому растворное упрочнение в сплавах Mg-Al-Zn играет основную роль. Заметное дисперсионное упрочнение сплавов при старении наблюдается лишь при содержании алюминия более 5-6 %, что и определяет нижний предел концентрации алюминия в сплавах Mg-Al-Zn. В сплавах МЛ5 и МЛ6 по границам зерна выделяется некоторое количество эвтектики с интерметаллидом  $\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$ , а цинк находится в твердом растворе. В сплаве МЛ4 с большим содержанием цинка образуется самостоятельная упрочняющая фаза  $\Gamma(\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Zn}_3)$ , которая совместно с  $\gamma$ -фазой выделяется по границам зерна (таблица 1.5).

Низкая температура плавления эвтектики в сочетании с концентрациями  $C_p < 13\%$  и  $C_z > 32\%$  приводят к образованию широкого температурного интервала кристаллизации в сплавах Mg-Al, Mg-Zn и Mg-Al- Zn ( $\Delta t_{\text{кр}} = 120-250$  °С). Это и определяет комплекс литейных свойств. Сплавы склонны к образованию значительной усадочной пористости, которая снижает механические свойства и герметичность отливок (для повышения герметичности производят пропитку отливок специальными составами.) Широкий температурный интервал кристаллизации  $\Delta t_{\text{кр}}$  приводит также к образованию горячих трещин и является причиной высокой склонности к дендритной ликвации. В промышленных условиях охлаждения отливок за счет сдвига неравновесного солидуса  $\Delta t_{\text{кр}}$  может расширяться до 250 °С. Линейная усадка сплавов лежит в пределах 1,1-1,4 %, усадочная раковина незначительна.

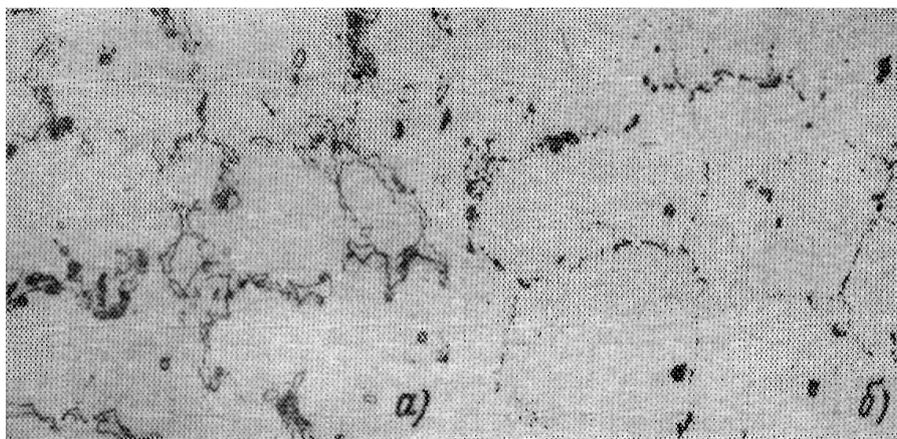
Таблица 1.5 - Литейные свойства магниевых сплавов

Свойства	Mg- Mn	Mg-Al - Zn			Mg -Zn -Zr		Mg-Nd -Zr		Mg - Th
	МЛ2	МЛ4	МЛ5	МЛ6	МЛ12	МЛ15	МЛ9	МЛ10	МЛ14
$\Delta t_{\text{кр}} = t_L - t_s$ , °С	10	155	115	120	75	75	95	95	-
Жидкотекучесть $l_{\text{ж}}$ , мм	300	235	290	335	280	320	250	250	230
Образование рыхлот (условные единицы)	0	5	2	3	3	2	1	1	1
Горячеломкость (условные единицы)	50	37	30	27	32	30	32	30	-

Жидкотекучесть сплавов заметно возрастает с увеличением содержания алюминия (сравните сплавы МЛ4, МЛ5, МЛ6). Но абсолютные значения  $l_{ж}$  у магниевых сплавов несколько ниже, чем у алюминиевых. Лучшими литейными свойствами из этой группы сплавов обладают МЛ5 и МЛ6 (выше жидкотекучесть, меньше склонность к образованию рыхлот и трещин). У сплава МЛ4 комплекс литейных свойств хуже; из-за значительной усадки (1,3-1,6 %) и пониженной жидкотекучести он мало пригоден для литья в кокиль. Его достоинством является высокая коррозионная стойкость. Для повышения этого показателя, а также улучшения пластичности ограничивают суммарное содержание примесей в сплавах МЛ4пч и МЛ5пч (в сумме не более 0,14 %).

При гомогенизации (420 °С, 12-24 ч) неравновесные выделения интерметаллидов растворяются, значительно повышается пластичность, а также прочность сплавов. Охлаждение на воздухе является для сплавов закалкой, так как фиксируется значительное пересыщение твердого раствора.

В литом состоянии сплавы хрупки из-за образования по границам зерна большого количества неравновесной эвтектики (рисунок 1.11).



а-литое состояние, неравновесные выделения интерметаллидов по границам дендритных ячеек твердого раствора; б-гомогенизированное состояние, однородный твердый раствор

Рисунок 1.11 - Микроструктуры магниевого литейного сплава МЛ5 (х200)

Максимальные прочностные свойства достигаются после дополнительного искусственного старения: МЛ4, МЛ5-при 175 °С 16 ч, а МЛ6-при 190 °С 4-8 ч. В литом состоянии  $\sigma_B \approx 150$  МПа,  $\delta > 1,0$  %, после термической обработки  $\sigma_B = 220-260$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 90-140$  МПа,  $\delta = 5-9$  %.

Сплавы применяют для нагруженных деталей двигателей и агрегатов, работающих при статических и динамических нагрузках, для корпусных деталей приборов, кронштейнов и т. п., эксплуатирующихся в условиях требований повышенной коррозионной стойкости (в морской атмосфере) при температурах не выше 150 °С.

Сплавы Mg-Zn-Zr-Me (МЛ8, МЛ12, МЛ15, МЛ17) содержат от 4 до 9 % Zn. Двойные сплавы Mg-Zn не применяют из-за очень плохих литейных свойств ( $\Delta t_{кр}$  может превышать 250-300 °С). Введение циркония сокращает  $\Delta t_{кр}$ , улучшает литейные свойства и измельчает зерно. Оптимальные результаты

достигаются при 0,6- 0,8 % Zr, что определяет его содержание в сплавах этой группы (0,7-1,1 %). Добавки кадмия целиком находятся в твердом растворе; лантан (в сплаве МЛ15) образует самостоятельную фазу  $\text{La}_2\text{Mg}_{17}$ . Эти добавки повышают прочность и улучшают технологические свойства сплавов.

По сравнению с предыдущей группой сплавы Mg- Zn-Zr-La обладают рядом преимуществ. Они более прочные, с хорошим отношением  $\sigma_T/\sigma_B$  и достаточно высокой пластичностью. Измельчение структуры при введении циркония обуславливает меньшую чувствительность сплавов к толщине сечения отливки, выравнивает механические свойства. Улучшены также жаропрочные свойства сплавов; особенно способствует этому добавка лантана (МЛ15). Рабочая температура сплавов МЛ12 и МЛ15 увеличивается до 200 °С (при кратковременной работе - до 300 °С). Механические свойства сплавов МЛ12 и МЛ15 при нормальной температуре:  $\sigma_B = 230-270$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 150-160$  МПа,  $\delta=4-6$  %. Сплавы обладают удовлетворительными литейными свойствами и более высокой, чем у МЛ5, коррозионной стойкостью. Сплав МЛ12 упрочняют закалкой от 400 °С и искусственным старением при 150 °С 50 ч, сплав МЛ15-старением при 300 °С 6 ч.

Сплав МЛ8 более легирован и имеет повышенные прочностные свойства при хорошей пластичности ( $\sigma_B = 300-340$  МПа,  $\delta =4-6$  %).

Сплавы Mg-Nd- Zr (МЛ9, МЛ10, МЛ19) содержат в твердом растворе небольшие добавки цинка и циркония. Концентрация основного легирующего элемента неодима (1,6-2,8 %) приближается к предельной растворимости  $C_p$ , поэтому сплавы упрочняются как по растворному типу, так и интерметаллидной фазой  $\text{Mg}_9\text{Nd}$ . Механические свойства при нормальной температуре невысоки ( $\sigma_B = 250$  МПа,  $\delta=5$  %), но хорошо сохраняются с повышением температуры. Сплавы с неодимом имеют хорошие технологические и литейные свойства, дают плотные отливки с однородными свойствами в тонких и толстых сечениях. Сплав МЛ10 отличается, кроме того, высокой герметичностью; он предназначен для изготовления высоконагруженных отливок, работающих при температуре до 250-300 °С; хорошо обрабатывается резанием, сваривается аргонодуговой сваркой.

Сплав Mg-РЗМ-Zr (МЛН) легируют мишметаллом (75 % Се, остальное РЗМ) в количестве 2,5-4,0 %, что значительно превышает концентрацию  $C_p$  и приводит к образованию интерметаллида  $\text{Mg}_{12}\text{Ce}$ . Сплав характеризуется пониженными механическими свойствами при нормальной температуре ( $\sigma_B = 160$  МПа,  $\delta=3$  %). Вследствие переменной растворимости в твердом состоянии при термической обработке сплав упрочняется дисперсными частицами интерметаллидов, равномерно распределенных в твердом растворе. Благодаря этому сплав МЛ11 является наиболее жаропрочным среди магниевых сплавов - он предназначен для деталей, длительное время эксплуатирующихся при температуре 250-350 °С (и кратковременно до 400 °С). Сплав может применяться также без термической обработки. Технологические и литейные свойства сплава аналогичны технологическим и литейным свойствам сплавов с неодимом, отливки обладают повышенной герметичностью.

Наиболее высокой жаропрочностью (рабочие температуры 300-400 °С) обладают сплавы с торием, в которых сочетается растворное и каркасное упрочнение. Элемент корпуса авиационного двигателя из магниевого сплава представлен на рисунке 1.12.

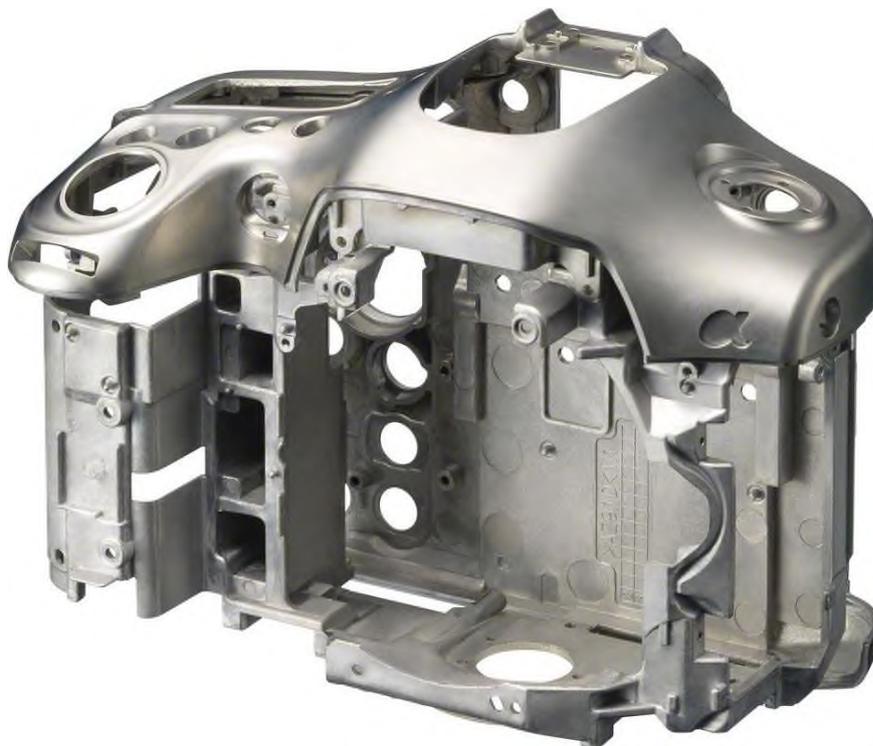


Рисунок 1.12 - Элемент корпуса авиационного двигателя из магниевого сплава

Модифицирование магниевых сплавов дает значительный эффект измельчения первичных выделений твердого раствора и включений интерметаллидов, что приводит к улучшению комплекса механических и особенно технологических свойств.

