

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Материаловедение и технология материалов»**

**С. В. ЩЕРБАКОВ, А. А. РОГАЧЕВ, М. А. ЯРМОЛЕНКО**

# **ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

**Учебно-методическое пособие**

**Гомель 2009**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра «Материаловедение и технология материалов»**

**С. В. ЩЕРБАКОВ, А. А. РОГАЧЕВ, М. А. ЯРМОЛЕНКО**

# **ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

**Учебно-методическое пособие**

*Одобрено методической комиссией механического факультета*

**Гомель 2009**

УДК 669.2/8 (075.8)  
ББК 34.23  
Щ61

Рецензент – д-р техн. наук, профессор **А. С. Неверов** (УО «БелГУТ»).

**Щербаков, С. В.**

Щ61 Цветные металлы и сплавы : учеб.-метод. пособие / С.В. Щербаков, А.А. Рогачев, М.А. Ярмоленко ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 86 с.  
ISBN 978-985-468-584-7

Излагается теоретический материал по курсу «Материаловедение».  
Предназначено для студентов механических специальностей. Может быть рекомендовано для студентов физических специальностей.

УДК 669.2/8 (075.8)  
ББК 34.23

ISBN 978-985-468-584-7

© Щербаков С.В., Рогачев А.А., Ярмоленко М.А., 2009.  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	4
<b>1 Алюминий и сплавы на его основе</b> .....	4
1.1 Термическая обработка алюминиевых сплавов .....	7
1.2 Классификация алюминиевых сплавов .....	10
1.2.1 Деформируемые алюминиевые сплавы .....	10
1.2.2 Литейные алюминиевые сплавы .....	15
1.2.3 Высокопрочные алюминиевые сплавы .....	19
1.2.4 Жаропрочные алюминиевые сплавы .....	20
1.2.5 Спеченные сплавы .....	21
<b>2 Медь и сплавы на ее основе</b> .....	24
2.1 Классификация медных сплавов .....	25
2.1.1 Латунь .....	26
2.1.2 Оловянные бронзы .....	30
2.1.3 Деформируемые оловянные бронзы .....	32
2.1.4 Литейные оловянные бронзы .....	33
2.1.5 Алюминиевые бронзы .....	33
2.1.6 Бериллиевые бронзы .....	36
2.1.7 Кремнистые бронзы .....	38
2.1.8 Свинцовые бронзы .....	39
2.1.9 Марганцевые бронзы .....	40
2.1.10 Медно-никелевые сплавы .....	40
<b>3 Цинк, свинец, олово</b> .....	44
3.1 Цинк и его сплавы .....	44
3.2 Свинец .....	47
3.3 Олово .....	48
3.4 Баббиты .....	50
3.4.1 Оловянные баббиты .....	51
3.4.2 Свинцово-оловянные баббиты .....	52
3.4.3 Щелочно-земельные баббиты .....	53
3.4.4 Алюминиевые баббиты .....	54
3.5 Подшипниковые сплавы на основе цинка .....	55
3.6 Припой .....	56
<b>4 Магний и сплавы на его основе</b> .....	62
4.1 Магниевого сплавы .....	63
4.2 Термическая обработка магниевых сплавов .....	65
4.3 Литейные магниевые сплавы .....	66
4.4 Деформируемые магниевые сплавы .....	67
<b>5 Титан и сплавы на его основе</b> .....	69
5.1 Термическая обработка титановых сплавов .....	72
<b>Список литературы</b> .....	75
<b>Приложение А</b> Условные обозначения основных элементов в марках металлов и сплавов .....	77
<b>Приложение Б</b> Условные обозначения марок сталей и сплавов .....	78
<b>Приложение В</b> Химический состав цветных сплавов .....	80

ISBN 978-985-468-584-7

© Щербаков С.В., Рогачев А.А., Ярмоленко М.А., 2009.  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Цветные металлы и сплавы на их основе находят широкое применение в машиностроении вследствие комплекса специфических свойств, которыми они отличаются от черных металлов. Например, алюминий и сплавы на его основе отличаются высокими значениями удельной прочности (отношением временного сопротивления к произведению плотности на ускорение свободного падения), электро- и теплопроводности. Медь и медные сплавы наряду с высокими значениями с электро- и теплопроводности имеют высокие значения пластичности и коррозионной стойкости. Титан и сплавы на его основе отличаются уникальной коррозионной стойкостью.

Выбор материалов для деталей машин определяется эксплуатационными, технологическими и экономическими требованиями. Несмотря на сравнительно высокую стоимость (по сравнению с черными металлами) преимущество цветных металлов по эксплуатационным и технологическим характеристикам не вызывает сомнения.

Цель пособия – ознакомить студентов со структурно-фазовыми особенностями цветных металлов и сплавов, видами термической обработки таких материалов, дать представление об области применения представленных систем.

### 1 АЛЮМИНИЙ И СПЛАВЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

**Алюминий (Al)** – элемент III группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева, порядковый номер 13, атомная масса 26,9815.

Алюминий – металл серебристо-белого цвета. Он не имеет аллотропных превращений и кристаллизуется в решетке гранцентрированного куба с периодом  $a = 4,041 \text{ \AA}$ . Кристаллическая решетка устойчива при температуре от 4 К до температуры плавления.

Температура плавления алюминия чувствительна к чистоте металла и для высокочистого алюминия (99,996 %) составляет 660,3 °С, температура начала кристаллизации считается равной 660,37 °С и используется для калибровки термопар.

Теоретическая плотность алюминия, рассчитанная по параметрам его кристаллической решетки, – 2698,72 кг/м<sup>3</sup>. Экспериментальные значения для поликристаллического материала находятся в интервале 2696,6–2698,8 кг/м<sup>3</sup>, для монокристаллов – на 0,34 % выше.

Электрическое сопротивление алюминия высокой чистоты (99,99 %) при температуре 20 °С составляет  $2,6548 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . В интервале температур 273–300 К температурная зависимость электрического сопротивления чистого алюминия практически линейна при постоянном коэффициенте  $1,15 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{К}^{-1}$ . Влияние различных примесей на электрическое сопротивление зависит не только от концентрации данной примеси, но и от ее нахождения в твердом растворе или вне его. Наиболее сильно повышают сопротивление алюминия примеси хрома, лития, марганца, магния, титана, ванадия. В зависимости от чистоты электрическая проводимость технического алюминия составляет 62–65 % от электрической проводимости меди, но алюминий легче меди (в 3,3 раза) и поэтому для изготовления проводников одинаковой электрической проводимости требуется алюминия в 2,16 раза меньше, чем меди. При температуре  $1,175 \pm 0,001 \text{ К}$  алюминий переходит в сверхпроводящее состояние. Удельное электрическое сопротивление алюминия при переходе из твердого состояния в жидкое состояние изменяется скачкообразно с 11 до 24 мкОм·см.

Коэффициент термического расширения  $\alpha$  отожженного алюминия чистотой 99,99 % при температуре 293 К составляет  $23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  и практически линейно возрастает до  $37,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  (900 К).

С увеличением содержания примесей прочностные свойства алюминия растут, а пластичность уменьшается, причем эти свойства проявляются даже при изменении чистоты алюминия от 99,5 до 99,00 %. Механические свойства отожженного алюминия высокой чистоты:  $\sigma_{\text{в}} = 50 \text{ МПа}$  (предел прочности на растяжение),  $\sigma_{0,2} = 15 \text{ МПа}$  (условный предел текучести),  $\delta = 50 \%$  (относительная деформация), а технического алюминия:  $\sigma_{\text{в}} = 80 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 30 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 35 \%$ . Модуль нормальной упругости 71 ГПа. Холодная пластическая деформация повышает предел прочности технического алюминия до 150 МПа, но относительное удлинение снижается до 6 %. Алюминий легко обрабатывается давлением, но обработка резанием затруднена, сваривается всеми видами сварки.

Алюминий является химически активным элементом. Нормальный электродный потенциал алюминия равен «–» 1,67 В. Алюминий легко окисляется на воздухе, образуя на поверхности плотную пленку окисла  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\approx 20 \text{ мкм}$ ), предохраняющую его от дальнейшего окисления и коррозии в атмосферных условиях, воде и других средах. Металл стоек в концентрированной азотной кислоте и некоторых органических кислотах (лимонной, винной, уксусной и др.),

а также в контакте с пищевыми продуктами, в связи с чем применяется в быту. Алюминий растворяется в серной, соляной, плавиковой кислотах, а также в щелочах. Наличие в металле или в окружающей среде Hg, Na, Mg, Ca, Si, Cu и некоторых других элементов способствует снижению прочности и защитных свойств оксидной пленки.

Алюминий эффективно используется для восстановления других металлов из оксидов (алюминотермия) в связи с высоким значением теплоты образования  $Al_2O_3$  (1670 кДж/моль). С серой металл взаимодействует при нагревании и образует сульфид алюминия  $Al_2S_3$ . Хлорид ( $AlCl_3$ ) и фторид алюминия ( $AlF_3$ ) образуются при взаимодействии с соответствующими элементами с выделением значительного количества тепла (680 и 1385 кДж/моль соответственно). При нагревании данных соединений в присутствии алюминия протекают реакции образования субхлорида ( $AlCl$ ) и субфторида ( $AlF$ ) алюминия. При охлаждении субсоединения разлагаются на галогенид и алюминий. Алюминий взаимодействует с азотом при нагревании выше 800 °С с образованием нитрида алюминия ( $AlN$ ), а также с углеродом с образованием карбида алюминия  $Al_4C_3$  (1200 °С). Металл химически не взаимодействует с водородом, но газ в значительных количествах растворим в жидком и в твердом алюминии.

Постоянными примесями алюминия являются Fe, Si, Cu, Zn, Ti. Примеси Fe и Si относятся к нормальным, так как по условиям производства они получают в алюминии столь же постоянно, как в железе его нормальные примеси. Железо практически нерастворимо в алюминии, обычно наблюдается в нем в виде эвтектики или темных пластинок соединения  $FeAl_3$ . В больших количествах (свыше 1 %) эта примесь вредна, так как понижает пластичность металла. Si дает с Al твердый раствор с максимальным пределом насыщения 1,85 % Si (рисунок 1), снижающимся до сотых долей процента при нормальной температуре. Кремний как примесь не всегда может быть заметен под микроскопом, вступая в твердый раствор с алюминием ( $\alpha$ ). В сплавах алюминия Si часто является легирующим элементом.

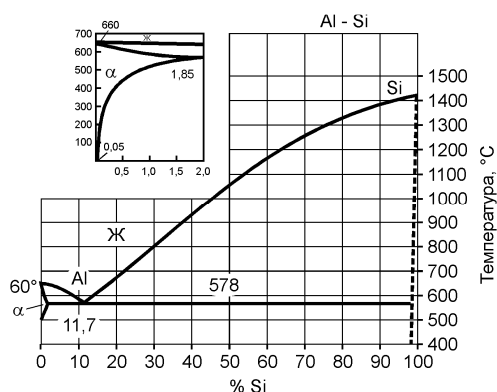


Рисунок 1 – Система Al – Si: диаграмма состояний и начальная область диаграммы

В зависимости от чистоты различают алюминий особой чистоты: А999 (99,999 % Al); высокой чистоты: А995 (99,995 % Al), А99

(99,99 % Al), А97 (99,99 % Al), А95 (99,95 % Al), и технической чистоты: А85, А8, А7, А6, А5, А0 (99,0 % Al).

### 1.1 Термическая обработка алюминиевых сплавов

**Закалка.** Закалка заключается в нагреве сплавов до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в алюминии, выдержке при этой температуре и быстром охлаждении до комнатной температуры для получения пересыщенного твердого раствора. Время выдержки при температуре закалки должно обеспечить растворение интерметаллидных фаз и определяется структурным состоянием сплава, типом печи и толщиной изделия. (Выдержка заготовок в виде листов, плит, прутков, полос толщиной 0,5–150 мм в селитровых ваннах – 10–80 мин, в электропечах с принудительной циркуляцией воздуха – 30–210 мин. Выдержка фасонных отливок более длительная (2–15 ч)). Охлаждение деформированных сплавов при закалке производят в холодной воде, а фасонных отливок – в подогретой воде (50–100 °С) во избежание их коробления и образования трещин.

**Старение.** После закалки следует старение, при котором сплав выдерживают при нормальной температуре несколько суток (естественное старение) или в течение 10–24 ч при повышенной температуре (искусственное старение). В процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, что приводит к упрочнению сплава. Распад пересыщенного твердого раствора происходит в несколько стадий в зависимости от температуры и продолжительности старения.

Процессы, протекающие в алюминиевых сплавах при закалке и последующем старении, удобно рассмотреть на примере сплава системы Al–Cu. При естественном (при 20 °С) или низкотемпературном искусственном старении (ниже 100–150 °С) не происходит распад твердого раствора с выделением избыточной фазы. При этих температурах атомы меди перемещаются только внутри кристаллической решетки  $\alpha$ -твердого раствора на малые расстояния и собираются по плоскостям (100) в двумерные пластинчатые образования, получившие название – **зоны Гинье-Престона (ГП-1)** (рисунок 2). Эти зоны протяженностью в несколько десятков ангстрем (30–60 Å) и толщиной 5–10 Å более или менее равномерно распределены в пределах каждого кристалла. Концентрация меди в зонах ГП-1 меньше, чем в  $CuAl_2$  (54 %).

Упрочнение полностью снимается при кратковременном (несколько секунд или минут) нагреве до 230–270 °С с последующим быстрым охлаждением (**возврат**).