### **1.8 Титановые литейные сплавы**

Титан плавится при высокой температуре (1668 °С); скрытая теплота плавления (358 Дж/г) лишь немного ниже, чем у алюминия. Известны две аллотропические модификации титана: низкотемпературная  $\alpha$ -модификация имеет гексагональную плотноупакованную структуру; она устойчива до 882 °С. При более высокой температуре устойчива  $\beta$ -модификация со структурой ОЦК. В соответствии с этим титановые сплавы по структуре подразделяют на три основные группы: однофазные  $\alpha$ -сплавы, двухфазные  $\alpha + \beta$ -сплавы и однофазные  $\beta$ -сплавы. Титан и его сплавы обладают низкой теплопроводностью - в 13 раз ниже теплопроводности алюминия. Указанная характеристика оказывает влияние на литейные свойства сплавов. По плотности (4,5 г/см<sup>3</sup>) титан занимает промежуточное место между алюминием и железом, а по прочности титановые сплавы не уступают сталям. Это

позволяет получить у титановых сплавов очень высокую удельную прочность - наиболее ценное свойство для таких отраслей техники, как авиация и ракетостроение. В то же время модуль упругости титана (112 ГПа) почти в 2 раза ниже, чем модуль упругости железа, что затрудняет получение жестких конструкций.

Титан - химически активный металл, особенно при повышенных температурах. Но в, обычных условиях он обладает очень высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах и в морской воде. Это объясняется образованием на поверхности металла плотной защитной пленки из окисла  $TiO_2$ .

Титан и его сплавы имеют более высокую температуру плавления, чем сплавы на основе никеля или железа, но меньшую жаропрочность. Применение титановых сплавов наиболее целесообразно в интервале температур 250-550 °С, когда алюминиевые и магниевые сплавы уже не могут работать, а стали и никелевые сплавы уступают титановым по удельной прочности. Пример применения титана в строительной отрасли представлено на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 - Крепежные изделия, изготовленные из титана

К недостаткам титановых сплавов следует отнести плохие антифрикционные свойства и низкую обрабатываемость резанием. Кроме того, стоимость титановых сплавов существенно выше, чем стоимость алюминиевых, магниевых или медных сплавов. Диаграмма состояния Ti-Al представлена на рисунке 1.14.

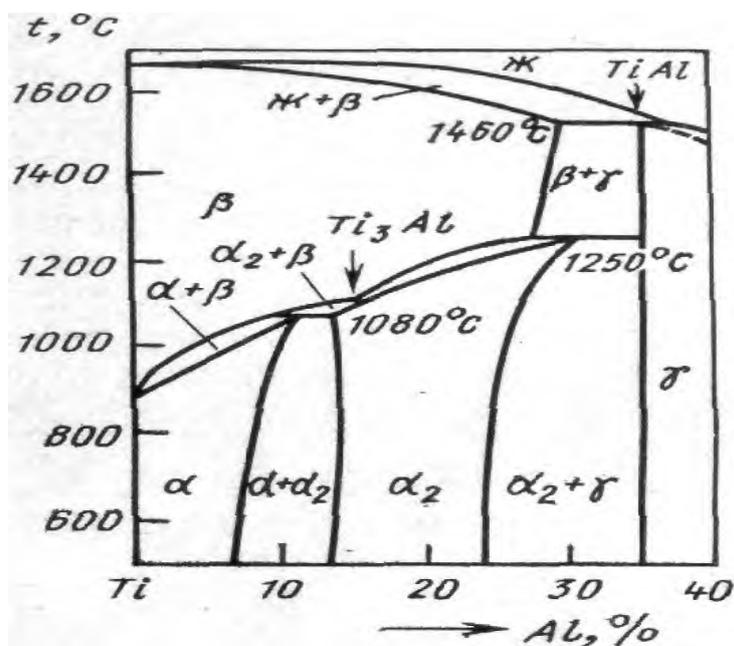


Рисунок 1.14 - Диаграмма состояния Ti-Al (по данным И. И. Корнилова)

Взаимодействие титана с легирующими элементами определяется их влиянием на температуру полиморфного превращения и стабильность  $\alpha$  и  $\beta$ -фаз. С этой точки зрения все элементы подразделяют на три группы.

1.  $\alpha$  - стабилизаторы - примеси внедрения N, O, C и основной легирующий элемент - Al.

2.  $\beta$  - стабилизаторы, которые, в свою очередь, подразделяют на изоморфные и эвтектоидообразующие. Изоморфные элементы (V, Nb, Mo, Ta) образуют неограниченные твердые растворы с  $\beta$ -фазой и расширяют область ее устойчивости до нормальной температуры (см. рис. 3.1, блок 8). Эвтектоидообразующие элементы (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Si) образуют с титаном диаграммы состояния по типу блока 9 на рисунке 1.13.

3. Нейтральные упрочнители образуют с титаном системы с неограниченной растворимостью (Zr, Hf) или ограниченными твердыми растворами (Sn, Ge); они мало влияют на устойчивость  $\beta$ -фазы.

Почти все промышленные сплавы титана содержат алюминий, поэтому система Ti-Al для разработки и изучения сплавов титана имеет такое же важное значение, как система Fe-C для сталей.

В системе Ti-Al ближайший к титану металлид  $Ti_3Al$  образуется при температуре 1250 °C по перитектоидной реакции  $\beta + \gamma \rightarrow \alpha_2$ , где  $\alpha_2$  - твердый раствор на основе  $Ti_3Al$ . При температуре 1080°C происходит еще одно превращение:  $\beta + \alpha_2 \rightarrow \alpha$ , где  $\alpha$  - твердый раствор алюминия в  $\alpha$ -Ti с предельной растворимостью 11,6%Al. С понижением температуры растворимость уменьшается до ~6 % при 550 °C и происходит выделение избыточных кристаллов интерметаллидной фазы  $\alpha_2$ , в результате пластичность сплавов резко падает. С целью сохранения пластических свойств содержание алюминия в титановых сплавах ограничивают 6-7%.

Добавки легирующих элементов повышают прочность титановых сплавов. Наиболее сильные упрочнители - эвтектоидообразующие элементы Cr,

Mn, Fe, Co и  $\alpha$ -стабилизатор - алюминий. Три процента каждой из этих добавок повышают прочность титана в литом состоянии от 400 до 600-800 МПа; пластичность при этом снижается с 28 до 12-6%. Изоморфные  $\beta$ -стабилизаторы (V, Nb, Mo) являются более слабыми упрочнителями, но и пластичность снижают в меньшей степени. Особую роль в титане и его сплавах играют примеси внедрения (C, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>). Они резко повышают прочность и твердость сплавов: каждая 0,01 % примеси внедрения в области малых концентраций повышает  $\sigma_b$  на 7-20 МПа. Одновременно резко снижается пластичность, которая при содержании примесей выше 0,5-0,7 % достигает нулевого значения, и возникает хрупкость. В связи с этим содержание примесей внедрения строго ограничивают: O<sub>2</sub><0,1-0,15%; C < 0,05-0,1 %; N < 0,04-0,15%. Наиболее опасны примеси водорода, образующего в  $\alpha$ -сплавах по плоскостям скольжения выделения пластинок гидридной фазы, в результате чего возникает водородная хрупкость. Содержание водорода ограничивают ~0,01 %.

Маркировка титановых сплавов производится буквами ВТ или ОТ и числом - условным номером, не имеющим отношения к химическому составу. У литейных сплавов в конце маркировки ставится буква Л.

Литейные свойства титановых сплавов определяются двумя основными особенностями: малым температурным интервалом кристаллизации и исключительно высокой реакционной способностью в расплавленном состоянии. Последнее обстоятельство очень сильно затрудняет производство фасонных титановых отливок и использование титановых отходов.

Таблица 1.6 - Химический состав и механические свойства титановых литейных сплавов

Марка сплава	Средний химический состав, %							Механические свойства, не менее		
	Al	Mo	V	Cr	Zr	Si	Сумма легирующих элементов	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$a_n$ , МДж/м <sup>2</sup>
ВТ1Л	-	-	-	-	-	-	-	350	10	0,4
ВТ5Л	5,0	-	-	-	-	-	5,0	700	6	0,3
ВТ6Л	6,0	-	4,0	-	-	-	10,0	850	5	0,25
ВТ3-1Л	6,0	2,5	-	2,0	-	0,3	10,8	980	5	0,25
ВТ9Л	6,3	3,3	-	-	1,4	0,3	11,3	930	4	0,20
ВТ14Л	5,3	3	1,5	-	-	-	9,8	900	5	0,25

Расплавленный титан быстро поглощает газы, содержащиеся в атмосфере, а также энергично взаимодействует со всеми известными огнеупорами и формовочными материалами (рисунок 1.15). В связи с этим плавка титановых сплавов ведется в вакууме, заливка может производиться в графитовые, корундовые и магнезитовые формы (графит более пассивен к расплаву титана, чем корунд или магнезит). В результате взаимодействия титана с материалом формы поверхностный слой отливок толщиной от 0,2 до

1,5 мм оказывается сильно загрязненным примесями внедрения - углеродом и кислородом. Твердость слоя резко повышается, а служебные характеристики отливок ухудшаются. Особенно опасен тонкий поверхностный «альфированный слой» (в виде светлой нетравящейся на микрошлифах полоски вдоль поверхности отливки). Он состоит из кислородных соединений титана и имеет нулевую пластичность. Высокая реакционная способность расплава титана увеличивает склонность к образованию газовой и газоусадочной пористости.

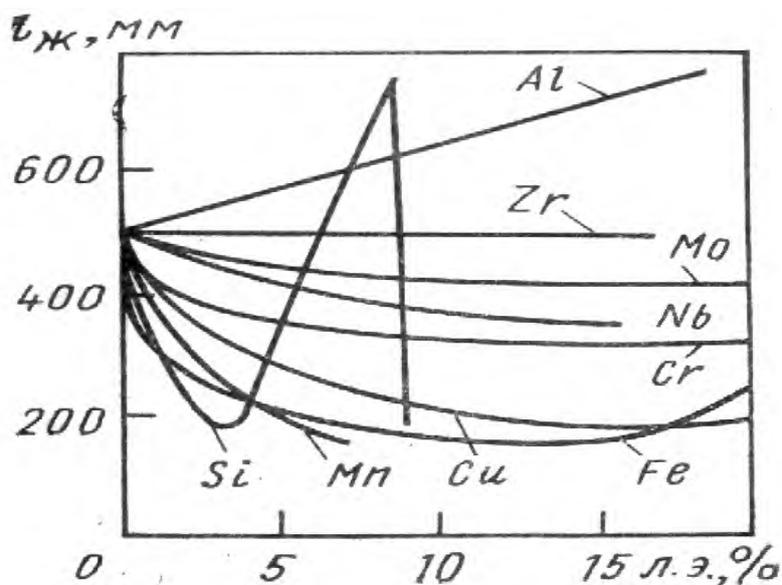


Рисунок 1.15 - Влияние легирующих элементов на жидкотекучесть титана (по данным О. Н. Магницкого)

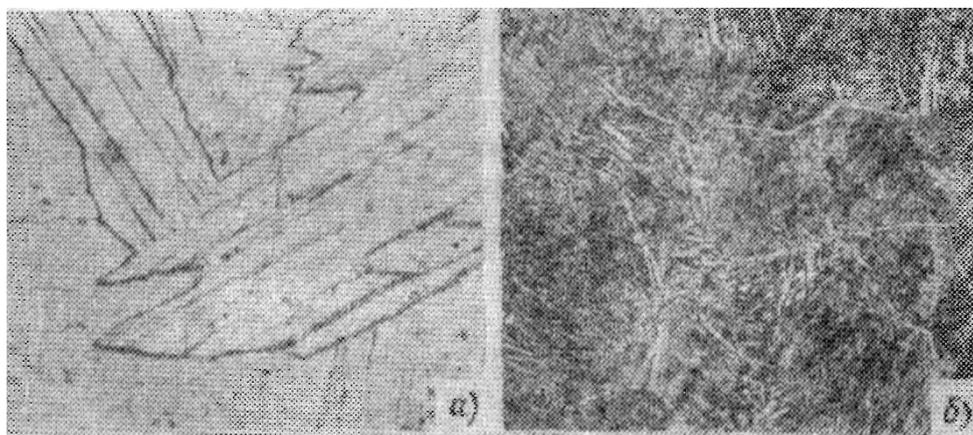
Температурный интервал кристаллизации титановых сплавов определяется базовой диаграммой состояния Ti-Al. Предельное понижение температуры плавления в первом блоке диаграммы состояния  $\Delta t_{пл} = 208 \text{ }^\circ\text{C}$ , но вследствие значительной растворимости  $C_p = 30 \%$  Al наклон солидуса невелик ( $\Delta t_{пл} / C_p \approx 7$ ), а предельный температурный интервал кристаллизации не превышает  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . В сплавах титана с 5-7% Al  $\Delta t_{кр} = 10-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , в многокомпонентных сплавах он расширяется до  $30-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Небольшое значение  $\Delta t_{кр}$  обеспечивает титановым сплавам хорошую жидкотекучесть и достаточно высокую плотность отливок. В большинстве случаев характерна дендритная форма первичных кристаллов с короткими осями. Малая теплопроводность сплавов и высокая теплопроводность графитовых форм в сочетании с узким температурным интервалом кристаллизации  $\Delta t_{кр}$  приводят к остановке потока расплава по типу «перемерзания». Это также способствует улучшению жидкотекучести и заполняемости форм. Однако свариваемость встречных потоков в узкоинтервальных сплавах понижена, поэтому титановые сплавы весьма склонны к образованию дефектов типа «спаи».

По данным О. Н. Магницкого, жидкотекучесть двойных титановых сплавов подчиняется общей закономерности: чем шире температурный

интервал кристаллизации  $\Delta t_{кр}$  тем хуже жидкотекучесть. Исключение составляют сплавы Ti-Al. При введении в титан 10 % Al теплота кристаллизации заметно увеличивается - от 330 до 440 Дж/г, поэтому, несмотря на некоторое расширение  $\Delta t_{кр}$ , жидкотекучесть с увеличением содержания алюминия монотонно возрастает.

В узкоинтервальных двойных титановых сплавах при  $\Delta t_{кр} < 50$  °C Пористость не превышает 0,3-0,7%. Линейная усадка лежит в пределах 1 - 1,5%. Добавки Si, Zn, Nb уменьшают усадку, а добавки Al, Mo, V - увеличивают. На объем усадочной раковины наиболее сильное влияние оказывает добавка кремния: 4 % Si снижают объем концентрированной раковины с 0,8 до 0,5%.

Модифицирование титановых сплавов не нашло промышленного применения из-за технологических сложностей и нестабильности результатов. Лабораторное опробование показало, что добавки РЗМ (La, Nd, Ce) в количестве 0,05-0,5 % заметно измельчают литую структуру (рисунок 1.16).



- а - однофазный  $\alpha$ -сплав ВТ5Л, пластинчатое строение  $\alpha$ -фазы (x340);  
б - двухфазный  $\alpha + \beta$ -сплав ВТ9Л, светлые выделения  $\alpha$ -фазы на фоне темной  $\beta$ -фазы (x120)

Рисунок 1.16 - Микроструктуры титановых сплавов в литом состоянии

Титановые литейные сплавы по структуре относятся к группе однофазных  $\alpha$ -сплавов (ВТ1Л, ВТ5Л) и двухфазных  $\alpha + \beta$ -сплавов (ВТ3-1Л; ВТ6Л, ВТ9Л, ВТ14Л). Как следует из табл. 6.6, по мере увеличения суммы легирующих добавок  $\sigma_B$  возрастает от 350 до 930-980 МПа. Основой однофазных сплавов является система Ti-Al, а двухфазных - Ti-Al-Mo-(Cr, V, Zn, Si).

Сплав ВТ5Л наиболее широко используется для фасонного литья. Он отличается хорошими литейными свойствами, простотой состава и недефицитностью легирующих добавок; не склонен к образованию горячих трещин, литейные дефекты хорошо завариваются аргоно-дуговой сваркой. В зависимости от габаритных размеров отливки, условий охлаждения и колебаний химического состава  $\sigma_B$  литого металла лежит в пределах 700-800 МПа при  $\delta = 6-13$  %.

Структура сплава представляет собой пластинчатые выделения  $\alpha$ -фазы внутри зерна исходной  $\beta$ -фазы. Вид структуры определяется тем, что в процессе охлаждения в сплаве при 880-1080 °С происходит полная фазовая перекристаллизация, и структура на основе  $\beta$ -фазы, сформировавшаяся при кристаллизации отливки, не сохраняется. Сплав ВТ5Л обычно применяется без термической обработки и используется для изготовления отливок, длительно работающих при температурах до 400 °С.

Сплав ВТ3-1Л наиболее прочный из литейных сплавов, но имеет более низкие литейные свойства и пластичность, чем сплав ВТ5Л. Микроструктура в литом состоянии представляет собой смесь фаз  $\alpha$  и  $\beta$ , дисперсность которых зависит от скорости кристаллизации отливки. Для стабилизации структуры отливки отжигают при 650 °С в течение 1-2 ч (отжиг является типичной термической обработкой для литейных титановых сплавов). Сплав ВТ3-1Л характеризуется термической стабильностью и жаропрочностью; отливки из сплава могут длительно работать при температуре до 450 °С. Прочность литого сплава ( $\sigma_b$  - 1050 МПа) приближается к прочности деформируемого сплава, но предел выносливости в литом состоянии на 30-40 % ниже, чем в деформированном. Это серьезный недостаток всех литейных титановых сплавов.

Сплав ВТ9Л обладает повышенной жаропрочностью и предназначен для работы при температурах 500-560 °С.

### **Контрольные вопросы**

- 1) Приведите общую характеристику алюминия и сплавов на его основе.
- 2) Назначение и область применения сплавов системы Al-Cu.
- 3) Назначение и область применения сплавов системы Al-Mg.
- 4) Назначение и область применения сплавов системы Al - Si- Me.
- 5) Приведите классификацию сплавов на основе магния.
- 6) Приведите классификацию сплавов на основе титана.

## 2 Медные литейные сплавы

### 2.1 Общая характеристика меди и ее взаимодействие с другими элементами

Медь - тяжелый цветной металл (плотность  $8,94 \text{ г/см}^3$ ), плавится при  $1083^\circ\text{C}$ , имеет кубическую гранецентрированную решетку (без полиморфных превращений). Скрытая теплота плавления меди ( $205 \text{ Дж/г}$ ) почти в 2 раза ниже, чем скрытая теплота плавления алюминия. Основная отличительная особенность физических свойств меди - чрезвычайно высокая электрическая проводимость и теплопроводность [ $387 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ]. Механические свойства меди зависят от ее чистоты и изменяются в пределах:  $\sigma_{\text{в}}=220\text{-}260 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{т}}=40\text{-}60 \text{ МПа}$ ,  $E= 125 \text{ ГПа}$  при  $\delta=40\text{-}45 \%$ . Таким образом, медь следует отнести к металлам со средней прочностью и высокой пластичностью. На рисунке 2.1 представлена медь, встречающаяся в естественном виде.



Рисунок 2.1 - Самородная медь в естественном виде

Медь и ее сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в воде, паровоздушной среде и в морских условиях.

В зависимости от чистоты медь маркируется буквой М и порядковыми номерами. Наиболее чистая медь М00 содержит  $0,01 \%$  примесей (в сумме); в меди М1, М2, М3 примеси составляют  $0,1$ ,  $0,3$  и  $0,5 \%$  соответственно. Хорошо растворимые в твердом состоянии примеси (Al, Ni, Fe, Zn, Cd, Sb) не ухудшают механических свойств меди и ее сплавов. Но примеси с малой растворимостью и большими значениями  $K_p$  и  $\Delta t_{\text{пл}}$  следует отнести к вредным, так как они либо выделяются в виде самостоятельных фаз либо образуют хрупкие эвтектические включения по границам зерен. Это в первую очередь относится к Bi ( $C_p = 3 \cdot 10^{-4} \%$ ,  $K_p = 3 \cdot 10^{-6}$ ), а также к S, Se, Te, O, N, для которых  $C_p < 0,01 \text{ ат } \%$  (хрупкая эвтектика Cu-Bi вызывает, хладноломкость, эвтектика Cu-Cu<sub>2</sub>O плавится при

1065 °С и вызывает горячеломкость сплавов). Все примеси сильно снижают электрическую проводимость меди.

Взаимодействие меди с легирующими элементами можно оценить по характеристикам диаграмм состояния (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Взаимодействие меди с легирующими элементами

Характеристики	Zn	Sr	Sb	Al	Ti	Fe	Si	Be	P
Тип диаграммы	ИС	ИС	Э	Э	Э	П	ИС	ИС	Э
состояния	32,5	13,5	11,0	7,5	7,4	4,0	5,3	2,7	1,75
$C_p$ , %	32,5	11,0	4,0	9,0	1,0	0,1	3,5	0,2	0,6
Растворимость при 350 °С, %	38,0	25,5	31,0	8,5	17,1	2,8	7,5	4,3	8,4
$C_3$ или $C_{п}$ , %	902	798	645	1037	870	1094	852	866	714
$t_3$ или $t_{п}$ , °С	181	285	438	46	217	- 11	231	217	369
$\Delta t_{пл} = (t_{Cu} - t_{эл})$ , °С	CuZn	Cu <sub>3</sub> Sn	Cu <sub>3</sub> Sb	Cu <sub>3</sub> Al	Cu <sub>3</sub> Ti	Нет	Cu <sub>31</sub> Si <sub>8</sub>	β-фаза	Cu <sub>3</sub> P
Химическое соединение									

Медь значительно лучший растворитель, чем алюминий или магний. Она образует непрерывные твердые растворы с пятью элементами: Ni, Pd, Pt, Au, Mn. Очевидно, что промышленное применение могут найти только два из них - никель и марганец. Никель повышает, а марганец понижает температуру плавления меди, образуя с ней узкоинтервальные сплавы.

По значениям  $C_p > (2-3)$  ат % и  $K_p > 0,05$  можно выделить большую группу элементов (более 20-25). Если исключить дорогостоящие или неудобные по другим причинам элементы (Rh, Ag, In, Ge, As и др.), то останется девять элементов. Они образуют с медью системы перитектического и эвтектического типа. Вне конкуренции находится цинк - недорогой металл, образующий с медью широкую область твердых растворов. Часто используются также сплавы системы Cu-Sn. Очень эффективна добавка алюминия: в системе Cu-Al большое значение  $C_p = 7,5$  % сочетается с малым  $\Delta t_{пл} = 46$  °С. У сплавов меди с титаном при том же значении  $C_p = 7,4$  %  $\Delta t_{пл}$  и  $\Delta t_{кр}$  значительно больше; кроме того, титан дороже алюминия и менее технологичен в расплаве. Кремний и фосфор уже в небольших концентрациях резко снижают температуру плавления меди. Эти элементы используют для улучшения жидкотекучести сплавов. Одновременно фосфор активно связывает примеси кислорода. Бериллий в литейных сплавах почти не используется. Таким образом, основными легирующими элементами являются Zn, Sn, Al, а также Ni и Mn. С медью они образуют системы с одной характерной особенностью: при понижении температуры растворимость в твердом состоянии не уменьшается. Следовательно, в двойных сплавах меди с указанными выше элементами дисперсионное упрочнение невозможно. Необходимая прочность достигается растворным упрочнением либо использованием фазовых превращений эвтектоидного типа.