Разупрочнение при **возврате** связано с растворением зон ГП-1 в твердом

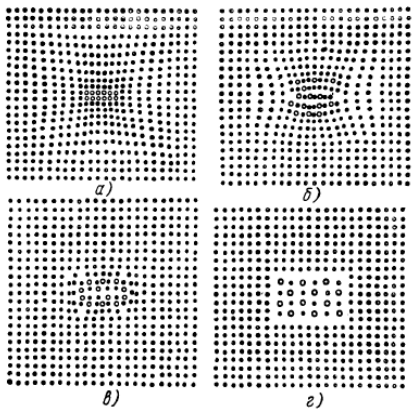


Рисунок 2 – Схема выделения избыточных фаз из твердого раствора при старении:

*a* – зоны ГП1; *б* – зоны ГП2;  
*в* –  $\Theta'$ -фаза; *г* –  $\Theta$ -фаза ( $\text{CuAl}_2$ )

зон ГП-2 большей величины (толщина 10–40 Å и диаметр 200–300 Å) с упорядоченной структурой, отличной от  $\alpha$ -твердого раствора. Концентрация меди в них соответствует содержанию ее в  $\text{CuAl}_2$ . С повышением температуры старения процессы диффузии, а, следовательно, и процессы структурных превращений протекают быстрее. Выдержка в течение нескольких часов при 150–200 °С приводит к образованию в местах, где располагались зоны ГП-2, дисперсных (тонкопластинчатых) частиц промежуточной  $\Theta'$ -фазы, не отличающейся по химическому составу от стабильной фазы  $\Theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ), но имеющей отличную кристаллическую решетку.  $\Theta'$ -фаза когерентно связана с твердым раствором. Повышение температуры до 200–250 °С приводит к коагуляции метастабильной фазы и к образованию стабильной  $\Theta$ -фазы.

Таким образом, естественное старение сводится к образованию лишь зон ГП-1. Искусственное старение сопровождается рядом последовательных превращений: ГП-1 → ГП-2 →  $\Theta'$  →  $\Theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ).

После зонного старения (образование ГП-1 и ГП-2) сплавы чаще имеют повышенный предел текучести и относительно невысокое отношение  $\sigma_{0,2} / \sigma_b \leq 0,6 \dots 0,7$ , повышенную пластичность, хорошую коррозионную стойкость и низкую чувствительность к хрупкому разрушению.

После фазового старения ( $\Theta'$  и  $\Theta$  фаз) отношение  $\sigma_{0,2} / \sigma_b$  повышается до 0,9–0,95, а пластичность, вязкость, сопротивление хрупкому разрушению и

растворе с последующим более или менее равномерным распределением атомов меди в пределах объема каждого кристалла твердого раствора, как и после закалки.

В дальнейшем вновь произойдет образование зон ГП-1 и упрочнение сплава (в условиях комнатной температуры). Следует иметь в виду, что возврат с последующим старением приводят к снижению коррозионных свойств сплава, что затрудняет использование возврата для практических целей.

Длительная выдержка при 100 °С или несколько часов при 150 °С приводит к образованию

коррозии под напряжением снижаются.

Величина упрочнения при закалке и старении зависит от природы фаз упрочнителя, размеров их частиц, количества распределения. Наибольшее упрочнение сплавов достигается благодаря интерметаллидным фазам ( $\text{MgZn}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ), имеющим сложную структуру и состав, отличный от  $\alpha$ -твердого раствора (чем сложнее кристаллическая решетка фазы – упрочнителя, тем больше отличается ее состав от основного твердого раствора, тем сильнее упрочнение).

**Гомогенизационный отжиг.** Гомогенизационный отжиг заключается в нагреве сплава до температур 450–520 °С, выдержкой от 4 до 40 ч. Последующее охлаждение проводится на воздухе или вместе с печью. Назначение: устранение дендритной ликвации, приводящей к получению неоднородного твердого раствора и выделению по границам зерен и между ветвями дендритов хрупких неравновесных эвтектических включений  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (*S-фаза*),  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2\text{Zn}_2$  (*T-фаза*) и др. Отжигу подвергают слитки перед обработкой давлением. В процессе отжига состав кристаллитов твердого раствора выравнивается, а интерметаллиды растворяются. При последующем охлаждении интерметаллиды выделяются в виде равномерно распределенных мелких вторичных включений, что способствует повышению пластичности литого сплава. Гомогенизационный отжиг способствует получению мелкозернистой структуры в отожженных листах и уменьшает склонность к коррозии под напряжением.

**Рекристаллизационный отжиг.** Отжиг заключается в нагреве деформированного сплава до температур от 350–500 °С (выше температуры окончания первичной рекристаллизации), выдержке 0,5–2,0 ч. Применяется для снятия наклепа и получения мелкого зерна. Скорость охлаждения после рекристаллизационного отжига для сплавов, не упрочняемых термической обработкой, выбирают произвольно. Для сплавов, упрочняемых термической обработкой, скорость охлаждения до 200–250 °С должна быть меньше 30 °С/ч. Отжиг в качестве промежуточной операции применяют при холодной деформации или между горячей и холодной деформациями.

**Отжиг для разупрочнения сплавов, прошедших закалку и старение.** Заключается в нагреве сплава до 350–450 °С, выдержке 1–2 ч. В процессе отжига происходит полный распад пересыщенного твердого раствора и коагуляция упрочняющих фаз. Скорость охлаждения не должна превышать 30 °С/ч. После отжига сплав имеет низкий предел прочности, удовлетворительную пластичность и высокую сопротивляемость коррозии под напряжением.

**Структурное упрочнение.** Легирующие элементы, особенно переходные (**Mn, Cr, Ni, Zr, Ti** и др), повышают температуру рекристаллизации

алюминия. При кристаллизации они образуют с алюминием пересыщенные твердые растворы. В процессе гомогенизации и горячей обработки давлением происходит распад твердых растворов с образованием тонкодисперсных частиц интерметаллидных фаз, препятствующих прохождению процессов рекристаллизации и упрочняющих сплавы. По этой причине некоторые алюминиевые сплавы имеют температуру рекристаллизации выше температуры закалки. После закалки и старения сплавов в них сохраняется нерекристаллизованная (полигонизованная) структура с высокой плотностью дислокаций, что повышает ее прочность по сравнению с рекристаллизованной структурой. Это явление получило название *структурного упрочнения*, а применительно к прессованным полуфабрикатам *пресс-эффекта*. В результате структурного упрочнения значения  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$  повышаются до 30–40 %.

## 1.2 Классификация алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления (деформируемые, литейные, спеченные), способности к термической обработке (упрочняемые и неупрочняемые) и свойствам (рисунок 3, приложения А, Б).

### 1.2.1 Деформируемые алюминиевые сплавы

**Сплавы, не упрочняемые термической обработкой.** К этой группе относятся сплавы **АМц** и **АМг** (приложение В.1). Для данных сплавов характерны высокая пластичность, хорошая свариваемость и высокая коррозионная стойкость. Сплавы **АМц** относятся к сплавам системы Al – Mn. Структура сплава **АМц** состоит из  $\alpha$ -твердого раствора и вторичных выделений фазы  $MnAl_6$ , переходящих в твердый раствор при повышении температуры (рисунок 4). В присутствии железа образуется сложная тройная фаза  $(FeMn)Al_6$ , практически не растворимая в алюминии, поэтому сплав **АМц** не упрочняется термической обработкой. В отожженном состоянии сплав обладает высокой пластичностью и низкой прочностью:  $\psi = 70 \%$ ;  $\delta = 30 \%$ ;  $\sigma_b = 110$  МПа.

Сплавы **АМг** относятся к сплавам системы Al – Mg. Магний образует с алюминием  $\alpha$ -твердый раствор, концентрация которого при повышении температуры увеличивается с 1,4 до 17,4 % в результате растворения фазы  $Mg_2Al_3$ . Однако сплавы, содержащие до 7,0 % Mg, дают очень незначительное упрочнение при термической обработке. Вследствие этого сплавы **АМг**, как и **АМц**, используют в отожженном (мягком – М), реже – в нагартованном (Н – 80 % наклепа) и полунагартованном (П – 40 % наклепа) состояниях. Резкое снижение пластичности в результате наклепа ограничивает применение данного вида механической обработки.

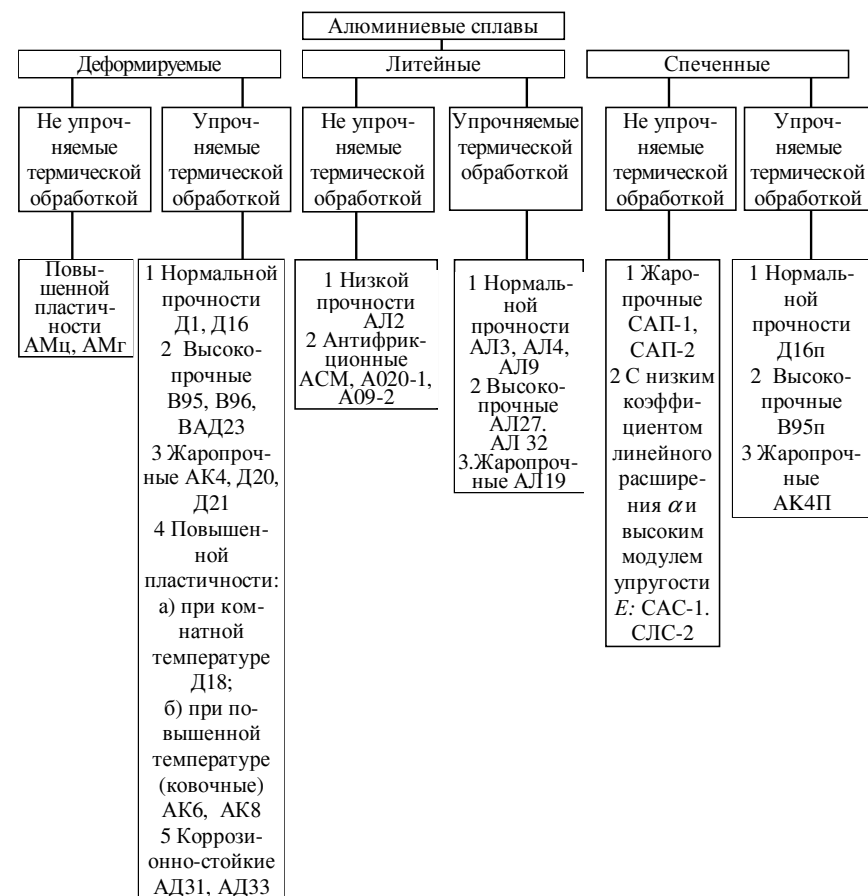


Рисунок 3 – Классификация алюминиевых сплавов

Для сплава **АМг** применяют отжиг при температуре 350–420 °С. Увеличение доли фазы  $Mg_2Al_3$  (увеличение содержания Mg) приводит к существенному повышению значения предела прочности с 110 МПа (**АМг1**) до 430 МПа (**АМг6**) при соответствующем снижении относительного удлинения с 28 до 16 % и увеличении склонности к коррозии под напряжением.

Сплавы типа **АМц** и **АМг** применяют для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для бензина и масла, сварные баки), а также для заклепок, переборок, корпусов и мачт судов, лифтов, узлов подъемных кранов, рам вагонов, кузовов автомобилей и др.

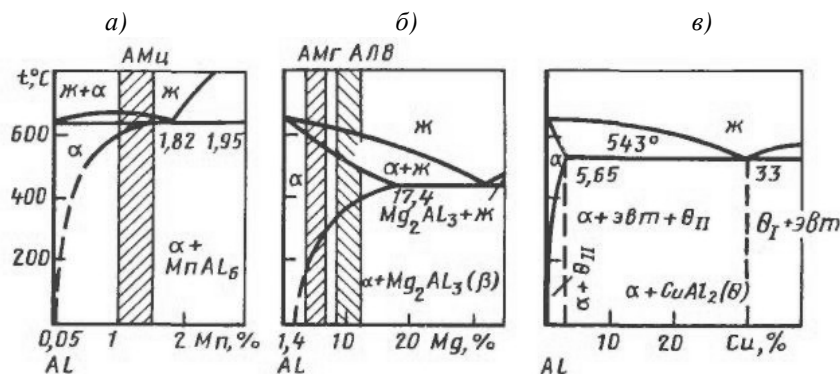


Рисунок 4 – Диаграммы состояния:  
 а – Al – Mn; б – Al – Mg; в – Al – Cu

**Сплавы, упрочняемые термической обработкой.** Типичные представители сплавов – дуралюмины (маркируют буквой Д). Они относятся к сплавам системы Al – Cu – Mg (приложение В.1). Медь с алюминием образуют твердый раствор, максимальная концентрация меди в котором 5,65 % при эвтектической температуре (см. рисунок 4). С понижением температуры растворимость меди уменьшается, достигая 0,1 % при 20 °С. При этом из твердого раствора выделяется фаза  $\Theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ), содержащая ~ 54,1 % Cu.

В сплавах, дополнительно легированных магнием, помимо  $\Theta$  образуется еще фаза S ( $\text{CuMgAl}_2$ ) с ромбической кристаллической решеткой. Чем больше меди содержится в сплаве, тем большее количество фазы  $\Theta$  будет в его структуре (Д1). Увеличение содержания магния приводит к росту количества фазы S и повышению прочности сплавов (Д16).

Марганец вводят для повышения коррозионной стойкости сплава. Присутствие в нем дисперсных частиц фазы T ( $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ ) повышает температуру рекристаллизации и улучшает механические свойства.

В качестве примесей в дуралюмине присутствуют железо и кремний. Железо образует соединение  $(\text{Mn, Fe})\text{Al}_6$ , которое кристаллизуется в виде грубых пластин, понижающих прочность и пластичность дуралюмина. Кроме того, железо образует соединение  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , нерастворимое в алюминии (снижается эффект упрочнения при старении за счет связывания железом меди). Содержание железа не должно превышать 0,5–0,7 %.

Кремний образует фазы  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и  $\text{W}(\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_5\text{Si}_4)$ , которые растворяются в алюминии и при последующем старении упрочняют сплав. Однако упрочнение от  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и W-фаз невелико, поэтому примесь кремния, уменьшая количество основных упрочняющих фаз S и  $\Theta$ , способствует снижению прочности.

При одновременном присутствии Fe и Si (в десятых долях процента) образуются химические соединения  $\alpha$  (Al – Fe – Si) и  $\alpha$  (Al – Fe – Si – Mn), не содержащие основных легирующих элементов (Cu и Mg). Данные соединения снижают пластичность дуралюмина, однако, в меньшей степени, чем ранее описанные фазы, содержащие железо.

При закалке сплавы Д16 и Д18 нагревают до 495–505 °С, Д1 – до 500–510 °С, с последующим охлаждением в воде при 40 °С. Структура закаленного дуралюмина состоит из пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора и нерастворимых соединений железа.

После закалки дуралюмины подвергают естественному старению для получения более высокой коррозионной стойкости. При естественном старении происходит образование зон Гинье – Престона, богатых магнием и медью. Старение продолжается 5–7 суток. Продолжительность старения значительно сокращается при увеличении температуры до 40 °С и особенно до 100 °С. При одинаковой прочности естественно состаренные дуралюмины имеют преимущество в пластичности и коррозионной стойкости, а искусственно состаренные – в пределе текучести. Искусственное старение дуралюминов применяется крайне редко, так как они приобретают помимо низкой пластичности чувствительность к концентрации напряжений.

Большое практическое значение имеет начальный период старения (20–60 мин), когда сплав сохраняет высокую пластичность и низкую твердость. Это позволяет проводить клепку, правку и другие технологические операции. Для проведения подобных операций естественно состаренные сплавы можно подвергнуть обработке на возврат (кратковременная выдержка сплава (1–2 мин) при температуре 230–300 °С). Во время нагрева рассыпаются зоны Гинье – Престона и восстанавливается пластичность свежезакаленного состояния. Однако следует учитывать снижение коррозионной стойкости сплава у тонкостенных изделий, а у толстостенных за короткое время выдержки восстановление пластичности не успевает пройти по всему сечению. Увеличение времени выдержки приведет к искусственному старению на поверхности изделия, что вызывает снижение пластичности.

Таким образом, упрочнение дуралюмина при термической обработке достигается в результате образования зон ГП сложного состава или метастабильных фаз S' и  $\Theta'$ .

Дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии и плохо в отожженном состоянии, хорошо свариваются точечной сваркой и не свариваются сваркой плавлением из-за склонности к образованию трещин.

*Дуралюмины широко применяют в авиации. Из сплава Д1 изготавливают*

лопасти воздушных винтов, из Д16 – шпангоуты, нервюры, тяги управления и др. Кроме того, их используют для строительных конструкций, кузовов грузовых автомобилей, обсадных труб и др. Сплав Д18 – один из основных заклепочных алюминиевых сплавов. Заклепки из сплава Д18 ставят в конструкцию после закалки и естественного старения.

Другим представителем сплавов, упрочняемых термической обработкой, является сплав **авиаль (АВ)**. Эти сплавы уступают дуралюминам по прочности, но обладают лучшей пластичностью в холодном и горячем состояниях. **Авиаль** удовлетворительно обрабатывается резанием (после закалки и старения) и сваривается контактной и аргонодуговой сваркой. Сплав обладает высокой общей сопротивляемостью коррозии, но склонен к межкристаллитной коррозии.

Термическая обработка заключается в нагреве под закалку 515–525 °С с охлаждением в воде и последующим естественным (АВТ) или искусственным старением при 160 °С 12 ч (АВТ1). Упрочняющей фазой в авиале является соединение Mg<sub>2</sub>Si.

Из сплава **АВ** изготавливают различные полуфабрикаты (*листы, трубы и т. д., используемые для элементов конструкций, несущих умеренные нагрузки*), кроме того, лопасти винтов вертолетов, кованные детали двигателей, рамы, двери и т. д., для которых требуется высокая пластичность в холодном и горячем состояниях.

**Ковочные сплавы (АК)** – сплавы, обладающие хорошей пластичностью и отсутствием способности к образованию трещин при горячей пластической деформации. Относятся сплавы системы Al – Cu – Mg с повышенным содержанием кремния (**АК6, АК8** и др.) (*приложение В.1*). В их структуре наряду с α-твердым раствором, фазами CuAl<sub>2</sub> (Θ) и CuMgAl<sub>2</sub> (S) обязательно присутствует фаза β (Mg<sub>2</sub>Si).

Термообработка включает закалку при 520±5 °С (сплавы **АК6**) или 505±5 °С (**АК8**) с охлаждением в воде и старение при 150–165 °С в течение 6–15 ч. Упрочняющими фазами при старении являются соединения Mg<sub>2</sub>Si, CuAl<sub>2</sub> и W-фаза (Al<sub>x</sub>Mg<sub>5</sub>Cu<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>). Закалка и искусственное старение обеспечивают предел прочности 420 МПа для сплава АК6 и 480 МПа для сплава АК8. Ковку и штамповку сплавов производят при температурах 450–475 °С.

Сплав **АК6** используют для деталей сложной формы и средней прочности, изготовление которых требует высокой пластичности в горячем состоянии (*подmotorные рамы, фитинги, крепежные детали, крыльчатки и т. д.*). Сплав **АК8** рекомендуется для тяжело нагруженных штампованных деталей (*подmotorные рамы, стыковые узлы, пояса лонжеронов, лопасти винтов вертолета и т. д.*). Сплавы **АК6** и **АК8** хорошо обрабатываются ре-

занием и удовлетворительно свариваются контактной и аргонодуговой сваркой. Сплавы склонны к коррозии под напряжением и межкристаллитной коррозии.

### 1.2.2 Литейные алюминиевые сплавы

Для литейных алюминиевых сплавов наиболее распространена классификация по химическому составу (сплавы Al – Si, Al – Cu и Al – Mg). Высокими литейными свойствами обладают сплавы, содержащие в своей структуре эвтектику. Эвтектика образуется во многих сплавах, в которых содержание легирующих элементов больше предельной растворимости в алюминии. Таким образом, содержание легирующих элементов в литейных сплавах выше, чем в деформируемых.

Силумины (**АЛ2, АЛ4** и др.) – наиболее распространенные литейные алюминиевые сплавы, широко применяемые только в литом виде. Реже, кроме силуминов в качестве литейных алюминиевых сплавов применяют сплавы алюминия с медью, магнием и цинком.

Для получения плотной отливки применяют сплавы эвтектической концентрации. Наиболее распространен сплав, содержащий 10–13 % Si (**АЛ2**), обладающий высокой коррозионной стойкостью. Сплав **АЛ2** содержит в структуре эвтектику α + Si и нередко первичные кристаллы кремния (рисунок 5). Кремний при затвердевании эвтектики выделяется в виде грубых кристаллов игольчатой формы, которые играют роль внутренних надрезов в пластичном α-твердом растворе.

Двойные сплавы *не упрочняются* термической обработкой. Это объясняется высокой скоростью распада твердого раствора, который частично происходит уже при закалке, а также большой склонностью к коагуляции стабильных выделений кремния. Единственным способом повышения механических свойств этих сплавов является измельчение структуры путем модифицирования. Легирование двойных сплавов позволяет осуществлять термообработку.

**Модифицирование.** Модифицируют как двойные, так и легированные силумины, содержащие более 5–6 % Si. Для измельчения структуры эвтектики и устранения избыточных кристаллов кремния силумины модифицируют натрием (0,05–0,08 %) путем присадки к

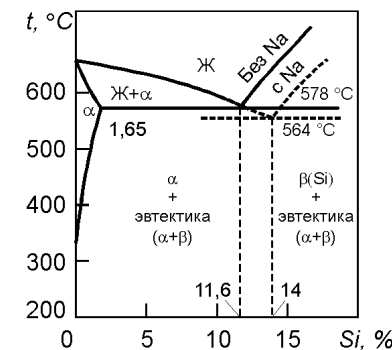


Рисунок 5 – Диаграмма состояния Al – Si



расплаву смеси солей 67 % NaF и 33 % NaCl. В присутствии натрия происходит смещение линий диаграммы состояния (см. рисунок 5), и эвтектический (эвтектический) сплав **АЛ2** (11–13 % Si) становится доэвтектическим. В этом случае в структуре сплава вместо избыточного кремния появляются кристаллы  $\alpha$ -раствора (первичные кристаллы  $\alpha$ -раствора характеризуются высокой пластичностью). Все это приводит к увеличению пластичности и прочности. Эвтектика состоит из мелких кристаллов  $\beta$  (Si) и  $\alpha$ -твердого раствора. В процессе затвердевания кристаллы кремния обволакиваются пленкой силицида натрия ( $\text{Na}_2\text{Si}$ ), которая затрудняет их рост, что улучшает механические свойства сплава.

Для измельчения зерна  $\alpha$ , следовательно, улучшения механических свойств, в сплавы вводят модифицирующие добавки: **Ti, Zr, B, V** и др. Часто используют **Mg, Cu, Mn**; реже – **Ni, Cr** и др. Элементы **Mg, Cu, Mn, Ti**, растворяясь в алюминии, повышают прочность и твердость силуминов. **Mn, Ti, Zr** способствуют получению пересыщенных твердых растворов при кристаллизации в условиях больших скоростей охлаждения, что вызывает некоторое упрочнение сплавов при старении без предварительной закалки. Mn повышает коррозионную стойкость сплава, Cu улучшает обрабатываемость резанием, Ti оказывает модифицирующее и рафинирующее действие.

Доэвтектические сплавы **АЛ4** и **АЛ9** (таблица 1), дополнительно легированные магнием, могут упрочняться термической обработкой. Упрочняющей фазой служит  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . При одновременном введении Mg и Cu могут образовываться фазы  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{W}(\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_5\text{Si}_4)$ .

Таблица 1 – Химический состав литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Si	Mg	Cu	Mn	Ti	Прочие
<b>АЛ2</b>	10,0–13,0	–	–	–	–	–
<b>АЛ9</b>	6,08,0	0,2–0,4	–	–	–	–
<b>АЛ4</b>	8,0–10,5	0,17–0,3	–	0,2–0,5	–	–
<b>АЛ6</b>	4,5–6,0	–	2,0–3,0	–	–	–
<b>АЛ3</b>	4,5–5,5	0,35–0,6	1,5–3,0	0,6–0,9	–	–
<b>АЛ32</b>	7,5–8,5	0,3–0,5	1,0–1,5	0,3–0,5	0,1–0,3	–
<b>АЛ7</b>	–	–	4,0–5,0	–	–	–
<b>АЛ19</b>	–	–	4,3–5,3	0,6–1,0	0,15–0,35	–
<b>АЛ8</b>	–	9,5–11,5	–	–	–	0,05–0,2 Zr
<b>АЛ27</b>	–	9,5–11,5	–	–	0,05–0,15	0,05–0,15 Be

Сплав **АЛ2** (не подвергается упрочняющей термической обработке) применяется для малонагруженных деталей во всех областях машиностроения (*корпуса приборов, детали авиационных колес, барабаны, кронштейны и др.*).

Недостатки: склонность к образованию мелкой газовой пористости, низкие механические свойства.

Сплав **АЛ4** имеет хорошее сочетание литейных и механических свойств. Кристаллизация под давлением в автоклавах позволяет устранить газовую пористость.

*Термическая обработка.* Закалка при температуре  $535 \pm 5$  °C и старение при  $180 \pm 5$  °C в течение 8 ч (крупные нагруженные детали: *корпуса компрессоров, картеры и блоки цилиндров двигателей и т. д.*). Упрочнение происходит вследствие выделения из пересыщенного твердого раствора дисперсных частиц фазы  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Следует отметить, что средненагруженные детали из сплава **АЛ4** подвергают только искусственному старению. Сплав **АЛ4** применяется для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: *корпусов компрессора, картеров, блоков и др.*

Сплав **АЛ9** характеризуется лучшей свариваемостью в сравнении со сплавом **АЛ4**, однако, имеет более низкие механические свойства.

*Термическая обработка.* Отливки из сплава **АЛ9**, требующие повышенной пластичности, подвергают закалке ( $535$ – $545$  °C), а для повышения прочности – закалке и старению ( $200$  °C, 3–4 ч). Когда важна высокая пластичность и стабильность размеров, после закалки производят отпуск при  $250$  °C в течение 3–5 ч. Из **АЛ9** изготавливают средненагруженные литые детали: *фланцы, башмаки, поршни и картеры сцепления, головки цилиндров.*

Высокопрочный сплав **АЛ32** (МВТУ-1) предназначен для литья под давлением. Сплав обладает хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозионной стойкостью.

*Термическая обработка.* Наличие марганца и титана, а также большая скорость кристаллизации при литье под давлением способствуют получению метастабильной структуры при отливке деталей. Это позволяет упрочнять отливки путем искусственного старения без предварительной закалки. Упрочнение вызывают фазы  $\Theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) и  $\beta$  ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ). Сплав **АЛ32** применяется для литья под давлением нагруженных деталей (*блоки цилиндров и головки блоков, корпуса*).

#### Сплавы Al – Cu

Сплавы системы Al – Cu (**АЛ7**, **АЛ19**) характеризуются невысокими литейными свойствами (большая усадка, склонность к образованию горячих трещин и т. д.), низкой герметичностью и пониженной коррозионной стойкостью, но обладают хорошей прочностью и жаропрочностью, хорошо обрабатываются резанием. Как и деформируемые сплавы этой системы, они имеют структуру твердого раствора, но отличаются повышенным содержанием меди (см. рисунок 4, в). Эвтектика в данной системе (в отличие от си-

луминов) образуется при высоком содержании меди (33 %), поэтому наличие большого количества твердой и хрупкой фазы  $\Theta(\text{CuAl}_2)$  вызывает хрупкость эвтектических сплавов.

Сплав **АЛ7** используют для отливки небольших деталей простой формы, работающих при средних нагрузках до 200 °С (арматура, кронштейн и т. д.).

*Термообработка.* Сплав **АЛ7** склонен к хрупкому разрушению вследствие выделения по границам зерен грубых частиц  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ , поэтому его применяют в закаленном состоянии (510–520 °С), когда эти соединения переведены в твердый раствор. Если отливок требуется повышенная прочность, то их после закалки подвергают искусственному старению при 150 °С в течение 2–4 ч.

Сплав **АЛ19** относится к высокопрочным и жаропрочным сплавам. Он хорошо сваривается и обрабатывается резанием. Литейные свойства, герметичность и коррозионная стойкость этого сплава, улучшенные по сравнению со сплавом **АЛ7**, остаются низкими. Помимо меди в состав сплава входит титан и марганец. Титан оказывает модифицирующее действие на сплав. Марганец образует пересыщенный твердый раствор при кристаллизации из жидкого состояния, особенно при больших скоростях охлаждения отливок. В этом случае во время нагрева сплава под закалку из твердого раствора выпадает фаза  $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ , повышающая прочность и жаропрочность сплава. Титан измельчает зерно. Сплав **АЛ19** используется для нагруженных деталей, работающих при температурах до 300 °С.

*Термообработка.* Упрочнение сплава **АЛ19** достигается закалкой (535–545 °С) и старением при 175 °С в течение 3–5 ч.