Добавки Fe, Ti, V, Cr измельчают зерно, повышают прочность и жаропрочность, улучшают пластичность сплавов. Их вводят в количестве, не

превышающем  $C_p$ . Как правило, в медные сплавы вводят один основной легирующий элемент, определяющий комплекс механических и технологических свойств, и несколько вспомогательных элементов. На этом основана классификация медных сплавов: сплавы Cu-Zn называются латунями; сплавы Cu-Sn и Cu-(Al, Mn, Pb) - бронзами оловянными и безоловянными (алюминиевыми, марганцевыми, свинцовыми). Сплавы Si-Ni (мельхиор) используются почти исключительно в деформируемом варианте.

Механические и технологические свойства медных сплавов очень разнообразны и зависят от легирующего комплекса. Прочность сплавов лежит в пределах 150 - 600 МПа, пластичность  $\delta = 1-20\%$ . Сплавы меди отличаются хорошей коррозионной стойкостью, более высокой, чем коррозионная стойкость сплавов на основе железа, алюминия или магния.

Маркировка медных сплавов производится с помощью букв, обозначающих элемент, и цифр, указывающих среднее содержание этого элемента. Приняты обозначения элементов: О - олово, А - алюминий, Ц - цинк, Ф - фосфор, С - свинец, Ж - железо, Н - никель, К - кремний, Мц - марганец. Маркировка бронз начинается с букв Бр, а латуней - с буквы Л. Например: БрА10Ж4Н4Л обозначает бронзу состава: 10 % Al, 4 % Fe, 4 % Ni, Cu - остальное; ЛЦ38Мц2С2 обозначает латунь состава: 38 % Zn, 2 % Mn, 2 % Pb, Cu - остальное. Буква в конце маркировки ставится для отличия литейных сплавов от деформируемых, если их маркировка совпадает.

## 2.2 Литейные бронзы

Бронзами раньше называли только сплавы меди с оловом (рисунок 2.2). В настоящее время это название распространено на все сплавы на основе меди, кроме сплавов с цинком и никелем



Рисунок 2.2 - Бронзовые трубы

Оловянные бронзы базируются на системах Cu-Sn и Cu-Sn-Zn-(Pb) (рисунок 2.3). Они характеризуются широким температурным интервалом кристаллизации (при концентрации  $C_p$   $\Delta t_{кр} \sim 180\text{ }^\circ\text{C}$ ) и значительной раство-

римостью олова в твердом состоянии. В сочетании с  $K_p = 0,52$  это создает большую склонность к дендритной ликвации; в обычных условиях литья неравновесная  $\beta$ -фаза (твердый раствор на основе интерметаллида  $Cu_3Sn$ ) появляется в структуре при концентрациях более 7- 8 % Sn. При охлаждении  $\beta$ -фаза претерпевает эвтектоидный распад сначала при  $586^\circ C \beta \rightarrow a + \gamma$ , затем при  $520^\circ C \delta \rightarrow a + \delta$ . Третье превращение при  $350^\circ C$  обычно не протекает, и сплавы ведут себя так, как если бы растворимость олова в меди была постоянна и не изменялась с температурой.

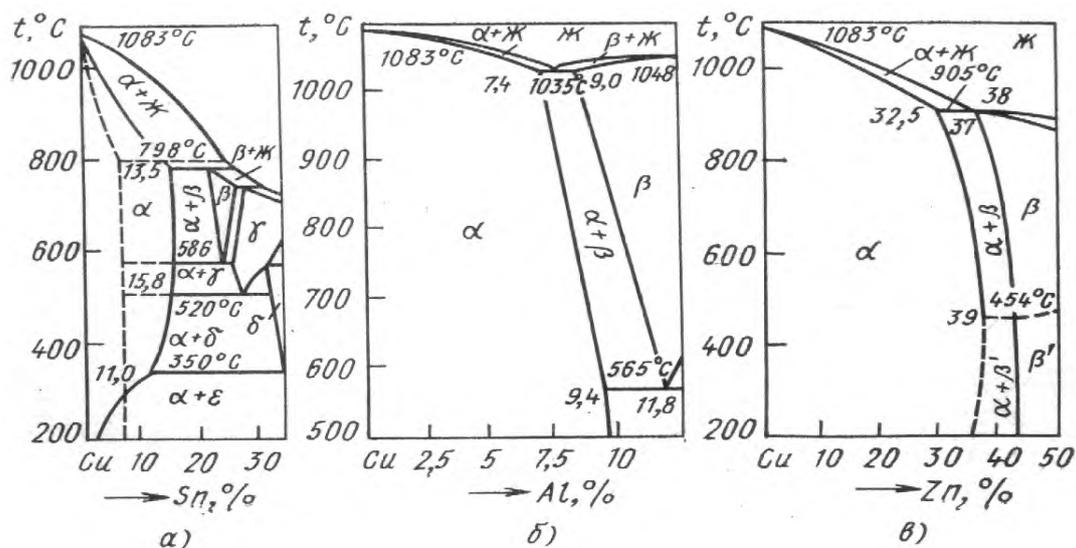
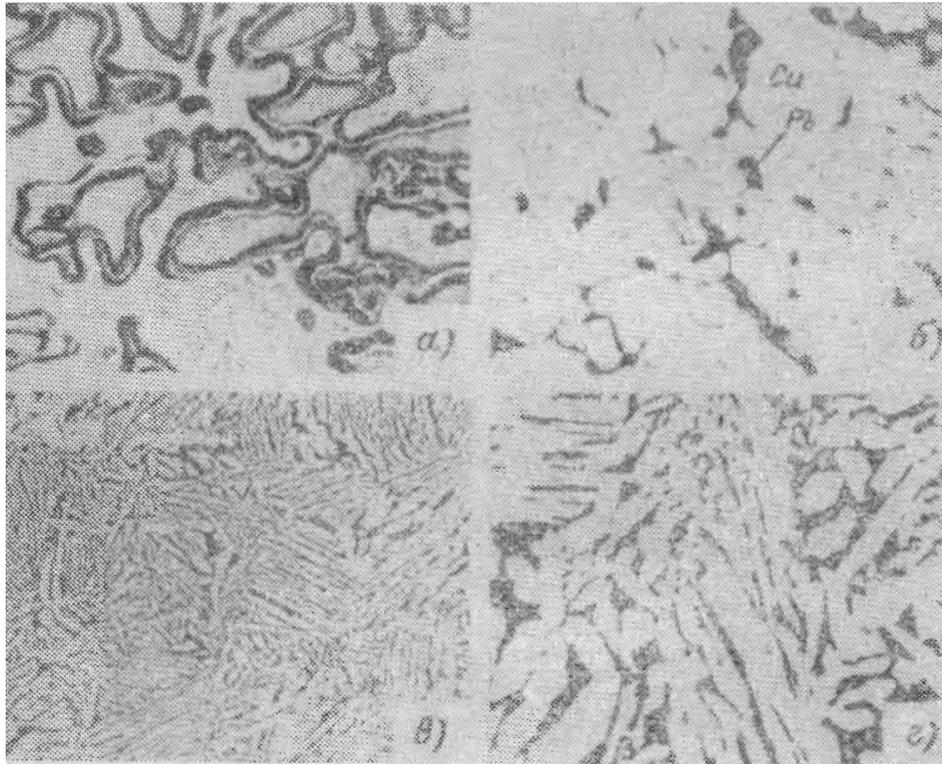


Рисунок 2.3 - Диаграммы состояния Cu-Sn (а), Cu-Al (б) и Cu-Zn (в)

Таким образом, структура бронз, содержащих  $<8\%$  Sn, представляет собой  $a$ -твердый раствор дендритного строения с неравномерным распределением компонентов вследствие дендритной ликвации (рисунок 2.4). Структура сплавов с концентрацией  $>8\%$  Sn состоит из  $a$ -фазы, эвтектоида  $a + \delta$  (светлые кристаллы  $\delta$ -фазы -  $Cu_3Sn_8$  с темными включениями  $a$ -фазы). Появление эвтектоида, содержащего твердую интерметаллидную фазу  $Cu_3Sn_8$ , вызывает возрастание твердости и прочности сплавов; максимум этих значений достигается при 20-25 % Sn. Пластичность сплавов с увеличением содержания олова сначала возрастает, достигая максимума при 5-7 % Sn, а затем быстро снижается до малых значений при 12- 15 % Sn. Это определяет пределы содержания олова в бронзах: в сплавах общего назначения верхний предел равен 6-10 % Sn, в высокопрочных бронзах - до 16-19 % Sn. (В действующий ГОСТ включены бронзы с содержанием олова не выше 10 %, что связано с необходимостью экономного легирования.) Нижний предел легирования (2-3 % Sn) определяется необходимостью получения минимального растворного упрочнения. Марки оловянных бронз и их свойства. Прочность и твердость бронз увеличиваются с возрастанием содержания упрочняющих элементов, причем олово является более сильным упрочнителем, чем цинк (сравните бронзы БрО10Ц2, БрО5Ц5С5 и др.). В бронзах, не

содержащих эвтектоид,  $\delta$  составляет 6-10 %, появление эвтектоида снижает  $\delta$  до 1-3 %.



а - бронза БрО6Ц6С6, дендриты твердого раствора и выделения эвтектоида  $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_5$  междуосных пространствах; (x250); б - свинцовая бронза БрС30, темные выделения свинца по границам зерен меди (x100); в - алюминиевая бронза БрА9Ж4: эвтектоид  $\alpha + \beta$ ; (x75); г - марганцовая латунь ЛЦ40Мц1,5, двухфазная структура  $\alpha + \beta$  (x250) по данным М. В. Мальцева

Рисунок 2.4 - Микроструктуры медных сплавов в литом состоянии

Из-за большого температурного интервала кристаллизации  $D_{4p}$  оловянные бронзы обладают умеренной жидкотекучестью. Кривые « $l_{ж} - \% \text{Sn}$ » в соответствии с общими закономерностями проходят через минимум вблизи концентрации 10-12 % Sn. В оловянных бронзах образуется значительная усадочная пористость и очень небольшая усадочная раковина. По этой причине при литье в песчаные формы бронза имеет малую линейную усадку -0,8 %, что позволяет получить четкое воспроизведение рельефа формы в сложных фасонных отливках при художественном литье, а также в отливках с резкими переходами от толстых сечений к тонким. Отливки в кокиль получаются более плотными, и линейная усадка возрастает до 1,4 %. В большинстве случаев горячеломкость отливок из оловянных бронз невелика и вызывается главным образом наружной коркой. Механические и литейные свойства бронз представлены в таблице 2.2.

Таблице 2.2 - Механические и литейные свойства бронз

Группа	Марка	Сумма упрочняющих легирующих элементов, %	Механические свойства, не менее			Литейные свойства	
			$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	$l_{ж}$ , см	$\epsilon_l$ , %
Оловянные и оловянно-цинковые	Бр08Ц4	12	196	10	75 75	54 40	1,5
	БрО10Ц2	12	225	10	90	45	1,5
	БрО10Ф1	11	245	3			1,3
Оловянно-цинково-свинцовые	БрО4Ц4С17	8	147	12	60 60	25 40	1,6
	БрО5Ц5С5	10	176	4	60	55	1,6
	БрО3Ц12С5	15	206	5			
Свинцовые и оловянно-свинцовые	БрС30	0	59	4	25 60	35 20	1,6
	Бр05С25	5	137	6	78	26	1,5
	БрО10С10	10	196	6			1,5
Алюминиевые	БрА9Мц2Л	11	392	20	80	50	2,0
	БрА10Мц2Л	12	490	12	100	60	2,2
	БрА10Ж3Мц2	15	490	12	120	70	1,9
	БрА10Ж4Н4Л	18	578	6	170	70	1,8
	БРА11Ж6Н6	23	578	2	250		
	БрА7Мц15Ж3Н2Ц2	29	607	18			

Примечание. В таблице указаны свойства сплавов по ГОСТ 613-79 и 493 - 79 при литье в кокиль. При литье в песчаные формы  $\sigma_b$  сплавов ниже: у оловянных бронз на 20 - 40 МПа, у алюминиевых на 40-100 МПа.