#### Сплавы Al – Mg

Сплавы системы Al – Mg (**АЛ8**, **АЛ27**) обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью, вязкостью и хорошей обрабатываемостью резанием. Вместе с тем они имеют невысокие литейные свойства (не содержат эвтектики), пониженную герметичность и повышенную чувствительность к примесям Fe, Si, которые образуют в этих сплавах нерастворимые фазы, снижающие пластичность сплавов (добавление к сплавам Al – Mg до 1,5 % Si (сплавы **АЛ13**, **АЛ22**) улучшает литейные свойства в результате образования тройной эвтектики). Сплав **АЛ8** обладает склонностью к окислению во время плавки, разливки и кристаллизации, что приводит к появлению окисных пленок в его структуре и снижению механических свойств. Вследствие этого плавку и разливку сплава необходимо вести под защитными флюсами. В сплаве **АЛ27** склонность к окислению устраняется путем легирования бериллием. Укрупнение зерна, вызываемое добавкой бериллия, предотвращается введением в сплав титана и циркония. Легирование двойных

сплавов **Be**, **Ti**, **Zr** не только устраняет их склонность к окислению и росту зерна, но и тормозит естественное старение, вызывающее снижение пластичности и вязкости сплавов.

*Термическая обработка.* Структура сплавов (см. рисунок 4, б) состоит из  $\alpha$ -твердого раствора и грубых включений частиц  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , которые располагаются по границам зерен, охрупчивая сплав. Термообработка сплавов **АЛ8** и **АЛ27** заключается в закалке при 430 °С с охлаждением в масле (40±50 °С). Выдержка при температуре закалки составляет 12–20 ч. Это обеспечивает растворение частиц  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  в  $\alpha$ -твердом растворе и получение после закалки однородного твердого раствора.

Сплавы систем Al – Mg применяют для изготовления *деталей, работающих в условиях высокой влажности, в судо-, самолето- и ракетостроении*. Из них делают *детали приборов, вилки шасси и хвостового оперения, штурвалы*.

#### 1.2.3 Высокопрочные алюминиевые сплавы

Высокопрочные алюминиевые сплавы маркируют буквой **В**. Характеризуются высоким временным сопротивлением (600–700 МПа) и близким к нему по значению пределом текучести (*приложение В.1*).

Представителями высокопрочных алюминиевых сплавов являются **В95**, **В96**, **ВАД23**. Предел прочности высокопрочного сплава **В95** – 600 МПа (для **В96**  $\sigma_b = 670$  МПа). Сплав **В95** принадлежит к системе Al – Zn – Mg – Cu и содержит добавки марганца и хрома. Марганец (Mn) и хром (Cr) повышают коррозионную стойкость и усиливают эффект старения сплава. Цинк, магний и медь образуют фазы, обладающие переменной растворимостью в алюминии. Структура сплава **В95** до температуры 200 °С состоит из  $\alpha$ -твердого раствора и фаз  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ), S ( $\text{CuMgAl}_2$ ), T ( $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$ ). При температуре 480 °С фазы  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ), T ( $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$ ) и частично S ( $\text{CuMgAl}_2$ ) переходят в твердый раствор, где фиксируются закалкой.

При искусственном старении из пересыщенного твердого раствора выделяются тонкодисперсные частицы  $\eta$ , T и S фаз, вызывающие значительное упрочнение сплава. После закалки (460–475 °С) и старения при 120–140 °С сплав **В95** имеет следующие механические свойства (для неплакированных профилей):  $\sigma_b = 600$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 550$  МПа,  $\delta = 12$  %, HB 150.

Подобный сплав, отличающийся более высоким содержанием Zn (7,6–8,6 %), Mg (2,5–3,2 %) и Cu (4,8–5,8 %), имеет повышенную прочность, но более низкую пластичность ( $\sigma_b = 680$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 640$  МПа,  $\delta = 7$  %, HB 190) и коррозионную стойкость.

Естественное старение для сплавов не применяют, так как оно происходит очень медленно и обеспечивает более низкую коррозионную стойкость.

*Недостатки сплавов системы Al – Zn – Mg – Cu:* 1) склонность к кор-

розии под напряжением; 2) склонность к растрескиванию под действием знакопеременных нагрузок; 3) чувствительность к концентрации напряжений; 4) анизотропия свойств.

Листовой материал защищают от коррозии путем плакирования сплавом алюминия с 1 % Zn. Проявление других недостатков устраняется путем продуманности плавных переходов при изменении сечений детали и тщательного изготовления (без царапин, забоин, задиров). Сплав **B95** применяют для высоконагруженных деталей конструкций, работающих в основном в условиях напряжения сжатия (обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов).

Высокопрочный алюминиевый сплав, легированный **Cu, Li, Mn и Cd**, отличается от **B95** жаропрочностью, меньшей плотностью и более высоким модулем упругости. Медь и литий образуют с алюминием твердый раствор и ряд интерметаллидных фаз, упрочняющих сплав при искусственном старении:  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ ),  $\text{CuLiAl}_2$  (T1) и  $\text{Al}_{7,5}\text{Cu}_4\text{Li}$  (Tв). Фазы T1 и Tв имеют низкую склонность к коагуляции при повышенных температурах, что обуславливает жаропрочность сплава. Добавки марганца (Mn) и кадмия (Cd), растворяясь в алюминии, улучшают коррозионную стойкость сплава и, кроме того, влияют на характер превращений при его старении. В присутствии марганца выделение упрочняющих фаз происходит не по границам, а по объему зерен твердого раствора, что приводит к увеличению прочности и пластичности сплава. Кадмий ускоряет искусственное старение и увеличивает его эффект.

После закалки с 515–525 °С и искусственного старения при 160–170 °С в течение 10–12 ч сплав (**ВАД23**), содержащий 4,9–5,8 % Cu, 1–1,4 % Li, 0,4–0,8 % Mn и 0,1–0,25 % Cd, имеет следующие механические свойства:  $\sigma_b = 620\text{...}640$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 580\text{...}590$  МПа,  $\delta = 4\text{...}6$  %;  $E = 73\text{...}76$  ГПа. Отжиг сплава проводится при температурах 380...420 °С. По механическим свойствам в отожженном состоянии и коррозионной стойкости этот сплав близок сплаву **Д16**. Пониженная пластичность и чувствительность к концентрации напряжений относятся к недостаткам сплава. Сплав применяется для изготовления высоконагруженных деталей, работающих в условиях сжатия при температурах до 170 °С.

#### 1.2.4 Жаропрочные алюминиевые сплавы

Жаропрочными сплавами называются сплавы, работающие при температурах до 300 °С (**АК4, АК4-1** – деформируемые алюминиевые сплавы) (приложение В.1). Сплавы легированы элементами (**Fe, Ni, Cu**), которые способны образовывать упрочняющие фазы, мало склонные к коагуляции при повышенных температурах. Такой фазой в сплавах **АК4** и **АК4-1** служит  $\text{FeNiAl}_9$ .

В нестандартных жаропрочных сплавах **Д20** и **Д21** благодаря высокому содержанию меди (5–7 %), кроме обычных упрочняющих фаз  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) и S ( $\text{CuMgAl}_2$ ), образуется фаза  $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ , придающая им высокую прочность при температурах до 200–300 °С. Жаропрочные сплавы применяются после закалки и искусственного старения. По прочности при комнатных температурах они приближаются к дуралюминам ( $\sigma_b = 420\text{...}480$  МПа).

Жаропрочные сплавы используются для нагруженных деталей и сварных изделий, работающих при температурах 20–300 °С: лопатки и диски осевых компрессоров, поршни двигателей, сварные емкости и др.

#### Литейный алюминиевый сплав (АЛ1).

Из сплава изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали, работающие при температурах 275–300 °С. Структура литого сплава **АЛ1** состоит из  $\alpha$ -твердого раствора, содержащего Cu, Mg и Ni, и избыточных фаз  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  и  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ . Отливки применяют после закалки и кратковременного старения при 175 °С; поршни подвергают закалке (510–520 °С) и старению при 290 °С. При закалке S-фаза растворяется в  $\alpha$ -твердом растворе. Добавочное легирование сплава **АЛ1** кремнием (1,5–2 %) улучшает литейные свойства (сплав **АЛ20**). Для увеличения жаропрочности и измельчения структуры сплав **АЛ20** легируют Fe (до 1,7 %), Ti, Cr и Mn. Структура сплава **АЛ20**:  $\alpha$ -твердый раствор, избыточные фазы  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Al}_5\text{SiFe}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ti}$ ,  $\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4$ , а также фазы, содержащие марганец и хром. Для стабилизации размеров и снятия внутренних напряжений сплав подвергают отжигу при 300 °С. Для достижения максимальной жаропрочности отливки закалывают и подвергают старению при 230 °С в течение 10 ч. Такую обработку применяют к деталям, длительно работающим при 250–270 °С. Для крупногабаритных деталей, работающих при 300–350 °С, применяют сплав **АЛ21**. Отливки сложной формы из сплава подвергают отжигу при 300 °С. Для получения более высоких механических свойств отливки закалывают с 525 °С в горячей воде и подвергают стабилизирующему отпуску при 300 °С.

#### 1.2.5 Спеченные сплавы

**САП** (спеченный алюминиевый порошок, или пудра) – сплавы на основе Al –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . **САП** характеризуется высокой прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств. Их получают путем последовательного брикетирования, спекания и прессования окисленной с поверхности алюминиевой пудры.

Высокая прочность **САП** объясняется большой дисперсностью окисной фазы, малым расстоянием между ее частицами, а также наличием когерент-

ной связи между алюминиевой матрицей и  $Al_2O_3$  (частицы  $Al_2O_3$  эффективно тормозят движение дислокаций). Нерастворимость в алюминии и отсутствие склонности к коагуляции через алюминиевую матрицу тонкодисперсных частиц  $Al_2O_3$  обеспечивают стабильность структуры и высокую прочность при температурах до 500 °С.

Содержание  $Al_2O_3$  в САП колеблется от 6–9 % (САП1) до 18–22 % (САП4). С увеличением  $Al_2O_3$  предел прочности повышается от 300–320 для САП1 до 440–460 МПа для САП4, а относительное удлинение соответственно снижается от 5–8 % до 1,5–2,0 %.

По жаропрочности САПы превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. 100-часовая длительная прочность САП при 500 °С равна 45–55 МПа, тогда как жаропрочные сплавы Д21, Д20, АК4-1 при температуре свыше 350 °С длительно не работают. САП хорошо деформируется в холодном и горячем состоянии, легко обрабатывается резанием и удовлетворительно сваривается контактной и аргонодуговой сваркой плавлением.

САПы используются для деталей, работающих при температурах 300–500 °С, от которых требуется высокая удельная прочность и коррозионная стойкость. Из них изготавливают поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и турбин в химической и нефтяной промышленности и др. Из спеченных алюминиевых сплавов производят все виды полуфабрикатов: листы, профили, штампованные заготовки, трубы, фольга.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) изготавливаются в основном по той же технологии, что и САПы, из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов. САС применяют тогда, когда путем литья и обработки давлением трудно получить соответствующий сплав или когда необходимо получить изделие с особыми физическими свойствами (например, САС1 (25–30 % Si, 5–7 % Ni и остальное Al); применяют для деталей приборов, работающих в паре со сталью при температуре 20–200 °С, которые требуют сочетания низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности).

Преимущество спекаемых алюминиевых сплавов по сравнению с литейными аналогичного состава заключается в отсутствии литейных дефектов (ликвации, шлаковых включений и т. д.) и мелкозернистой структуре с равномерным распределением фаз. Этим методом получают стандартные алюминиевые сплавы Д16П (порошковый), АК4П и др. По сравнению с литейными спеченные сплавы имеют более высокую длительную прочность при температурах 250–350 °С.

**Гранулированные сплавы.** Гранулированными называют сплавы, полученные путем компактирования из частиц (гранул), отлитых со сверхвы-

сокой скоростью кристаллизации. Гранулы получают при кристаллизации в условиях скоростей охлаждения  $10^3$ – $10^6$  °С/с (распылением жидкого металла струей чистого нейтрального газа и др.). В зависимости от условий кристаллизации диаметр гранул колеблется от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Гранулы характеризуются чрезвычайно мелкозернистой структурой, минимальной легкоустраняемой ликвацией, а также метастабильным состоянием. Высокие скорости охлаждения при кристаллизации позволяют получать пересыщенные твердые растворы с концентрацией, в 2,5–5 раз превосходящей предельную растворимость компонентов в равновесных условиях (аномально пересыщенные твердые растворы). Степень пересыщения возрастает в соответствии с расположением металлов в ряду **Cr, V, Mn, Ti, Zr**. В процессе технологических операций горячего компактирования сплавов (400–450 °С) из пересыщенного твердого раствора выпадают дисперсные частицы интерметаллидных фаз ( $Al_6Mn$ ,  $Al_7Cr$ ,  $Al_3Zr$  и др.), которые повышают температуру рекристаллизации, увеличивают прочность при обычных и повышенных температурах.

В настоящее время используют гранулированные алюминиевые сплавы с высоким содержанием переходных металлов (**Fe, Ni, Co, Mn, Cr, Zr, Ti, V** и др.), в малой степени растворимые алюминием. Такие сплавы имеют гетерогенную структуру, представляющую собой алюминиевую матрицу с равномерно распределенными дисперсными (из-за высокой скорости кристаллизации) включениями второй фазы. В сплавах, легированных тугоплавкими металлами, такими фазами будут интерметаллиды. Они эффективно упрочняют сплавы. В сплавах с легкоплавкими металлами, как **Sn** и **Pb**, в алюминии будут присутствовать дисперсные включения чистых металлов – **Sn** и **Pb**, что сообщает данным сплавам хорошие антифрикционные свойства.

#### Вопросы для самоконтроля

- 1 Назовите основные преимущества алюминия перед другими цветными металлами.
- 2 Как маркируется «чистый» алюминий?
- 3 Область применения алюминия и сплавов на его основе.
- 4 Укажите основные виды термической обработки алюминиевых сплавов.
- 5 Структурно-фазовые превращения алюминиевых сплавов при термической обработке.
- 6 Структурное упрочнение алюминиевых сплавов.
- 7 Классификация алюминиевых сплавов.
- 8 Укажите деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой.
- 9 Укажите особенности диаграмм двухкомпонентных алюминиевых сплавов.
- 10 Чем объясняется высокая коррозионная стойкость алюминия и сплавов на его основе?