Чисто оловянные бронзы в настоящее время не применяют, в них вводят различные добавки, улучшающие механические, технологические и служебные характеристики.

Фосфор вводят в количестве 0,3-1 %. Он является интенсивным раскислителем медных сплавов и сильным упрочнителем как по растворному типу, так и вследствие образования химических соединений (сравните свойства бронз БрО10Ц2 и БрО10Ф1). Кроме того, фосфор, снижая температуру плавления сплава, улучшает его практическую жидкотекучесть. Поэтому высокофосфористые бронзы особенно пригодны для художественного литья. Выделения твердой фазы  $Cu_3P$  повышают износостойкость бронз и улучшают антифрикционные свойства.

Цинк является одной из основных добавок в оловянных бронзах; он вводится в количестве 2-12 % и благоприятно влияет на комплекс свойств. Кроме того, цинк позволяет экономить более дефицитное и дорогое олово. Цинк входит в твердый раствор и (при постоянном содержании олова) несколько повышает прочность и пластичность сплавов; в оловянно-свинцовых бронзах он также улучшает равномерность распределения свинца. При введении цинка возрастает коррозионная стойкость бронзы в морской воде. Частичная замена олова цинком заметно уменьшает  $\Delta t_{кр}$ . Это приводит к улучшению литейных свойств: повышается жидкотекучесть, возрастает плотность отливок, уменьшается склонность к обратной ликвации. Наиболее

удачное сочетание содержания олова и цинка: (5-6) % Sn- (5-6) % Zn (бронза БрО5Ц5С5).

Свинец может быть основным компонентом в свинцовых бронзах или вспомогательным - в оловянных бронзах (БрО10С10). Главное назначение свинца - улучшение антифрикционных свойств сплава. Свинец образует в структуре медных сплавов самостоятельные выделения мягкой металлической фазы, поэтому с увеличением содержания свинца прочность и твердость снижаются, улучшается обрабатываемость резанием. При оптимальных концентрациях свинец повышает жидкотекучесть сплавов, плотность и герметичность отливок. Оловянно-свинцовые бронзы являются одним из лучших антифрикционных материалов, так как олово обеспечивает достаточную прочность и износостойкость сплава, а свинец - хорошую обрабатываемость.

Никель измельчает макрозерно, способствует выравниванию свойств литого металла, повышает его пластичность и прочность, а также уменьшает ликвацию в оловянно-свинцовых бронзах.

Оловянные и оловянно-цинковые бронзы применяют для литья антифрикционных деталей, а также арматуры и деталей, работающих в пресной и морской воде, в паровоздушной атмосфере и в маслах в условиях повышенного давления (до 250 МПа). Бронзы с высоким содержанием свинца (БрО4Ц4С17, БрО5С25) используются исключительно как антифрикционный материал для литья вкладышей подшипников и других подобных деталей.

Свинцовая бронза (БрС30) из-за дефицитности олова приобретает большое распространение в промышленности. Она обеспечивает свинцовой бронзе хорошие антифрикционные свойства: небольшой коэффициент трения, хорошую обрабатываемость и в то же время способность выдерживать достаточно высокие нагрузки, в том числе ударные.

Свинцовые бронзы чрезвычайно склонны к гравитационной ликвации. Для обеспечения равномерного распределения свинца в структуре в процессе литья принимают специальные меры (диспергирование, ускоренное охлаждение) или вводят добавки никеля, образующие разветвленные дендриты. Свинцовые бронзы почти в 4 раза превосходят оловянные подшипниковые сплавы по теплопроводности; предельные рабочие температуры у свинцовых и оловянно-свинцовых бронз также выше.

Алюминиевые бронзы начали применять значительно позже оловянных - приблизительно с начала нашего века, но благодаря хорошему комплексу свойств и меньшей стоимости они постепенно вытесняют оловянные бронзы. Особенности строения и свойств алюминиевых бронз можно объяснить с помощью диаграммы состояния Cu-Al. Предельная растворимость алюминия в меди ( $C_p = 7,5\%$ ) несколько ниже, чем олова, следовательно, алюминий является более сильным упрочнителем твердого раствора (сравните свойства бронз БрО10Ц2 и БрА10Мц2Л). С понижением температуры растворимость увеличивается до 9,4% (уникальное явление!), поэтому дисперсионное упрочнение в чистых сплавах Cu-Al невозможно. Фаза  $\beta$  представляет собой твердый раствор на основе соединения  $Cu_3Al$ ; при 565 °C она претерпевает

эвтектоидный распад  $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$ ; фаза  $\gamma_2$  также является твердым раствором на основе интерметаллида. Появление ее в структуре приводит к повышению прочности, которая достигает максимума при  $\sim 11\%$  Al. Далее прочность падает из-за развития хрупкости, а твердость продолжает возрастать. Пластичность сплавов, содержащих до 8-9% Al (что соответствует растворимости при нормальной температуре), сохраняется на высоком уровне (рисунок 2.5). При большем содержании алюминия пластичность резко падает. Таким образом, оптимальное содержание алюминия соответствует 6-9%. Упрочнение сплавов осуществляется по растворному типу, а также в результате образования небольшого количества эвтектоида.

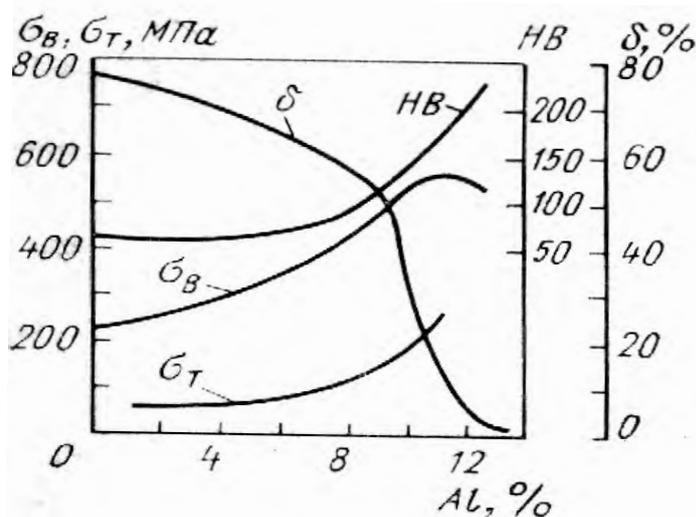


Рисунок 2.5 - Изменение механических свойств алюминиевых бронз в литом состоянии в зависимости от содержания алюминия (по данным Л. П. Смирягина)

В отличие от оловянных бронз сплавы Cu-Al являются узкоинтервальными ( $\Delta t_{пл}$  составляет всего  $46\text{ }^\circ\text{C}$ ). Значение  $K_p = 0,86$  близко к единице, но вследствие значительной растворимости и пологого расположения солидуса в сплавах происходит дендритная ликвация, и неравновесные выделения  $\gamma_2$ -фазы появляются уже при  $\sim 7-8\%$  Al. Узкий температурный интервал кристаллизации  $\Delta t_{кр}$  приводит к последовательному затвердеванию и образованию в отливках столбчатой структуры, в результате чего ухудшается пластичность. В связи с этим практически во всех алюминиевых бронзах содержится добавка железа (1-4%), измельчающая зерно и упрочняющая твердый раствор. Содержание железа не превышает предельной растворимости в двойных сплавах ( $C_p = 4,0\%$ ), но в тройных сплавах Cu-Al-Fe при этой концентрации выделяется самостоятельная железистая составляющая. Железо замедляет эвтектоидный распад  $\beta$ -фазы с образованием  $\gamma_2$ -фазы. Это особенно важно для крупногабаритных фасонных отливок, полученных литьем в песчаные формы, так как вследствие замедленного охлаждения происходит «самоотжиг», и  $\gamma_2$ -фаза в эвтектоиде выделяется в виде крупных пластин,

придающих сплаву хрупкость. Сплавы Cu-Al-Fe наиболее пластичны после нормализации при 600-700 °С или закалки от 950 °С.

Марганец хорошо растворим в алюминиевых бронзах, его вводят для повышения коррозионной стойкости и улучшения прочности и пластичности сплавов (сравните свойства бронз БрА7Мц15ЖЗН2Ц2 и БрА10ЖЗМц2).

Цинк несколько снижает технологические свойства и поэтому в алюминиевых бронзах применяется редко.

В сплавах Cu-Al принципиальное значение имеет добавка никеля, который образует фазы Ni<sub>3</sub>Al и NiAl с переменной растворимостью в твердом состоянии. В результате алюминиевая бронза с добавкой никеля становится способной к дисперсионному твердению. Например, в БрА10Ж4Н4Л после закалки от 980 °С и старения при 400 °С 2 ч НВ повышается от 170 до 400, а  $\sigma_b$  достигает 700 МПа. Бронза БрА10Ж4Н4Л сохраняет работоспособность до 400-500 °С.

Алюминиевые бронзы дают плотные отливки с концентрированной усадочной раковинной, линейная усадка их по сравнению с оловянными бронзами выше и достигает 2,2 %, склонность к дендритной ликвации значительно меньше, а жидкотекучесть выше. Алюминиевые бронзы имеют хорошую коррозионную и противокавитационную стойкость. К недостаткам этих сплавов, помимо высокой усадки, следует отнести склонность к образованию крупностолбчатой структуры. Для измельчения зерна кроме добавок железа используются также небольшие добавки бора (0,02 %), ниобия и ванадия. Они являются модификаторами I рода. Высокое содержание алюминия вызывает при перегреве повышенную окисляемость и загрязнение окисными пленками.

Алюминиевые бронзы применяют для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей с повышенными антифрикционными свойствами (червячные шестерни, втулки, вкладыши и т. п.) или деталей, работающих в условиях повышенной коррозии (детали химической промышленности и судостроения), а также для литья различной ответственной арматуры.

### 2.3 Литейные латуни

Латунями называются сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является цинк. Изделия из латуни представлены на рисунке 2.6. Латуни подразделяют по составу на двойные (простые) и специальные - содержащие добавки Fe, Mn, Ni, Si, Sn, Pb. Базовая диаграмма состояния имеет широкую область твердых растворов ( $C_p = 32,5 \%$ ), причем растворимость практически не изменяется с понижением температуры. При концентрации цинка более 38 % появляется  $\beta$ -фаза - твердый раствор на основе соединения CuZn. В соответствии с фазовым составом различают однофазную  $\alpha$ -латунь, двухфазную  $\alpha + \beta$ -латунь и  $\beta$ -латунь. Их свойства определяются свойствами фаз:  $\alpha$ -латунь - мягкая малопрочная, но высокопластичная;  $\beta$ -латунь - прочная, твердая, но хрупкая. По мере увеличения содержания меди  $\sigma_b$  возрастает от 200 до 300 МПа в однофазной области и до 450 МПа - в двухфазной.

Пластичность увеличивается от 30 до 50 % и проходит через максимум при ~30 % Zn, а затем (в двухфазной области) резко падает. Эти данные показывают, что свойства сплавов Cu-Zn и Cu-Al изменяются аналогично.



Рисунок 2.6 - Изделия из латуни

Сплавы Cu-Zn являются узкоинтервальными, предельный температурный интервал кристаллизации  $\Delta t_{кр}$  не превышает 50-60 °С. Этот факт в значительной мере определяет их литейные свойства. Близкое к единице значение  $K_p$  - 0,86 и более крутой, чем у сплавов Cu-Al, наклон солидуса делают латуни не склонными к дендритной ликвации.