- 11 Каким методом можно повысить пластичность алюминия?  
 12 Назовите сплавы, обладающие высокими литейными свойствами.  
 13 Какие алюминиевые сплавы обладают хорошей обрабатываемостью резанием?  
 14 Структурный состав высокопрочных алюминиевых сплавов.  
 15 Опишите возможную схему выделения избыточных фаз из твердого раствора при старении системы Al–Cu.  
 16 Назовите основные недостатки высокопрочных алюминиевых сплавов  
 16 Назовите упрочняющие фазы жаропрочных сплавов.  
 17 Чем объясняются высокие эксплуатационные свойства спеченных алюминиевых сплавов?  
 18 Каковы особенности технологии использования гранулированных сплавов на основе алюминия?

## 2 МЕДЬ И СПЛАВЫ НА ЕЕ ОСНОВЕ

**Медь (Cu)** – элемент I группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева, порядковый номер 29, атомная масса 63,546.

Медь – пластичный, розовато-красный металл с характерным металлическим блеском. Медь не имеет аллотропных превращений и кристаллизуется в решетке гранцентрированного куба с периодом  $a = 3,615 \text{ \AA}$ . Температура плавления меди – 1083,4 °С, плотность – 8920 кг/м<sup>3</sup>.

Медь характеризуется высокой тепло- и электропроводностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. Твердость по Бринеллю 370–420 МПа;  $\sigma_b = 220 \text{ МПа}$ ;  $\epsilon = 60 \%$ . После обработки давлением в связи с наклепом предел прочности возрастает до 400–450 МПа, относительное удлинение снижается на 1–3 %.

По тепло- и электропроводности медь занимает второе место после серебра, но ввиду ее большого практического значения эти свойства меди принято считать эталоном (100 %), по отношению к которому оцениваются другие металлы (таблица 2).

Таблица 2 – Электро- и теплопроводность по отношению к меди

Свойства	Cu	Ag	Al	Mg	Zn	Ni	Fe
Электропроводность, %	100	106	62	39	29	25	17
Теплопроводность, %	100	108	56	41	29	15	17

В зависимости от чистоты медь изготавливают следующих марок: **M00** (99,99 % Cu), **M0** (99,95 % Cu), **M1** (99,9 % Cu), **M2** (99,7 % Cu), **M3** (99,50 % Cu). Примеси снижают тепло- и электропроводность, пластичность и коррозионную стойкость.

По характеру взаимодействия примесей с медью их можно разделить на три группы.

**1.** Примеси, образующие с медью твердые растворы: **Ni, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P** и др. Данные примеси резко снижают электро- и теплопроводность меди, поэтому для проводников тока применяют медь марок M0 и M1, со-

держашую  $\leq 0,002 \%$  Sb и  $\leq 0,002 \%$  As (0,5 % P снижает электропроводность меди в пять раз; 0,5 % Sb – почти в 2 раза; 0,45 % As – более чем в два раза). Сурьма, кроме того, затрудняет горячую обработку давлением.

**2.** Примеси **Pb, Bi** и др., практически нерастворимые в меди; они образуют в ней легкоплавкие эвтектики; которые, выделяясь по границам зерен, затрудняют обработку давлением. (При содержании 0,005 % Bi медь разрушается при горячей обработке давлением, при более высоком содержании висмута она становится хладноломкой). На электропроводность эти примеси оказывают небольшое влияние.

**3.** Примеси кислорода и серы, образующие с медью хрупкие химические соединения Cu<sub>2</sub>O и Cu<sub>2</sub>S, входящие в состав эвтектики. На электропроводность данные примеси оказывают незначительное влияние. Сера улучшает обрабатываемость меди резанием. Химическое соединение Cu<sub>2</sub>O, располагаясь по границам зерен, способствует охрупчиванию меди, вызывая «водородную болезнь». (При нагреве меди в атмосфере, содержащей водород, происходит его диффузия в глубь меди с последующим взаимодействием с Cu<sub>2</sub>O по реакции  $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$ . Реакция сопровождается увеличением объема, что приводит к созданию в отдельных участках металла высокого давления, вызывающего появление микротрещин).

Следует отметить, что Be, Al способствуют повышению коррозионной стойкости меди; Fe, P – повышению прочности; Se, Pb, Te, Si – улучшают обрабатываемость резанием.

Медь имеет высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде, в атмосферных условиях и различных химических средах: органических кислотах, едких щелочах, сухих газах (галогенах) благодаря образованию на ее поверхности тонкой защитной пленки, состоящей из CuSO<sub>4</sub>·3Cu(OH)<sub>2</sub>. Медь реагирует с аммиаком, растворяется в азотной, соляной, горячей концентрированной серной кислотах, в кислых растворах хромовых солей.

Медь широко применяется для изготовления проводников электрического тока, анодов, кабелей, шин в электро-, электровакуумной и электронной технике, для различных теплообменников, нагревателей, холодильников, радиаторов и др.

### 2.1 Классификация медных сплавов

**Медные сплавы** классифицируются:

- по химическому составу: латуни, бронзы, медно-никелевые сплавы (приложение Б, В);
- технологическому назначению: обрабатываемые давлением и литейные;
- изменению прочности после термической обработки: упрочняемые и неупрочняемые.

### 2.1.1 Латунь

Латунь – сплав меди с цинком (приложение В.2). Обозначают начальной буквой Л, затем следуют буквы, указывающие основные элементы, образующие сплав: О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, Ж – железо, Ф – фосфор, Б – бериллий, Х – хром, Ти – титан, Ср – серебро, Мш – мышьяк, Зл – золото, В – ванадий, С – свинец, Кр (К) – кремний, Н – никель, Су – сурьма, К (Ко) – кобальт и т. д. Цифры, следующие за буквами, указывают количество легирующего элемента в процентах: ЛЖМц59 – 1 – 1. Латунь, содержащая 59 % Cu, 1 % Fe, 1 % Mn и остальное цинк. БрОФ6,5 – 0,15. Бронза, содержащая 6,5% Sn, 0,15% P и остальное медь. Буква Л в конце наименования марки указывает на то, что латунь литейная.

Латуни представляют собой двойные или многокомпонентные сплавы на основе меди, в которых цинк является основным легирующим компонентом. По сравнению с медью они обладают более высокой прочностью (в том числе при повышенных температурах), коррозионной стойкостью, упругостью, технологичностью (литье, обработка давлением, резание), трибологическими характеристиками. Это наиболее дешевые и распространенные в машиностроении медные сплавы. Двойные латуни, содержащие до 20 % Zn, называют **томпаком** (латуни, содержащие 14–20 % Zn, – полутомпаком).

Диаграмма состояния Cu – Zn приведена на рисунке 6. Из жидкого раствора в зависимости от состава кристаллизуется шесть различных фаз. Практическое значение имеют сплавы, содержащие до 50 % Zn.

Предельная растворимость цинка в меди составляет 39 %. При большем содержании цинка кроме основного  $\alpha$ -раствора (твердый раствор цинка в меди с кристаллической решеткой г.ц.к.) образуется ряд фаз электронного типа  $\beta$  (CuZn, кристаллическая решетка – объемноцентрированный куб),  $\gamma$  (электронное соединение Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>, 21/13). При температурах 454–468 °C (пунктирная линия на диаграмме) наступает упорядочение электронного соединения CuZn ( $\beta'$ -фаза), сопровождающееся значительным повышением его твердости и хрупкости. Ширина области гомогенности  $\beta'$ -фазы в зависимости от температуры изменяется: от 37 до 57 % Zn при высоких температурах и от 45 до 49 % Zn при комнатной.

Наиболее часто структура латуней состоит из  $\alpha$ - или ( $\alpha + \beta'$ )-фаз. Когда латунь имеет структуру  $\alpha$ -твердого раствора, увеличение содержания цинка вызывает повышение ее прочности и пластичности. Появление  $\beta'$ -фазы сопровождается резким снижением пластичности, прочность продолжает повышаться при увеличении цинка до 45 %, пока латунь находится в двухфазном состоянии. Переход латуни в однофазное состояние со структурой  $\beta'$ -фазы вызывает резкое снижение прочности. Практическое значение имеют

латуни, содержащие до 45 % Zn. Сплавы с большим содержанием цинка отличаются высокой хрупкостью.

Однофазные латуни хорошо поддаются холодной пластической деформации, которая значительно повышает их прочность и твердость. Повышение содержания цинка удешевляет латуни, улучшает их обрабатываемость резанием, способность прирабатываться и противостоять износу. Вместе с тем уменьшаются тепло- и электропроводность (составляют 20–20 % от характеристик меди), ухудшается коррозионная стойкость латуней. Сплавы, содержащие более 20 % Zn, склонны к коррозионному растрескиванию с течением времени («сезонное растрескивание») и обесцинкованию. Коррозионное растрескивание присуще нагартованным тонкостенным изделиям во влажной атмосфере, особенно в присутствии аммиака, двууглекислого газа и в некоторых других средах (проявляется только тогда, когда латунь наклепана, в поверхностном слое имеются растягивающие остаточные напряжения, и латунь подвергается воздействию агрессивной среды (главным образом аммиака). Для предупреждения возникновения трещин необходимо, по возможности, подвергать изделия отжигу при температурах порядка 250–300 °C для уменьшения остаточных напряжений). Обесцинкование состоит в растворении поверхностного слоя изделия в коррозионной среде и осаждении из нее меди, которая, образуя с латунью гальваническую пару, вызывает быстрое разрушение металла. Для устранения склонности к обесцинкованию в латуни добавляют фосфор (0,2 %), мышьяк (0,02–0,06 %).

Примеси повышают твердость и снижают пластичность латуней. Особенно неблагоприятно действуют **Pb** и **Bi**. Образуя легкоплавкие эвтектики, **Bi** и **Pb** вызывают в *однофазных латунях*, как и в чистой меди, при 300–700 °C явление, подобное красноломкости стали. В *двухфазных латунях* вследствие

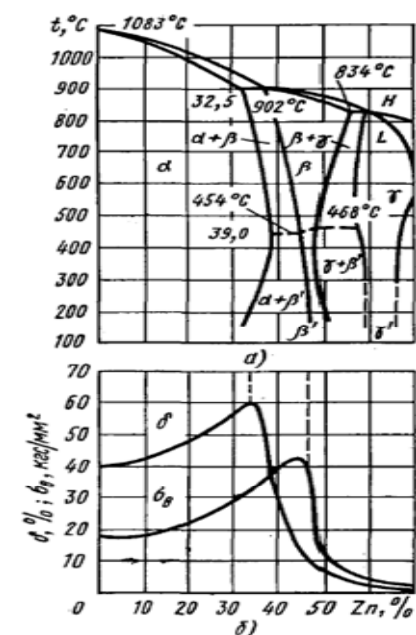


Рисунок 6 – Сплавы Cu – Zn:  
а – диаграмма состояния Cu – Zn;  
б – влияние цинка на механические свойства меди

$\alpha \leftrightarrow \beta$  превращения легкоплавкие эвтектические фазы находятся не по границам, а внутри зерен твердого раствора и не влияют на их способность к горячей пластической деформации. Иногда к ним специально добавляют свинец для улучшения обрабатываемости резанием и антифрикционных свойств.

Сурьма и сера сильно ухудшают качество латуней. Примеси **Sb** вызывают разрушение латуней при обработке давлением, как в горячем, так и в холодном состоянии. Под влиянием сурьмы увеличивается склонность латуней к коррозионному растрескиванию.

Двойные латуни легируют **Al, Fe, Ni, Sn, Mn, Pb** и другими элементами. Такие латуни называют специальными или многокомпонентными. Введение легирующих элементов (кроме никеля) уменьшает растворимость цинка в меди и способствует образованию  $\beta'$ -фазы, поэтому специальные латуни чаще двухфазные  $\alpha + \beta'$ .

**Никель** увеличивает растворимость цинка в меди. При добавлении его к ( $\alpha + \beta'$ )-латуни количество  $\beta'$ -фазы уменьшается, и при достаточном его содержании латунь из двухфазной становится однофазной ( $\alpha$ -латунь). Никель улучшает механические свойства и повышает коррозионную стойкость латуней. Никелевые латуни (**ЛН65-5**) хорошо обрабатываются давлением в холодном и горячем состояниях. Ввиду высокой коррозионной стойкости их применяют в морском судостроении (*конденсаторные и манометрические трубки и др.*).

**Свинец** облегчает обрабатываемость резанием и улучшает антифрикционные свойства. Свинец вводят в ( $\alpha + \beta'$ )-латуни или в  $\alpha$ -латуни, испытывающие при нагреве и охлаждении  $\alpha \leftrightarrow \beta$  превращение. В результате этого превращения свинец располагается не по границам зерен, как в чистой меди или  $\alpha$ -латуни, не имеющей превращений в твердом состоянии (что особенно затрудняет горячую обработку давлением, вызывая брак продукции), а внутри зерен, что не мешает обработке давлением, но способствует лучшему отделению стружки при резании.

**Алюминий** повышает прочность, твердость и коррозионную стойкость латуней. Практическое применение находят высокомедистые латуни с добавлением алюминия до 4,0 % (**ЛА77-2**), которые благодаря однофазной структуре хорошо обрабатываются давлением. Алюминиевая латунь **ЛА77-2** обладает высокой коррозионной стойкостью в морской воде и идет в основном на изготовление *конденсаторных трубок в морском судостроении*.

**Олово** повышает коррозионную стойкость латуней в морской воде, поэтому оловянные латуни (**ЛО70-1, ЛО62-1**) называются морскими и применяются в основном в *судостроении*.

**Кремний** повышает коррозионную стойкость и технологические

свойства латуней. Улучшается жидкотекучесть, свариваемость и способность к горячей и холодной пластической деформации. Кремнистые латуни характеризуются высокой прочностью, пластичностью, вязкостью не только при комнатных, но и при низких температурах (до  $-183$  °С). При легировании латуни для получения однофазной структуры используют небольшие добавки кремния (**ЛКр80-3**). Эта латунь применяется в виде холоднокатаных прутков, поковок, штамповок, а также для сложных фасонных отливок (*арматура, детали приборов, в судо- и общем машиностроении*).

**Железо** сильно измельчает структуру, тормозит рост зерна, увеличивает температуру рекристаллизации и повышает твердость. При содержании железа более 0,03 % латуни становятся магнитными.