Латуни имеют хорошую жидкотекучесть и дают плотные отливки с небольшой пористостью (главным образом в осевой части) и значительной сосредоточенной усадочной раковинной. В связи с этим линейная усадка латуней выше, чем линейная усадка оловянных бронз, и приблизительно на том же уровне, как линейная усадка алюминиевых бронз: 1,6-2 %. Узкий температурный интервал кристаллизации  $\Delta t_{кр}$  определяет также склонность к образованию столбчатой структуры и транскристаллизации.

Цинк, имея низкую температуру кипения и высокую упругость пара, частично испаряется в процессе плавки и оказывает раскисляющее воздействие на латуни. Это также способствует получению плотных отливок.

Комплексное легирование специальных латуней позволяет существенно улучшить их механические и технологические свойства. Алюминий повышает жидкотекучесть сплавов, прочность и коррозионную стойкость латуни. Марганец аналогично влияет на прочность и коррозионную стойкость латуни, но несколько снижает ее жидкотекучесть, Железо сильно измельчает структуру сплава, тормозит рост зерна и вследствие этого значительно улучшает механические свойства латуни, особенно при комплексном легировании совместно с другими элементами. Кремний равномерно повышает прочность сплавов при сохранении хорошей пластичности и существенно улучшает литейные свойства. В результате латунь ЛЦ16К4 по литейным свойствам

превосходит другие латуни, а также оловянные бронзы. Добавка свинца улучшает главным образом антифрикционные свойства латуней и их обрабатываемость резанием.

Таблица 2.3 - Механические и литейные свойства латуней

Латуни		Механические свойства, не менее			Литейные свойства	
Группа	Марка	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	$l_{ж}$ , см	$\epsilon_l$ , %
Свинцовые	ЛЦ40С	215 146	20	80	30	1,8
	ЛЦ25С2		8	60	-	-
Марганцовые и алюминиевые сложно- легированные	ЛЦ38Мц2С2	Л 441 490 392 705	10	85	40	2,1
	ЛЦ40Мц1,5		20	110	-	-
	ЛЦ40Мц3А		15	115	35	1,8 1,5
	ЛЦ40Мц3Ж		10	100	30	1,3
	ЛЦ30Л3		15	90	57	1,8
Кремнистые	ЛЦ23А6Ж3Мц2	343	7	165	47	-
	ЛЦ16К4		15	110	60	18

Примечание. Механические свойства указаны по ГОСТ 17711-80 для отливок в кокиль; при литье в песчаные формы  $\sigma_b$  на 20 -100 МПа ниже.

Механические свойства отливок сильно зависят от способа литья; лучший комплекс свойств получается при литье в кокиль. Латуни применяют для литья деталей под давлением (ЛЦ40Сд). Из латуней отливают арматуру и антифрикционные детали (вкладыши, втулки, сепараторы подшипников); сложные по конфигурации детали арматуры, работающей при температуре до 250 °С, а также в морской воде (ЛЦ16К4); ответственные несложные по конфигурации детали морского судостроения, работающие при температуре до 300 °С (ЛЦ40Мц3Ж); ответственные детали, работающие при высоких удельных и знакопеременных нагрузках (ЛЦ23 А6Ж3Мц2), а также много других изделий, где требуется повышенная коррозионная стойкость или хорошие антифрикционные свойства (ЛЦ38Мц2С2).

### Контрольные вопросы

- 1) Приведите общую характеристику меди и сплавов на его основе.
- 2) Перечислите маркировку медных сплавов.
- 3) Назовите общие характеристики и область применения литейных бронз.
- 4) Перечислите механические и литейные свойства бронз.
- 5) Назовите общие характеристики и область применения литейных латуней.
- 6) Перечислите механические и литейные свойства латуней

### 3 Цинковые литейные сплавы

Цинк - металл с высокой плотностью ( $7,13 \text{ г/см}^3$ ) и низкой температурой плавления ( $419^\circ\text{C}$ ) и кипения ( $907^\circ\text{C}$ ). Гексагональная плотноупакованная кристаллическая решетка приводит к анизотропии свойств и пониженной пластичности при нормальной температуре. Механические свойства цинка в литом состоянии:  $\sigma_{\text{в}} = 130 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{т}} = 7,5 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 0,5 \%$ , НВ 35. Цинк выпускают нескольких марок, отличающихся количеством примесей: от ЦВ00 с суммой примесей не более  $0,005 \%$  до ЦЗ с суммой примесей до  $2,5 \%$ . Основные примеси (Fe, Pb, Cu, Cd, Sn, Sb) оказывают заметное влияние на твердость металла и его коррозионную стойкость,

Цинковые сплавы широко применяют для литья под давлением различных деталей небольших габаритных размеров и невысокой прочности (рисунок 3.1). Они ограниченно используются также в качестве антифрикционных материалов. Основными легирующими элементами в этих сплавах являются Al, Cu и Mg. Сплавы маркируются буквой Ц и дополнительными буквами и цифрами, обозначающими содержание легирующих элементов. {имический состав сплавов не отличается разнообразием. Свойства сплавов изменяются в зависимости от способа литья и габаритных размеров отливки ( $\sigma_{\text{в}} = 250\text{-}450 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 0,5\text{-}8 \%$ ) (таблица 3.1).



Рисунок 3.1 - Различные виды сортового проката из цинковых сплавов

Сплав Zn-Al (ЦА4) содержит  $\sim 4 \%$  Al и по диаграмме состояния относится к доэвтектическим сплавам ( $C_3 = 5 \%$  Al) с узким температурным интервалом кристаллизации ( $\Delta t_{\text{кр}} \approx 10^\circ\text{C}$ ). Структура сплава состоит из первичных кристаллов твердого раствора и эвтектики - смеси двух твердых

растворов ( $\alpha + \beta$ ). Химические соединения в системе Zn-Al не образуются, а размерный фактор-незначителен, поэтому прочность сплава невелика. В условиях медленного охлаждения отливки при температуре 270 °С в  $\alpha$ -фазе происходит эвтектоидный распад  $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \beta$ . Если ускоренным охлаждением предотвратить распад твердого раствора при 270 °С, то процесс распада со значительно меньшей скоростью будет происходить при нормальной температуре; он получил название «естественное старение». В результате этого процесса изменяются свойства сплава и уменьшаются линейные размеры отливки на ~0,08 % (2/3 усадки происходит за 4-5 недель, остальная - за многие годы) Для стабилизации размеров производят термическую обработку - отжиг при 85-100 °С в течение 3-10 ч. Небольшие добавки магния (до 0,08 %) уменьшают скорость распада  $\alpha$ -фазы, а также повышают прочность сплава (магний находится в твердом растворе, так как в системе Zn-Mg  $C_p \approx 0,15$  % Mg).

Таблица 3.1 - Химический состав и свойства некоторых цинковых литейных сплавов

Группа сплавов	Марка сплава	Средний химический состав, %				Механические свойства		
		Al	Cu	Mg	Всего примесей не более	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
Для литья под давлением	ЦА4	4,0	-	0,04	0,14	290	6-8	80
	ЦАМ4-1	4,1	1,0	0,04	0,11	330	4-7	90
Антифрикционные сплавы (литье в кокиль)	ЦАМ9-1,5	9,5	1,5	0,04	0,35	300	2-6	80
	ЦАМ10-5	11	5,0	0,04	0,35	325	0,5-4	90

Сплавы Zn- Si (с 4-5 % Cu) не подвержены естественному старению и сохраняют высокую стабильность размеров во время эксплуатации. Однако они применяются редко из-за низких механических свойств:  $\sigma_b = 200$  МПа,  $\delta \approx 1\%$ .

Сплав Zn-Al- Cu (ЦАМ 4-1) имеет более высокую прочность ( $\sigma_b = 300$  МПа). Небольшая добавка меди (~1%) целиком находится в твердом растворе и не вызывает появления новых фаз ( $C_p = 2,7\%$  Cu). Термическая обработка сплава ЦАМ4-1 аналогична термической обработке сплава ЦА4. Тройные сплавы находят более широкое применение вследствие повышенных механических свойств.

Цинковые сплавы используются в автомобильной промышленности для литья небольших корпусных деталей (корпусов карбюраторов, насосов и т. д.); декоративных деталей и различных деталей в машинах бытового назначения. Сплавы нельзя использовать при повышенных и пониженных температурах, так как при 100 °С их прочность снижается на ~1/3, а при отрицательных температурах сплавы становятся хрупкими.

Антифрикционные сплавы содержат 9-12 % Al и 2-5 % Cu. В системе Zn-Al-Si тройная эвтектическая точка расположена при 7,1 % Al и 3,8% Cu, температура плавления тройной эвтектики 377 °С. Следовательно сплавы

являются узкоинтервальными ( $\Delta t_{кр} = 15-20^{\circ}\text{C}$ ), из них получают достаточно плотные отливки с линейной усадкой 1,0-1,2%. Сплавы склонны к образованию горячих трещин и большой зоны столбчатых кристаллов. Отливки можно получать различными способами - литьем под давлением, в кокиль, центробежным способом и в песчаные формы. Последний вариант применяется редко, так как приводит к сильному укрупнению зерна и возрастанию пористости.

Структура сплавов состоит из первичных кристаллов твердого раствора, двойной и тройной эвтектики. Из-за изменения растворимости алюминия и меди в цинке при понижении температуры в первичных кристаллах образуются дисперсные выделения избыточных фаз. Их количество, а также размер эвтектических выделений сильно уменьшаются с повышением скорости кристаллизации сплава (при литье в кокиль). В тройных сплавах магний (0,03-0,06 %) повышает прочность, тормозит процесс старения, а железо, свинец и кадмий являются вредными примесями, так как снижают пластичность сплавов.

Из антифрикционных сплавов отливают различные вкладыши, втулки, ползуны и биметаллические изделия.

В связи с невысокой коррозионной стойкостью на изделия из цинковых сплавов наносятся лакокрасочные или гальванические защитные покрытия.

### **Контрольные вопросы**

- 1) Приведите общую характеристику цинка и сплавов на его основе.
- 2) Приведите химический состав и свойства цинковых литейных сплавов
- 3) Назовите область применения сплавов на основе цинка.
- 4) Перечислите механические и литейные свойства сплавов на основе цинка.

## 4 Никелевые литейные сплавы

### 4.1 Общая характеристика никеля и его взаимодействие с другими элементами

Никель относится к тяжелым цветным металлам (плотность  $8,9 \text{ г/см}^3$ ) с высокой температурой плавления ( $1453 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Он имеет кубическую гранцентрированную решетку (без полиморфных превращений) и характеризуется достаточно высокими механическими свойствами:  $\sigma_{\text{в}} = 450 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{т}} = 220 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 35\text{-}45 \%$  (в литом состоянии  $\delta = 10\text{-}30 \%$ ), НВ 120,  $E = 205 \text{ ГПа}$ .

Никель обладает ферромагнитными свойствами, менее сильными, чем железо; точка Кюри лежит при  $358 \text{ }^\circ\text{C}$ . Никель отличается высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в пресной и морской воде, а также во многих пищевых и других органических средах.

Никелевые сплавы применяют как конструкционный коррозионно-стойкий материал, а также для различных электротехнических целей. Многие никелевые сплавы обладают уникальными физическими свойствами (магнитной индукцией, коэффициентом линейного расширения и т. п.). Но основная ценность никелевых сплавов для современного машиностроения заключается в их высокой жаропрочности. Общий вид никеля в кусковом виде и в виде чушек, представлен на рисунке 4.1.

Полуфабрикатный никель (ГОСТ 492-73) в зависимости от чистоты маркируется буквами и цифрами от НП1 до НП4 (сумма примесей от 0,1 до 1 % соответственно). Примеси Co, Fe, Si и Cu находятся в твердом растворе и не оказывают существенного влияния на свойства. Углерод в количестве до 0,1-0,3 % является хорошим раскислителем для никеля и его сплавов. Примеси Pb, Bi, As, Sb, O, P практически нерастворимы в никеле и вызывают хрупкость. Наиболее опасна примесь серы, которая образует с никелем легкоплавкую эвтектику Ni -Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> ( $t_3=644 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Эвтектика располагается по границам зерна и вызывает возникновение красноломкости. Вредное влияние серы нейтрализуется добавками Mg, Ca, Be.