*Следует помнить, что не рекомендуется применять латунь в контакте с железом, алюминием и цинком (образование гальванической пары)!*

В связи с невозможностью получения в  $\alpha$ -латуни неравновесных состояний для  $\alpha$ -латуни закалка не производится. Структурные изменения в  $\alpha$ -латунях проявляются лишь в размерах (величине) зерен в связи с процессом рекристаллизации при отжиге после наклепа или при горячей механической обработке.

Для уменьшения твердости перед обработкой давлением и получения в полуфабрикатах требуемых свойств их подвергают рекристаллизационному отжигу, чаще при 600–700 °С, с охлаждением на воздухе или в воде (для отделения слоя окалина). Для получения мелкого зерна перед глубокой вытяжкой полосы и ленты отжигают при более низкой температуре (450–550) °С.

При отжиге ( $\alpha + \beta'$ )-латуней помимо рекристаллизации протекает фазовая перекристаллизация. Структура и свойства ( $\alpha + \beta'$ )-латуней зависят от скорости охлаждения. При быстром охлаждении возрастает количество  $\beta'$ -фазы, что повышает твердость латуни и в некоторых случаях улучшает обработку давлением, охлаждение должно быть медленным, чтобы получить возможно большее количество  $\alpha$ -фазы.

Следует отметить, что латуни, обрабатываемые давлением, упрочняют деформационным наклепом, за исключением латуни **ЛАНКМц 75–2–2,5–0,5–0,5**, которая является дисперсионно-твердеющим сплавом, упрочняемым не только деформационным наклепом, но и в результате термической обработки (закалки и старения). Эта латунь обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии и высокими упругими и прочностными свойствами после старения. Упрочнение латуней обеспечивается холодной деформацией после закалки.

## 2.1.2 Оловянные бронзы

Бронзой называют сплав меди с другими элементами, в числе которых, но только наряду с другими, может быть и цинк. Сплавы обозначают начальными буквами **Бр.** Бронзы, в которых олово является основным легирующим элементом, называются оловянными. Наибольшее практическое значение имеют сплавы, содержащие до 20 % Sn (рисунок 7). Эта часть диаграммы состояния Cu-Sn представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор олова в меди, имеющий гранцентрированную кристаллическую решетку. Растворимость олова в меди изменяется от

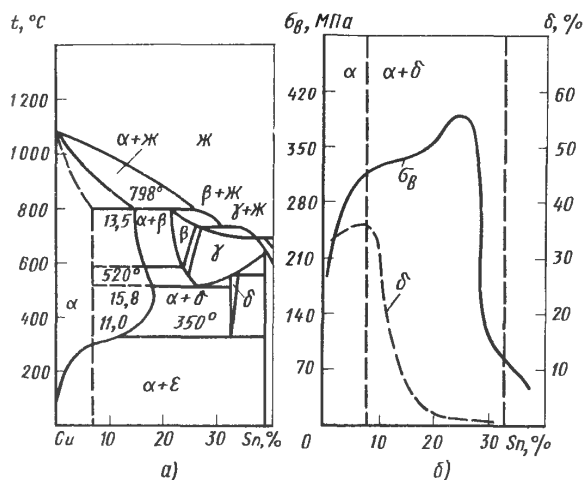


Рисунок 7 – Диаграмма состояния Cu – Sn (а) и влияние Sn на механические свойства меди (б)

15,8 % при  $586^\circ\text{C}$  до 1 % при  $200^\circ\text{C}$ . Причем в реальных условиях за твердевания и охлаждения (в песчаных и металлических формах) область  $\alpha$ -твердого раствора значительно сужается (примерно до 6 %). В сплавах этой системы образуются электронные соединения:  $\beta$ -фаза ( $\text{Cu}_5\text{Sn}$  с электронной концентрацией

$3/2$ , объемноцентрированный куб);  $\delta$ -фаза ( $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  с электронной концентрацией  $21/13$ );  $\varepsilon$ -фаза ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$  с электронной концентрацией  $7/4$ ), а также  $\gamma$ -фаза – твердый раствор на базе химического соединения, природа которого не установлена. При  $588^\circ\text{C}$  кристаллы  $\beta$ -фазы претерпевают эвтектидный распад с образованием  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз, а при  $520^\circ\text{C}$  кристаллы твердого раствора  $\gamma$  распадаются на фазы  $\alpha$  и  $\delta$ . При  $\sim 350^\circ\text{C}$   $\delta$ -фаза распадается на  $\alpha$ -твердый раствор и  $\varepsilon$ -фазу. Однако это превращение протекает только при очень медленном охлаждении. В реальных условиях охлаждения бронза состоит из фаз  $\alpha$  и  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  ( $\delta$ -фаза).

В практике применяют только сплавы с содержанием до 10–12 % Sn. Сплавы с большим содержанием олова являются очень хрупкими. Двойные оловянные бронзы применяются редко, так как они дороги. Широкий температурный интервал кристаллизации обуславливает большую склонность к

дендритной ликвации, низкую жидкотекучесть, рассеянную усадочную пористость и поэтому невысокую герметичность отливок.  $\alpha$ -бронза характеризуется дендритной структурой твердого раствора в литых необработанных образцах или зернистой (полиэдрической) после отжига. Если содержание олова более 16 % Sn, то в условиях равновесия кроме  $\alpha$ -фазы наблюдаются участки эвтектоида ( $\alpha + \delta$ ) в большем или меньшем количестве, в зависимости от содержания Sn.

Предел прочности возрастает с увеличением содержания олова. При высокой концентрации олова вследствие присутствия в структуре значительного количества эвтектоида, содержащего хрупкое соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , предел прочности резко снижается. Относительное удлинение несколько возрастает при содержании в бронзе 4–6 % Sn, но при образовании эвтектоида сильно уменьшается. Оловянные бронзы слабо чувствительны к перегреву и газам, свариваются и паяются, не дают искры при ударах, не магнитны, морозостойки и обладают хорошими антифрикционными свойствами. Высокие антифрикционные свойства обусловлены резко выраженной дендритной структурой, при которой в осях дендритов содержится олова меньше, чем в межосных пространствах, являющихся вследствие появления участков эвтектоида  $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  более твердыми. При работе детали на трение твердые прослойки служат опорой, а мягкие участки, вырабатываясь, облегчают приработку и способствуют образованию на поверхности мельчайших каналов, по которым может циркулировать смазка. В связи с этим бронзы часто применяют для изготовления антифрикционных деталей. Оловянные бронзы не корродируют в атмосферных условиях, пресной и морской воде. Среди медных сплавов оловянные бронзы имеют самую низкую линейную усадку (около 1,0 %, усадка латуни и чугуна – около 1,5 %, сталей – более 2 %), поэтому они применяются для получения сложных фасонных отливок.

**Легирование.** Оловянные бронзы легируют **Zn, Pb, Ni, P, Fe**, и др.

**Цинк.** Для экономии более дорогостоящего олова в бронзы добавляют, от 2 до 15 % Zn. Цинк полностью растворяется в  $\alpha$ -твердом растворе, не образует самостоятельных фаз. Улучшает жидкотекучесть, плотность отливок, повышает механические свойства, способность к сварке и пайке.

**Свинец** не растворяется в меди, присутствует в структуре бронзы в виде округлых выделений в объеме зерна. Свинец снижает механические свойства бронзы, но повышает антифрикционные свойства и улучшает обрабатываемость резанием.

**Фосфор.** Добавки фосфора к оловянным бронзам значительно улучшают их механические, антифрикционные и литейные (жидкотекучесть) характеристики. Для механических свойств оптимальным является содержание



фосфора около 0,5 % (при содержании более 0,3 % образует фосфид  $\text{Cu}_3\text{P}$ ). При больших концентрациях фосфора бронзы охрупчиваются, особенно при горячей прокатке. В литейных антифрикционных бронзах возможно до 1,2 % P.

**Никель** при содержании до 1 % повышает механические свойства, коррозионную стойкость, плотность отливок, уменьшает ликвацию и измельчает зерно.

**Железо** повышает механические свойства и температуру рекристаллизации, однако с увеличением его содержания ухудшаются технологические и коррозионные свойства бронз.

Небольшие добавки **Zr, Ti, Nb** улучшают механические свойства и обрабатываемость давлением в холодном и горячем состояниях.

Различают **деформируемые** и **литейные** оловянные бронзы.

### 2.1.3 Деформируемые оловянные бронзы

Деформируемые бронзы содержат до 8 % Sn, до 0,4 % P, до 4 % Zn и до 4,5 % Pb (приложение В.3). В равновесном состоянии они имеют однофазную структуру  $\alpha$ -твердого раствора, вместе с которым может присутствовать небольшое количество  $\delta$ -фазы. Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением (деформируемые), подразделяют на следующие группы (ГОСТ 5017-74): оловянно-фосфористые **БрОФ8-0,3, БрОФ6,5-0,4, БрОФ6,5-0,15, БрОФ7-0,2, БрОФ4-0,25**; оловянно-цинковую **БрОЦ4-3** и оловянно-цинково-свинцовые **БрОЦС4-4-2,5, БрОЦС4-4-4**.

Из оловянно-фосфористых бронз **БрОФ8-0,3** и **БрОФ6,5-0,4** изготавливают *сетки для целлюлозно-бумажной промышленности, из БрОФ6,5-0,15 – ленты, полосы, прутки, детали подшипников и биметаллические изделия, из БрОФ7-0,2 – прутки, шестерни, зубчатые колеса, втулки и прокладки высоконагруженных машин, из БрОФ4-0,25 – трубки контрольно-измерительных и других приборов, манометрические пружины.*

Из оловянно-цинковой бронзы **БрОЦ4-3** выпускают *ленты, полосы, прутки, применяемые в электротехнике; токоведущие пружины, контакты штепсельных разъемов, пружинную проволоку для химической промышленности и точной механики; арматуру, шаберы для бумажной промышленности.*

Из оловянно-цинково-свинцовых бронз **БрОЦС4-4-2,5** и **БрОЦС4-4-4** делают *втулки и подшипники для автотракторной и автомобильной промышленности.*

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением, поставляют, как и латуни, в мягком (отожженном), полутвердом, твердом и особо твердом состоянии.

### 2.1.4 Литейные оловянные бронзы

Литейные бронзы содержат *более 6 % Sn* и большее количество легирующих добавок (**Zn, P, Pb**) по сравнению с деформируемыми бронзами (приложение В.4). Они имеют двухфазную структуру  $\alpha$ -твердый раствор и твердые хрупкие включения  $\delta$ -фазы, входящие обычно в структуру эвтектоида. Наличие твердых включений эвтектоидной  $\delta$ -фазы в сравнительно мягкой основе твердого раствора обеспечивает высокие антифрикционные свойства литейным бронзам. Жидкотекучесть литейных оловянных бронз ниже, чем других бронз, однако они имеют незначительную объемную усадку, что позволяет получать из этих сплавов фасонные отливки.

Бронзы **БрОЦС3-12-5** и **БрОЦСН3-7-5-1** используют для *арматуры, работающей в воде и водяном паре давлением до 245 МПа (бронза БрОЦСН3-7-5-1 – в морской воде и маслах).*

Литейные нестандартные бронзы **БрО10, БрО19** ответственного назначения применяют для *арматуры и фасонных отливок; БрОФ10-1 – для подшипников, шестерен и втулок ответственного назначения; БрОЦ10-2 – для арматуры, подшипников, фасонных отливок; БрОЦ8-4 – для частей насосов и арматуры; БрОЦС6-6-3 – для паровой и водяной арматуры; БрОБС8-1-12 – для ответственных подшипников, работающих при высоких давлениях; БрОС5-25 и БрОС1-22 – для изготовления подшипников и втулок, работающих при малых нагрузках и больших скоростях, маслоуплотнительных колец; БрОЦС6-6-3 – для паровой и водяной арматуры. Бронзы БрОС5-25, БрОС1-22, БрОС8-12 входят в группу свинцовых бронз, к которым относятся БрС30 (для подшипников, сальников), БрСН60-2,5 (для подшипников, фасонных отливок). Из-за невысоких механических свойств двойные свинцовые бронзы применяют для втулок и подшипников в виде тонкого слоя на стальной основе. Свинцовые бронзы с повышенным содержанием олова (БрОС8-12, БрОС10-10, БрОСН10-2-3) характеризуются более высокими механическими свойствами, чем двойные свинцовые бронзы. Поэтому из этих бронз изготавливают втулки и вкладыши подшипников без стальной основы.*

Для облегчения обработки давлением бронзы подвергают гомогенизации при 700–750 °С с последующим быстрым охлаждением. Гомогенизация уменьшает дендритную ликвацию в бронзах и приближает их структуру к состоянию, близкому к равновесному. Для снятия внутренних напряжений в отливках их отжигают при 550 °С в течение 1 ч.

### 2.1.5 Алюминиевые бронзы

Медь с алюминием образует  $\alpha$ -твердый раствор, концентрация которого при понижении температуры от 1035 °С до 565 °С увеличивается от 7,4 до

9,4 % Al, после чего практически не меняется (рисунок 8).

При 565 °С  $\beta$ -фаза, представляющая собой электронное соединение  $\text{Cu}_3\text{Al}$  (3/2) с решеткой объемноцентрированного куба, распадается с обра-

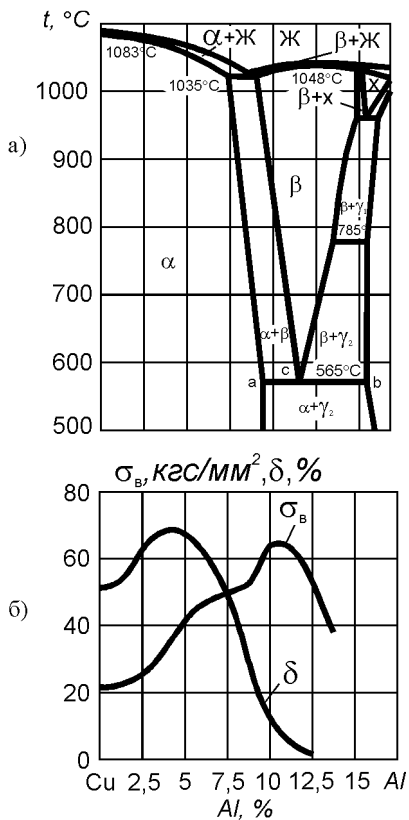


Рисунок 8 – Диаграмма состояния Cu – Al (а) и влияние Al на механические свойства меди (б)

зованием эвтектоида ( $\alpha + \gamma_2$ ), где  $\gamma_2$  – электронное соединение  $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$  со сложной кубической решеткой. При реальных скоростях охлаждения, в отличие от равновесного состояния, эвтектоид появляется в структуре сплавов при 6–8 % Al. Наличие эвтектоида приводит к резкому снижению пластичности алюминиевых бронз.