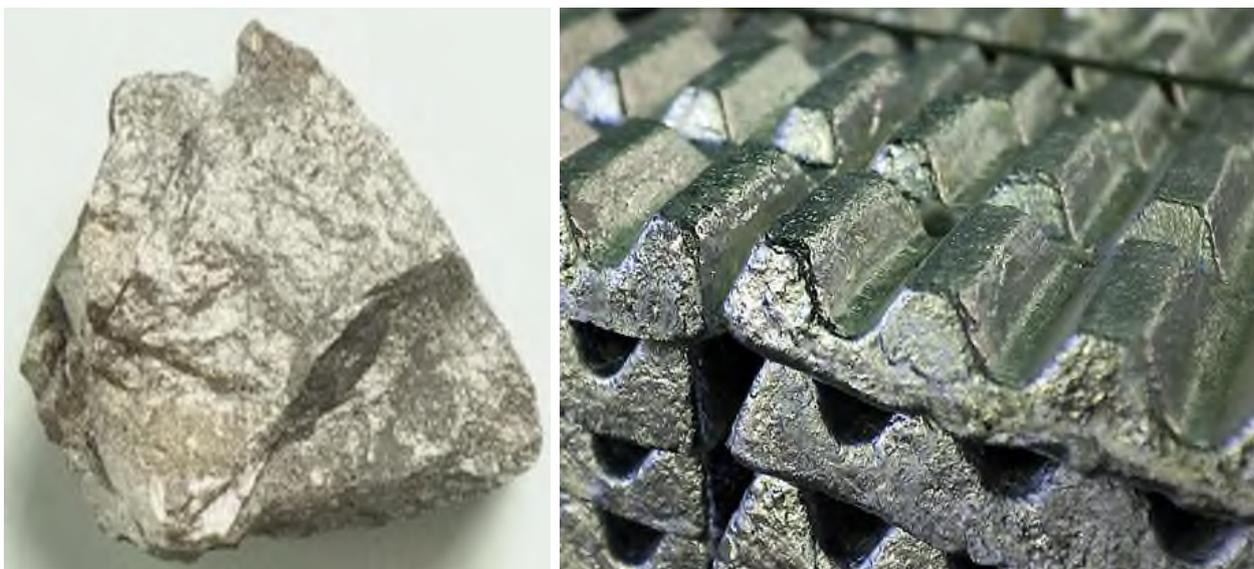


Рисунок 4.1 - Вид никеля в кусковом виде (слева) и в виде чушек (справа)

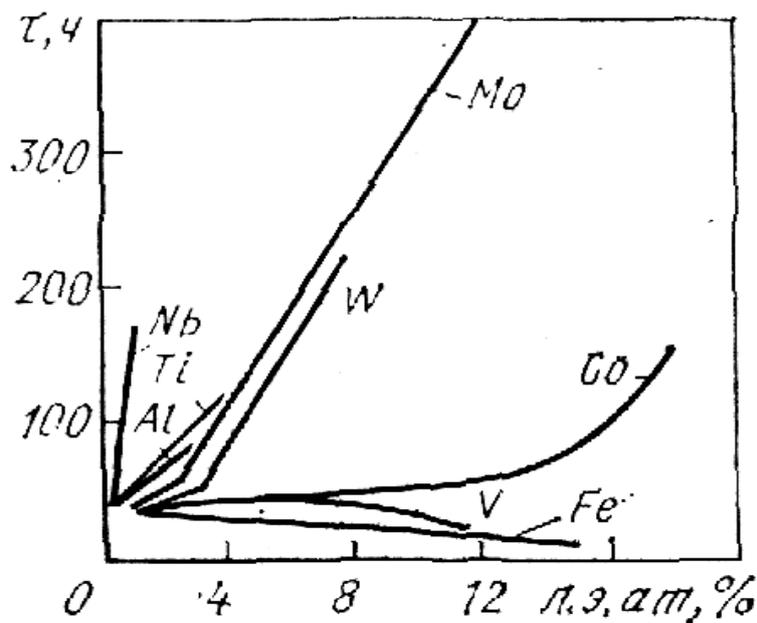
Взаимодействие никеля с легирующими элементами в значительной мере определяется его положением в периодической системе как переходного металла (рисунок 4.2 и рисунок 4.3). Никель образует непрерывные твердые растворы с промышленно важными металлами: Cu, Mn, Co, Fe и некоторыми дорогостоящими металлами. Первые три из перечисленных металлов используются в качестве основных легирующих элементов, а железо в большинстве случаев рассматривается как нейтральная примесь. Растворное упрочнение в системах с неограниченными твердыми растворами не дает значительного повышения прочности, но позволяет в широком диапазоне изменять физические свойства сплавов.

С большинством практически важных переходных металлов никель образует эвтектическое равновесие со значительной растворимостью в твердом состоянии. Образование металлидных фаз и уменьшение растворимости с понижением температуры создают предпосылки для эффективного растворного и дисперсионного упрочнения.

Наиболее эффективны в этом отношении следующие элементы: Ti, Cr, Nb, Mo, Ta, W, которые применяются в качестве основных и вспомогательных легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Взаимодействие никеля с некоторыми переходными металлами

Характеристики	Ti	V	Cr	Zr	Nb	Mo	Hf	Ta	W
$C_p$ , % по массе	12,5	39,6	47,0	~0,9	20,5	37,5	1,0	36,0	45,0
$C_3$ , % по массе	16,2	47,5	51,0	16,0	23,5	45,0	28,0	37,0	40,0
$t_3$ , °C	1304	1203	1345	1170	1285	1345	1200	1360	1500
$\Delta t_{пл} = (t_{Ni} - t_{эл})?$ °C	149	250	108	283	168	208	253	93	-47
$\Delta t_{пл} / C_p$ , °C	12	6,3	2,3	300	8,2	5,5	-250	2,6	-
Химическое соединение	Ni <sub>3</sub> Ti	Ni <sub>3</sub> V	Нет	Ni <sub>6</sub> Zr	Ni <sub>3</sub> Nb	Ni <sub>4</sub> Mo	Ni <sub>6</sub> Hf	Ni <sub>3</sub> Ta	Ni <sub>4</sub> W



$\tau$  - время до разрушения при температуре 800 °С и напряжении 200 МПа  
(по данным М. В. Приданцева)

Рисунок 4.2 - Влияние легирующих элементов на жаропрочность сплава Ni+20% Cr

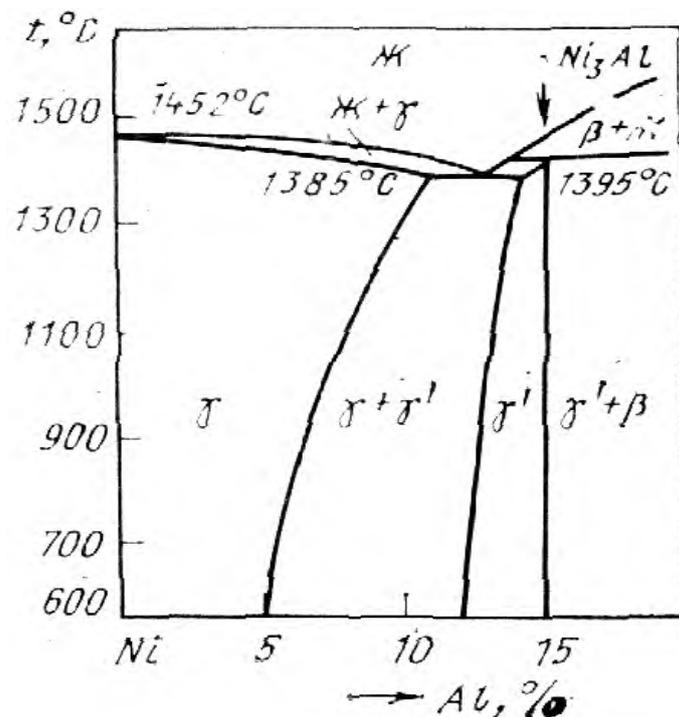


Рисунок 4.3 - Диаграмма состояния Ni-Al

При введении этих элементов в сплав в количестве не более 8-10 % они незначительно понижают температуру плавления, что очень важно для сохранения жаропрочности. Два других элемента Zn и Hf по указанной причине вводятся в жаропрочные сплавы только в виде небольших добавок.

Сплавы никеля с переходными металлами являются узко- и среднеинтервальными. Они обладают хорошими литейными свойствами, но

склонны к дендритной ликвации. Разность предельной растворимости  $C_p$  и растворимости при 600-700 °С указывает, что наибольший эффект при дисперсионном упрочнении должны давать добавки Ti, Nb и Ta. Из них вне конкуренции оказывается титан как более дешевый и легкий элемент, обеспечивающий, кроме того, более эффективное растворное упрочнение. Элементы W, Mo и Cr используются только для растворного упрочнения. Металлиды, образуемые переходными металлами с никелем, как правило, обладают высокой температурой плавления и стабильностью; они являются хорошими упрочнителями. Влияние легирующих элементов на жаропрочность никеля.

Особое внимание обращает на себя алюминий, который словно специально предназначен для легирования никелевых жаропрочных сплавов (таблица 2.6): он обладает значительной растворимостью в твердом никеле, уменьшающейся с понижением температуры, и, следовательно, обеспечивает комплексное растворнодисперсионное упрочнение; высокая температура плавления эвтектики 1385°С и устойчивый интерметаллид  $Ni_3Al(\gamma')$  с температурой плавления 1395°С дополняют ценные для жаропрочных сплавов свойства. Сплавы Ni-Al являются узкоинтервальными и имеют хорошие литейные свойства.

Добавки бора в количестве 0,01-0,3 % вводятся для измельчения структуры и улучшения технологических свойств, так как бориды никеля являются устойчивыми соединениями. Углерод в никелевых жаропрочных сплавах практически полностью связан в карбиды сильными карбидообразующими элементами (Ti, Mo, W). Карбиды и карбонитриды создают дополнительное упрочнение, поэтому в некоторых жаропрочных сплавах углерод рассматривается как необходимая добавка и вводится в количестве 0,1-0,2%.

Таблица 2.6 - Средний химический состав никелевых коррозионно-стойких сплавов, %

Марка сплава	C	Si	Mn	Cu	Fe	Mo	Sn
Монель (НМЖМц28-2,5-1,5)	<0,2		1,5	28	2,5	-	-
Кремнистый монель	<0,12	4,2	1,0	30	3,0	-	-
Высоконикелевая бронза	-	3,0	-	~40	-	-	6
Хастеллой D	-	11					
Хастеллой	0,16	1,0	1,7	-	20	19	-

\* Основа Ni.

Примеси серы и фосфора являются вредными, так как образуют легкоплавкие хрупкие эвтектики. Кислород также недопустим из-за образования окисных плен и недостаточной устойчивости NiO. К вредным примесям следует отнести галлий и свинец, которые с никелем, образуют расслоения в жидком состоянии.

Маркировка никелевых сплавов выполняется различными способами. По ГОСТ 2176-77 она аналогична маркировке легированных сталей. Обозначение сплава начинается с буквы Х (хром), затем идет буква Н (никель) и цифра, показывающая среднее содержание никеля, после чего следуют буквы (без цифр), указывающие легирующие элементы (например, ХН78Т). По ГОСТ 492-73 сплавы маркируют буквами, обозначающими элементы, и числами, показывающими содержание этих элементов; используется также (особенно для жаростойких и жаропрочных сплавов), способ маркировки, не связанный с химическим составом: сплавы обозначаются буквами ЭИ или ЭП и числом - условным номером сплава, например, ЭИ-435 (после внесения в ГОСТ условное обозначение заменяют на марку, отражающую примерный состав сплава); применяются также нестандартные обозначения буквами и числами (ЖС6, ВЖ-36).