Фаза  $\alpha$  пластична, но прочность ее невелика,  $\gamma_2$ -фаза обладает высокой твердостью, но пластичность ее крайне незначительная. С увеличением Al до 4–5 % наряду с прочностью и твердостью повышается пластичность, затем пластичность резко падает, а прочность продолжает расти при увеличении алюминия до 10–11 %.

На практике из двухфазных бронз применяют бронзы, содержащие не более 11 % Al, а из однофазных наиболее употребительными являются бронзы с 5 % Al, которые являются наиболее пластичными (приложение В.5, В.6). Однофазные бронзы (**БрА5**, **БрА7**, **БрА10**) обладают наилучшим сочетанием прочности ( $\sigma_b = 400..450$  МПа) и пластичности ( $\delta = 60$  %), хорошо

обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Предназначены они для упругих элементов – пружин, мембран, сильфонов, деталей, работающих в морской среде. Алюминиевые бронзы морозостойки, не магнитны, не дают искры при ударах, а по коррозионной стойкости превосходят латуни и оловянные бронзы. Вместе с тем эти сплавы плохо поддаются пайке и неустойчивы в условиях перегретого пара. Понижая электро- и теплопроводность меди, алюминий повышает ее жаростойкость.

К недостаткам двойных алюминиевых бронз помимо большой усадки

относятся склонность к газонасыщению и окисляемости во время плавки, образование крупнокристаллической столбчатой структуры, трудность пайки. Эти недостатки существенно уменьшаются при легировании алюминиевых бронз железом, никелем, марганцем. Следует отметить, что бронзы, содержащие приблизительно 9–11 % Al, а также никель, марганец и железо, могут быть упрочнены термической обработкой: **закалкой** (при быстром охлаждении  $\beta$ -фаза претерпевает не эвтектоидное, а мартенситное превращение) и **дисперсионным старением**.

**Железо** повышает прочность, твердость и антифрикционные свойства, уменьшает склонность к охрупчиванию двухфазных бронз из-за замедления эвтектоидного распада  $\beta$ -фазы и измельчения  $\gamma_2$ -фазы, образующейся в результате этого распада, способствует задержке рекристаллизации (из-за измельчения зерна). В  $\alpha$ -фазе алюминиевой бронзы растворяется до 4 % железа, при большем содержании образуются включения  $\text{Al}_3\text{Fe}$ . Дополнительное легирование сплавов никелем и марганцем способствует появлению этих включений при меньшем содержании железа.

Термообработка алюминиево-железных бронз, например **БрАЖ9-4**, для улучшения прочностных характеристик заключается в нормализации при 600–700 °С или закалке в воде с 950 °С с целью частичного или полного подавления эвтектоидного превращения (после обработки бронза обладает хорошей пластичностью), с последующим отпуском при 250–300 °С в течение 2–3 ч. В процессе отпуска происходит распад  $\beta$ -фазы с образованием эвтектоида ( $\alpha + \gamma_2$ ) и повышение твердости (НВ 175–180). Алюминиево-железные бронзы применяют для *шестерен, червяков, втулок, сидел клапанов, гаек, винтов* в основном в авиационной промышленности.

**Никель** повышает механические свойства, жаростойкость, температуру рекристаллизации, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства и устойчивость при низких температурах алюминиевых бронз. Улучшает технологичность и механические свойства алюминиево-железных бронз при обычных и повышенных температурах, способствует резкому сужению области  $\alpha$ -твердого раствора при понижении температуры. Это вызывает у бронз, легированных железом и никелем (**БрАЖН10-4-4**), способность к дополнительному упрочнению после закалки вследствие старения. Так термообработка **БрАЖН10-4-4** заключается в закалке с 980 °С и отпуске при 400 °С (в течение 2 ч). После термообработки твердость увеличивается с НВ 140–160 до НВ 400. При нагреве эвтектоид  $\alpha + \gamma_2$  превращается в  $\beta$ -твердый раствор. При сравнительно небольшой скорости охлаждения происходит распад  $\beta$ -твердого раствора с образованием дисперсной структуры из ( $\alpha + \gamma_2$ )-фаз, что повышает твердость. При скорости охлаждения выше

критической протекает бездиффузионное (сдвиговое) превращение и образуется мартенситная структура.

Алюминиево-железоникелевые бронзы используют для направляющих втулок, клапанов, шестерен и других деталей ответственного назначения, в основном в авиационной промышленности. Из них изготавливают детали, работающие в тяжелых условиях износа при повышенных температурах (400–500 °С): седла клапанов, направляющие втулки выпускных клапанов, части насосов и турбин, шестерни и др.

**Марганец.** Бронзы вместо никеля часто легируют более дешевым марганцем (**БрАЖМц10-3-1,5**). В алюминиевых бронзах марганец улучшает технологические характеристики и коррозионную стойкость. Бронзы, содержащие марганец, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Применяют их для червячных винтов, шестерен, втулок, в морском судостроении для деталей, работающих при температурах до 250 °С.

### 2.1.6 Бериллиевые бронзы

Бериллиевые бронзы, являясь дисперсионно-твердеющими сплавами, обладают высокими механическими, упругими и физическими свойствами; отличаются высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью (устойчиво работают при температурах до 310–340 °С; при 500 °С они имеют приблизительно такую же прочность, как оловянно-фосфористые и алюминиевые бронзы при комнатной температуре), циклической прочностью. Обладают высокой тепло- и электропроводностью, хорошо обрабатываются резанием и свариваются точечной и шовной сваркой. Бериллиевые бронзы устойчивы при низких температурах, не магнитны, не дают искры при ударах.

Двойные бериллиевые бронзы содержат в среднем 2 % бериллия (**БрБ2**) (приложение В.6). По равновесной диаграмме состояния Cu – Be они имеют структуру, состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора бериллия в меди и  $\gamma$ -фазы, электронного соединения (3/2) с решеткой объемноцентрированного куба (рисунок 9). Концентрация  $\alpha$ -твердого раствора значительно уменьшается с понижением температуры (с 2,75 % Ве при 870 °С до 0,2 % при 300 °С).

Прочность бериллиевой бронзы резко увеличивается в интервале концентраций 1,5–2,0 % Ве. При содержании более 2,0 % Ве прочность повышается незначительно, пластичность из-за большого количества твердой и хрупкой  $\gamma$ -фазы становится очень низкой.

Предельная растворимость бериллия при 866 °С составляет 2,7 %, при эвтектоидной температуре 1,5 %, а при 300 °С всего 0,2 %. Это указывает на возможность упрочнения бериллиевой бронзы методом дисперсионного твердения.

Закалку бериллиевых бронз осуществляют при 750–790 °С, с последующим старением при 300–325 °С. Закалка фиксирует пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор. При старении бериллиевой бронзы частицы выделяющейся фазы CuBe располагаются в матрице – пересыщенном  $\alpha$ -твердом растворе не беспорядочно, а регулярно, образуя так называемую модулированную или квазипериодическую структуру. При образовании такой структуры частицы выделяющейся фазы размером  $\approx 10$  нм формируют объемноцентрированную тетрагональную макрорешетку с параметрами  $a = 20$  нм и  $c = 100$  нм. Образование таких регулярных структур происходит во многих сплавах и сталях, испытывающих старение, эвтектоидный распад, упорядочение. Причиной такого пространственного расположения частиц во второй фазе является взаимодействие полей упругих деформаций, создаваемых ими в матрице. Образование квазипериодических структур происходит преимущественно на стадии формирования когерентных зародышей второй фазы и приводит к снижению свободной энергии системы, т. е. энергетически выгодно.

Следует отметить, что предварительно наклепанная бронза при отпуске упрочняется сильнее и быстрее. Бронза **БрБ2** в состоянии после закалки и отпуска имеет  $\sigma_b = 1250$  МПа и  $\delta = 3...5$  %, а после закалки, холодной пластической деформации с обжатием 30 % и отпуска  $\sigma_b = 1400$  МПа и  $\delta = 2$  %.

Легирующие **Mn, Ni, Ti, Co** позволяет уменьшить содержание бериллия до 1,7–1,9 % без заметного снижения механических свойств (**БрБНТ1,7** и **БрБНТ1,9** – содержание титана в указанных бронзах (0,1–0,25 %)). Добавки никеля, кобальта или железа способствуют замедлению скорости фазовых превращений при термической обработке, что значительно облегчает технологию закалки и старения. Кроме того, никель повышает температуру рекристаллизации, а марганец может частично заменить дорогой бериллий.

Бериллиевые бронзы применяют для пружин, мембран, пружинящих деталей в часовой промышленности (обусловлено высоким пределом упруго-

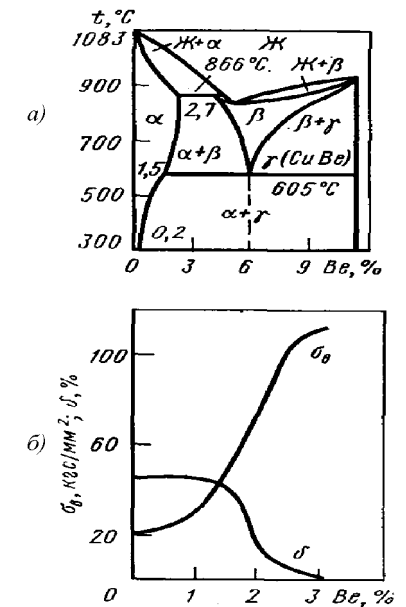


Рисунок 9 – Диаграмма состояния Cu – Be (а) и влияние Ве на механические свойства меди (б)

сти, твердостью и прочностью при повторных нагрузках). Из бериллиевых бронз изготавливают детали особо ответственного назначения: детали, работающие на износ (кулачки, шестерни, червячные передачи и др.), подшипники, работающие при высоких скоростях, больших давлениях и повышенных температурах, инструмент, не дающий искры.

### 2.1.7 Кремнистые бронзы

Кремнистые бронзы отличаются высокими механическими, упругими и антифрикционными свойствами, не теряют пластичности при низких температурах. Хорошо паяются, обрабатываются давлением при низких и высоких температурах, не магнитны и не дают искры при ударах.

Кремнистые бронзы назначаются как заменители оловянных бронз (**БрКЦ4-4** является заменителем – **БрОЦС5-5-5**). Уступая оловянной бронзе по величине усадки, кремнистая бронза превосходит ее по коррозионной стойкости, механическим свойствам ( $\sigma_B$  до 800 МПа в наклепанном состоянии), плотности отливки (меньшей ликвации). Используют также для замены бериллиевых бронз при производстве пружин, мембран и других деталей приборов, работающих в пресной и морской воде.

Кремнистые бронзы содержат до 3,0 % Si (приложение В.6). Согласно диаграмме состояния Cu – Si (рисунок 10) двойные кремнистые бронзы имеют однофазную структуру  $\alpha$ -твердого раствора кремния в меди. При увеличении содержания кремния более 3 % в структуре сплавов появляется твердая и хрупкая  $\gamma$ -фаза.

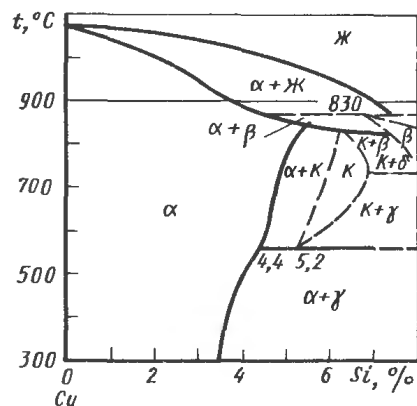


Рисунок 10 – Диаграмма состояния Cu – Si

$\sigma_B = 740$  МПа,  $\delta = 8$  %.

**Цинк** способствует улучшению литейных свойств бронз вследствие уменьшения интервала кристаллизации.

**Никель** обладает переменной растворимостью в  $\alpha$ -фазе, позволяет упрочнять никель-кремнистые бронзы термообработкой, заключающейся в закалке и последующим старением. При старении из пересыщенного  $\alpha$ -твердого раствора выделяются дисперсные частицы фазы  $Ni_2Si$ . Бронза **БрКН1-3** после закалки с 800 °С и старения при 500 °С в течение 1 ч имеет

**Марганец** повышает предел упругости. Добавки марганца и никеля повышают прочность, твердость и коррозионную стойкость кремнистых бронз.

**Свинец** улучшает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием.

Кремнистые бронзы применяют для антифрикционных деталей, пружин, подшипников, в морском судостроении, для сеток, решеток, испарителей, направляющих втулок. Для замены бериллиевых бронз при производстве пружин, мембран и других деталей приборов и радиооборудования, работающих при повышенных температурах (до 250 °С) в пресной и морской воде.

### 2.1.8 Свинцовые бронзы

Свинцовые бронзы сочетают в себе хорошие антифрикционные свойства с высокой теплопроводностью, хорошо воспринимают ударные нагрузки и работают на усталость.

Свинец полностью не растворяется в жидкой меди. При 953 °С происходит монотектическое превращение и при 327 °С эвтектическое (рисунок 11).

Так как медь и свинец в твердом состоянии не растворимы друг в друге, то эвтектика по составу почти совпадает с чистым свинцом (99,95 % Pb). Сплавы после затвердевания состоят из кристаллов меди и включений свинца, располагающихся по границам зерен или заполняющих междендритные пространства. (В сплаве Cu – Pb наблюдается расслоение жидких фаз. Чтобы не произошло расслоения, применяют перемешивание и быстрое охлаждение). Структура свинцовой бронзы обеспечивает высокие антифрикционные свойства.

Наибольшее применение нашли бронзы, содержащие 25–30 % Pb (приложение В.5). Двойные свинцовые бронзы обладают низкими механическими свойствами. Бронза, содержащая 30 % Pb (**БрС30**), характеризуется  $\sigma_B = 60$  МПа,  $\delta = 4$  %, НВ 25. Применяется для изготовления вкладышей подшипников скольжения, работающих с большими скоростями и при повышенных давлениях. (По сравнению с оловянными подшипниковыми бронзами теплопроводность бронзы **БрС30** в 4 раза больше, поэтому она хорошо отводит теплоту, возникающую при трении).