## 4.2 Никелевые литейные сплавы

Коррозионно-стойкие сплавы используются в химическом машиностроении. К ним относятся сплавы систем Ni-Cu, Ni-Mo, Ni-Si и Ni-Fe. Химический состав литейных и деформируемых сплавов отличается незначительно - в основном содержанием примесей.

Сплав Ni-Cu (НМЖМц28-2,5-1,5) получил название «монель». Он обладает высокими коррозионными свойствами во многих агрессивных средах и применяется в нефтяной промышленности, химическом машиностроении и судостроении. Сплав обладает умеренной прочностью и хорошей пластичностью ( $\sigma_b = 450$  МПа,  $\delta = 20$  %).

Добавка в сплав 3-4 % Si (кремнистый монель) снижает температуру плавления до 1270-1290 °С и улучшает литейные свойства сплава; повышается  $\sigma_b$  до 700 МПа, а твердость до НВ 330; отливки становятся хрупкими ( $\delta \approx 0,5$  %), но обладают высокой износостойкостью.

Сплавы Ni-Cu-Sn (высоконикелевые бронзы) характеризуются очень хорошими антифрикционными свойствами, стабильно сохраняющимися при повышенных температурах (до 400-450 °С) в атмосфере водяного пара.

Сплавы Ni-Si, содержащие до 12% Si (хастеллой D), обладают высокой кислотостойкостью и применяются в химической промышленности. Отливки имеют повышенную твердость (НВ 450) и износостойкость. Температура плавления сплавов составляет  $\sim 1120$ °С, линейная усадка 1,9 %.

Жаростойкие сплавы, как правило, имеют двухкомпонентную основу Ni + Cr. Сплав никеля с 15-20 % Cr получил название «нихром». Хром полностью находится в твердом растворе. Вследствие малого различия атомных объемов никеля и хрома растворное упрочнение незначительно, поэтому нихром обладает невысокой прочностью ( $\sigma_b = 500$  МПа) и достаточно хорошей пластичностью ( $\delta = 5-15$  %). Основное достоинство нихрома - высокая жаростойкость. Она обусловлена образованием плотного окисного слоя  $Cr_2O_3$  с хорошими защитными свойствами. Добавки алюминия и кремния улучшают окислостойкость и одновременно повышают прочностные свойства. Нихром

является узкоинтервальным сплавом  $t_{пл} \approx 1400^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{кр} \approx 20-30^\circ\text{C}$ , дает плотные отливки с линейной усадкой 1,9-2 %, склонен к ликвации. Применяется для получения отливок жаростойкой арматуры и печного оборудования. Нихром используется также для нагревательных элементов, так как обладает повышенным электросопротивлением.

Жаропрочные сплавы составляют особую, очень важную для современного машиностроения группу никелевых сплавов (таблица 4.2). Основной характеристикой жаропрочности является длительная прочность - напряжение, вызывающее разрушение образца при заданной температуре не ранее указанного ресурса времени.

Нихром имеет невысокую жаропрочность, но хорошую окислительную стойкость, что позволяет использовать его в качестве основы практически всех жаропрочных никелевых сплавов. Для дисперсионного упрочнения основы Ni-Cr вводятся добавки алюминия и титана.

Таблица 4.2 - Средний химический состав никелевых жаростойких и жаропрочных сплавов, %

Сплав	C	Cr	Co	Ti	Al	W	Mo	B
Нихром (X20H80)	<0,15	21,5	-	-	-	-	-	-
ХН78Т (ЭИ-435)	<0,12	21,5	-	0,25	<0,15	-	-	-
ВЖ36-Л2	<0,06	20,5	-	2,5	3,7	-	-	До 0,3
ЖС3	0,13	16	-	1,9	1,9	5,5	3,7	0,01
ЖС6	0,15	12	-	2,6	5,0	7,0	4,7	0,01
ЖС6К	0,16	11,5	4,5	2,7	5,5	5,0	4,0	0,02

\* Основа Ni.

Растворимость алюминия в никеле уменьшается с 11 % при эвтектической температуре до ~6 % Al при  $750^\circ\text{C}$ . Твердый раствор аустенитного типа (с решеткой ГЦК), обозначенный буквой  $\gamma$ , находится в равновесии с твердым раствором на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , который также имеет решетку ГЦК и обозначен буквой  $\gamma'$ . Аналогичный вид имеет начальный участок диаграммы состояния Ni-Ti, где упрочняющей фазой является фаза  $\eta$ -интерметаллид  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  (таблица 4.3). В тройной системе образуется интерметаллид  $\gamma' \text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ .

Дисперсионное упрочнение сплавов достигается путем типовой термической обработки; высокотемпературной закалки (от  $1150-1230^\circ\text{C}$ ), которая переводит в твердый раствор интерметаллидные фазы, и последующего искусственного старения при температуре, близкой к рабочей ( $800-950^\circ\text{C}$ ), приводящего к выделению дисперсных частиц  $\gamma'$ -фазы. Эта фаза достаточно пластична, поэтому образование ее даже в большом количестве (30-50 %) не вызывает охрупчивания сплава.

Таблица 4.3 - Состав и свойства жаропрочных никелевых сплавов

Состав и свойства сплава	ХН78Т	ВЖ36-Л2	ЖС3	ЖС6	ЖС6К	ЖС6У
$\Sigma(\text{Al} + \text{Ti}), \%$	0,5	6,7	4,5	8,0	9,0	9,0
$\Sigma(\text{Mo} + \text{W}), \%$	-	-	11,0	13,5	10,0	13,4
$\Sigma_{100}, \text{МПа}:$						
при 800 °С	45	270	320	500	530	560
при 900 °С	15	120	350	280	320	340

Жаропрочные никелевые сплавы помимо Cr, Al, Ti могут содержать еще шесть-восемь легирующих элементов.

Наибольший эффект дает комплексное легирование, чем сложнее состав твердого раствора и металлidных фаз, тем выше жаропрочность сплава. Разрушение металла при повышенных температурах начинается с границ зерна. Для их упрочнения вводят микродобавки бора, и циркония. Даже сотые доли процента этих элементов при введении в сплав значительно увеличивают длительную прочность.

Наиболее высокой жаропрочностью обладают литейные сплавы типа ЖС, полученные на основе изложенных выше принципов растворно-дисперсионного упрочнения. Микроструктура представляет собой матричный твердый раствор (Mo, W, Ti, Al в основе Ni-Cr) и выделения  $\gamma'$ -фазы, количество которой зависит главным образом от содержания Al и Ti и может достигать 30-60 % по объему. В структуре содержится также некоторое количество карбидов и боридов. Легко проследить, что существует тенденция к увеличению суммы легирующих элементов при переходе от первого сплава этой серии - ЖС3 к более современным - ЖС6 и ЖС6К. При этом возрастают жаропрочные свойства сплавов. Суммарное содержание алюминия и титана влияет на жаропрочность более эффективно, чем суммарное содержание молибдена и вольфрама.

Сплав ЖС6К предназначен для изготовления деталей, работающих при температуре 850-1050 °С (лопатки газовых турбин) (рисунок 4.4 и 4.5). Термическая обработка заключается в закалке от 1220 °С и старении при 950 °С в течение 2 часов. Сплав ЖС6У отличается повышенным содержанием вольфрама (9-11 %) и пониженным содержанием молибдена (1,2-2,4 %). Он используется для получения изделий методом направленной кристаллизации. Столбчатые дендритные кристаллы ориентируют вдоль направления действия наибольшего напряжения. В этом случае длительная прочность ( $\tau = 100$  ч) при 1100 °С на 20- 30 МПа выше, чем длительная прочность сплава ЖС6У с равноосной структурой. Наиболее предпочтительно ориентировать кристаллографическое направление  $\langle 111 \rangle$  вдоль оси лопатки. Сплав может применяться в литом состоянии без термической обработки. К недостаткам сплава следует отнести пониженную пластичность (3-4 %).

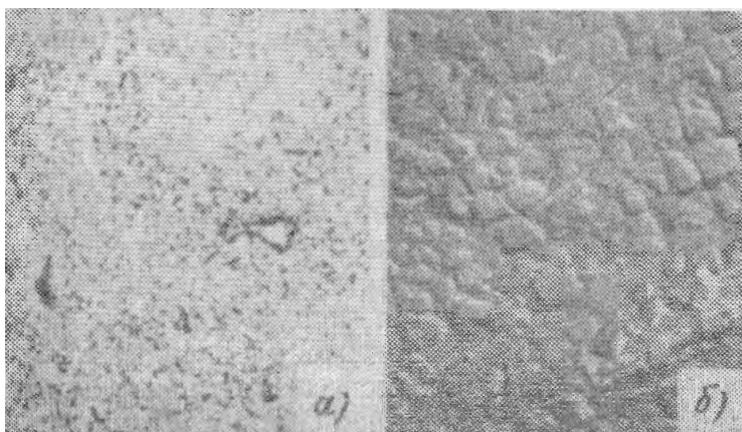
Высокое содержание быстроокисляющихся элементов (Al и Ti) в сплавах типа ЖС приводит к необходимости проводить плавку в вакууме. В

большинстве случаев литье производится в подогретые керамические формы, изготовленные по выплавляемым моделям.



Рисунок 4.4 - Турбинные лопатки из никелевых сплавов

Сплавы типа ЖС обладают удовлетворительными литейными свойствами: линейная усадка составляет 2-2,5 %.



а - высоколегированный твердый раствор на основе никеля с дисперсными включениями интерметаллидных упрочняющих фаз и карбидами (светлые выделения, x200); б - включения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в твердом растворе; (x10 000 электронный микроскоп)

Рисунок 4.5 - Микроструктура никелевого жаропрочного сплава ЖС6К в литом состоянии

Сплав ВЖ36-Л2 имеет повышенную окалиностойкость, что обеспечивается увеличением содержания хрома до 20 % и отсутствием молибдена и вольфрама, образующих нестойкие окислы. Но жаропрочность этого сплава ниже, чем жаропрочность сплава ЖС6. Сплав ВЖ36-Л2 предназначен для отливки направляющих лопаток газовых турбин, работающих при температуре до 900°C.

## **Контрольные вопросы**

- 1) Приведите общую характеристику цинка и сплавов на его основе.
- 2) Приведите химический состав и свойства цинковых литейных сплавов
- 3) Назовите область применения сплавов на основе цинка.
- 4) Перечислите механические и литейные свойства сплавов на основе цинка.

## Рекомендуемая литература

1. Энциклопедический словарь по металлургии: Справочное издание. В 2-х т. Т. 1: А-О/ Н.П. Лякишев и др.- М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. -412 с.
2. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. /В.М. Воздвиженский, В.А. Грачев, В.В. Спасский.-М.: Машиностроение, 1984. - 432 с.
3. Литейное производство: Учебник/Михайлов А.М., Бауман Б.В., Благов Б.Н. и др. /Под ред. А.М. Михайлова. - М.: Машиностроение. 1987. - 255 с.
4. Материаловедение и технология материалов:Учебник/ Жадан В.Т., Полухин П.И., Нестеров А.Ф. и др.- М.: Металлургия, 1994. - 623 с.
5. Адашкин А.В., Зуев В.М. Материаловедение. - М.: Академия, 2009. - 288 с.
6. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов. Конспект лекций. - Красноярск 2007. - 263 с.
7. Богодухов С.И., Козин Е.С. Материаловедение машиностроения. - М.: Академия.- 2015. - 504 с.
8. Свойства элементов: справочник/ Пикунов М.В. М.: Металлургия, 1982. - 352 с.
9. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. - М.: Металлургия, 1981. - 414 с.

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ  
ШЕВЧЕНКО ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
**РАЗДЕЛ: ЛИТЕЙНЫЕ ЦВЕТНЫЕ СПЛАВЫ**

Учебное пособие  
для бакалавров по направлению подготовки  
22.03.02 «Металлургия»,  
всех форм обучения

Подписано в печать 23.11.2017 г.		
Формат 60x90 <sub>1/16</sub> Рег.№ 102	Печать цифровая Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 3,625

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.