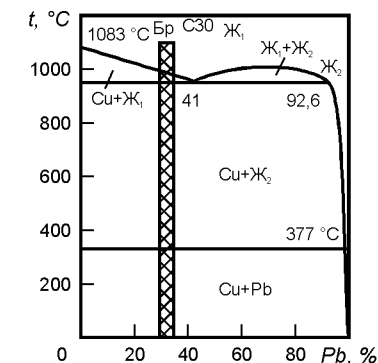


Рисунок 11 – Диаграмма состояния Cu – Pb

Свинцовые бронзы легируют **Sn, Ni, Mn**, образующими с медью твердые растворы, что повышает их прочность и твердость. Свинцовые бронзы с добавкой олова и никеля (**БрОС8-12, БрОС10-10, БрОСН10-2-3**) обладают высокими механическими свойствами ( $\sigma_{\text{в}} = 150\text{--}200$  МПа,  $\delta = 3\text{--}8$  %, НВ 55...65). Для улучшения прирабатываемости иногда на рабочую поверхность подшипника наносят микрослой свинца или индия (добавка индия увеличивает твердость свинца и особенно олова).

Свинцовые бронзы применяют для *ответственных высоконагруженных подшипников, работающих при больших скоростях (подшипники авиационных двигателей, дизелей, мощных турбин и др.)*. *Легированные свинцовые бронзы используются в виде монометаллических подшипников и втулок.*

### 2.1.9 Марганцевые бронзы

Марганцевые бронзы отличаются высокой коррозионной стойкостью и повышенной жаропрочностью. Эти сплавы содержат от 5 до 12 % Mn. Марганцевые бронзы имеют однофазную структуру твердого раствора марганца в меди, что обеспечивает им хорошую обрабатываемость давлением. Повышенная жаропрочность этих бронз объясняется тем, что марганец увеличивает температуру рекристаллизации меди.

Из двойных марганцевых бронз наибольшее промышленное применение имеет бронза **БрМц 5**, содержащая 5 % Mn. Ее прочность мало меняется при нагреве до 400 °С (с 280 до 260 МПа). Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает бронзе **БрМц 5** хорошую жидкотекучесть, что позволяет изготавливать из нее фасонные отливки (*арматуру паровых котлов*). Для придания антифрикционных свойств в марганцевые бронзы вводят свинец, для повышения прочности и твердости – никель, улучшения литейных свойств – кремний и алюминий.

### 2.1.10 Медно-никелевые сплавы

К медно-никелевым сплавам (ГОСТ 492-73) относятся сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является никель. Легирование меди никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы можно условно разделить на две группы: *конструкционные и электротехнические*. К конструкционным относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа *мельхиор, нейзильбер и куньяль*. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют **Mn, Zn, Fe, Co, Al, Pb, Cr, Ce, Mg, Li**.

Принцип маркировки таких сплавов такой же, как для латуней и бронз.

(**МНЖМц30-1-1**. Сплав содержит 29–33 % никеля и кобальта, 0,5–1 % железа, 0,5–1 % марганца, остальное медь. **МНЦ16-290-1,8** (*нейзильбер*): 15–16,7 % никеля и кобальта, 1,6–2 % свинца, 51–55 % меди, остальное цинк).

**Мельхиоры (МНЖМц30-1-1, МН 19)** имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах: в пресной и морской воде, в органических кислотах, растворах солей, атмосферных условиях. Добавки железа и марганца увеличивают стойкость медно-никелевых сплавов против ударной коррозии. Являясь твердыми растворами, мельхиоры обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии.

Мельхиор марки **МНЖМц30-1-1** обладает большой стойкостью в среде парового конденсата. По устойчивости против действия ударной (турбулентной) коррозии он превосходит практически все другие известные сплавы. Благодаря этим свойствам мельхиор (марки **МНЖМц30-1-1**) применяется для *конденсаторных труб морских судов, работающих в особо тяжелых условиях*. Мягкие конденсаторные трубы, изготавливаемые в соответствии с ГОСТ 10092–62, имеют временное сопротивление не менее 380 МПа и относительное удлинение в пределах 23 %, а полутвердые трубы 500 МПа и 10 % соответственно.

Мельхиор марки **МН19** применяется для изготовления *монеты, деталей точной механики, медицинского инструмента, сеток, столовой посуды и др.*

**Нейзильберами** называются сплавы на основе меди, в которых основными легирующими элементами являются *никель и цинк (МНЦ15-20, МНЦ16-29-1,8)*. Представляют собой твердые растворы никеля и цинка в меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств медно-никелевых сплавов, приданию им красивого серебристого цвета и удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью – не окисляются на воздухе, сравнительно устойчивы в органических кислотах и растворах солей. Нейзильберы обрабатывают давлением в горячем (за исключением свинцового нейзильбера) и холодном состоянии. Для улучшения обработки резанием в них вводят небольшое количество свинца. Временное сопротивление мягкой проволоки всех размеров из нейзильбера составляет не менее 350 МПа, проволоки полутвердой – не менее 450 МПа и проволоки твердой – не менее 550 МПа. Применяются для изготовления *медицинского инструмента, технической посуды, телефонной аппаратуры, паровой и водяной арматуры, изделий санитарной техники, точной механики, бытовой посуды и художественных изделий*.

**Куньялями** называются сплавы на основе тройной системы Cu – Ni – Al (**МНА13-3, МНА6-1,5**). Эти сплавы отличаются высокими механическими и

упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах. Обрабатываются давлением в горячем состоянии. Согласно диаграмме состояния предел растворимости  $\alpha$ -твердого раствора на основе меди резко уменьшается с понижением температуры. Поэтому кундали относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам. Для их упрочнения используют термическую обработку по режиму: закалка 900–1000 °С в воде с последующим старением при 500–600 °С в течение 1–2 ч. При старении происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием двух- или трехфазной структуры с мелкодисперсными выделениями  $\theta$ -фазы, представляющей собой соединение NiAl, или одновременно  $\theta$ - и  $\beta$ -фазы, представляющей собой соединение NiAl<sub>2</sub>.

В таблице 3 представлен химический состав в процентах конструкционных медно-никелевых сплавов.

К электротехническим медно-никелевым сплавам относятся сплавы типа ТП (**МН0,6**) и ТБ (**МН16**), термоэлектродный сплав с высоким содержанием никеля – **копель**, реостатный сплав **константан** и сплав **манганин**.

Сплав **ТП** применяется для изготовления компенсационных проводов к платина-платинородиевой термопаре, а сплав **ТБ** применяется для изготовления компенсационных проводов к платино-золотой и палладий-платинородиевой термопарам.

**Копель** – сплав, применяемый в качестве отрицательного термоэлектрода термопар хромель – копель и железо – копель, а также в виде компенсационных проводов. Копель имеет максимальную термоэлектродвижущую силу по сравнению с другими медноникелевыми сплавами такого же назначения и практически нулевой температурный коэффициент электросопротивления. Сплав является хорошим материалом для реостатов и нагревательных устройств с рабочей температурой до 600 °С. Пример сплава – **МНМц43-0,5**.

**Константан** – сплав, отличающийся высокой термоэлектродвижущей силой, малым температурным коэффициентом, постоянством электросопротивления. Сплав применяется для реостатов, термопар, нагревательных приборов с рабочей температурой до 500 °С. Температурный коэффициент электросопротивления сплава в интервале 20–100 °С составляет  $2 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Пример сплава – **МНМц40-1,5**.

**Манганин** – сплав широко применяют в качестве прецизионного материала с высоким омическим сопротивлением. В паре с медью он обладает незначительной термоэлектродвижущей силой, что позволяет почти полностью избавиться от термоэ. При 20 °С электросопротивление сплава в виде лент, полос и проволоки составляет 0,42–0,48 Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Пример сплава – **МНМц3-12**.

Таблица 3 – Химический состав конструкционных медно-никелевых сплавов

Марка сплава	Основные элементы (остальное Cu)	Примесн. не более, % (мас.)								
		Fe	Si	Mn	Pb	S	C	P	Прочие	Всего
<b>МНЖМц 30-1-1</b>	0,5–1,0 Fe; 0,5–1,0 Mn; 29,0–33,0 (Ni+Co)	–	0,15	–	0,05	0,01	0,1	0,006	–	0,4
<b>МНЖ5-1</b>	1,0–1,4 Fe; 0,3–0,8Mn; 5,0–6,5 (Ni+Co)	–	0,15	–	0,005	0,01	0,03	0,04	0,002 Bi; 0,5 Zn; 0,01 As; 0,1 Sn; 0,005 Sb;	0,7
<b>МН19</b>	18,0–20,0 (Ni+Co)	1,0	0,15	0,3	0,005	0,01	0,05	0,01	0,05 Mg; 0,002 Bi; 0,01 As; 0,005 Sb	1,5
<b>МНЦ 15-20</b>	18–22Zn; 13,5–16,5 (Ni+Co)	0,5	0,15	0,3	0,02	0,005	0,03	0,005	0,05 Mg; 0,002 Bi; 0,01 As; 0,002 Sb	0,9
<b>МНА13-3</b>	2,3–3,0 Al; 12,0–15,0 (Ni+Co)	1,0	–	0,5	0,002	–	–	–	–	1,9
<b>МНА6-1,5</b>	1,2–1,8 Al; 5,5–6,5 (Ni+Co)	0,5	–	0,2	0,002	–	–	–	–	1,1
<b>МН95-5</b>	4,4–5,0 (Ni+Co)	0,2	–	–	0,01	0,01	0,03	0,02	0,002 Bi; 0,01 As; 0,005 Sb	1,0
<b>МНЦ16-29-1,8*</b>	1,6–2,0 Pb; 15,0–16,5 (Ni+Co); 51–55 Cu	–	–	–	–	–	–	–	–	1,0

\*В свинцовом нейзильбере остальное Zn.

#### Вопросы для самоконтроля

- 1 Приведите пример маркировки меди в зависимости от чистоты изготовления.
- 2 Особенности влияния примесей на структуру и свойства меди.
- 3 Охарактеризуйте область применения меди и медных сплавов.
- 4 Классификация медных сплавов.
- 5 Влияние железа, никеля, алюминия на механические свойства латуней.

6 Влияние цинка, свинца, железа, никеля на механические свойства бронз.

7 Влияние цинка, свинца, железа, никеля на механические свойства бронз.

8 Структурно-фазовый состав оловянных бронз.

9 Влияние легирующих элементов (железа, никеля, марганца) на коррозионную стойкость и технологические характеристики алюминиевых бронз.

10 Структурно-фазовый состав и эксплуатационные характеристики бериллиевых бронз.

11 Область применения кремнистых и свинцовых бронз.

12 Эксплуатационные характеристики медно-никелевых сплавов (мельхиоров, нейзильберов, куниалей).

### 3 ЦИНК, СВИНЕЦ, ОЛОВО

#### 3.1 Цинк и его сплавы

Цинк (**Zn**) – металл голубовато-белого цвета, блестящий в изломе. Название элемента происходит от латинского слова «цинк» – бельмо, белый налет – характерная окраска его соединений. Кристаллическая решетка – гексагональная плотноупакованная, аллотропических превращений не имеет. Цинк относительно мягкий металл – мягче олова, но тверже свинца. В холодном состоянии хрупок, но при нагревании до 100–150 °С делается пластичным и его можно прокатывать в тонкие листы или протягивать в проволоку. При 200–250 °С цинк становится очень хрупким и может быть истолчен в порошок. Пластичность литого цинка после деформации значительно увеличивается. Цинк и его сплавы имеют низкий предел ползучести и значительно изменяют свои свойства и размеры при естественном старении. Электропроводность цинка равна примерно 28 %, а теплопроводность – 24 % от соответствующих показателей серебра. Под действием органических кислот, например, кислых пищевых продуктов, цинк образует токсичные соли, поэтому его не следует применять в пищевой промышленности. На цинк не действуют органические нейтральные соли.

Основные физические и механические свойства цинка приведены в таблице 4.

Применение. Основное количество производимого цинка расходуется в качестве защитного покрытия на изделиях из стали, на производство сплавов: с медью (латуни), с медью и алюминием (алюминиевая бронза), с никелем и медью (нейзильбер и мельхиор), входит в состав подшипниковых сплавов. Цинковую пыль применяют для осаждения золота и серебра из растворов при их получении гидрометаллургическим способом, в химической промышленности для очистки от меди и кадмия растворов цинка перед их электролизом. Листовой цинк применяют в производстве аккумуляторов,

для изготовления резервуаров и обшивки подводной части морских судов. Мелкие детали из цинка, отлитые под давлением, применяют в машиностроении.

В зависимости от чистоты цинк делится на марки **ЦВЧ** (99,997 % Zn), **ЦВ** (99,99 % Zn), **Ц0** (99,96 % Zn), **Ц1** (99,94 % Zn), **Ц2** (99,9 % Zn), **Ц3** (98,7 % Zn), **Ц4** (97,5 % Zn).

Влияние примесей на свойства цинка. Железо повышает твердость и хрупкость цинка. При содержании железа в цинке выше 0,2 % прокатка цинка затрудняется из-за его повышенной хрупкости.

Олово, находящееся в цинке, при его затвердевании выделяется в виде эвтектики, плавящейся при температуре 199 °С. Если в цинке одновременно присутствуют олово и свинец, образуется тройная эвтектика с температурой плавления 150 °С. Располагаясь по границам кристаллитов, эвтектика нарушает их связь, а при горячей обработке давлением такой сплав легко разрушается.

При повышенном содержании свинца, олова, кадмия или магния скорость коррозии цинка возрастает, особенно под действием горячей воды или пара.

Обычным легирующим компонентом цинковых сплавов является алюминий (до 5–10 %). В системе Al – Zn возможно образование двух твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$ .  $\beta$ -твердый раствор является практически чистым цинком (рисунок 12).  $\alpha$ -твердый раствор – твердый раствор на основе алюминия, но растворяющий до 83 % Zn. В определенном интервале температур и концентраций  $\alpha$ -твердый раствор распадается на два твердых раствора той же кристаллической структуры, богатой ( $\alpha_2$ ) и бедной ( $\alpha_1$ ) цинком.

При температуре 275 °С  $\alpha$ -твердый раствор претерпевает распад  $\alpha_2 \rightarrow \alpha_1 + \beta$ , при этом растворимость цинка в алюминии резко снижается по мере снижения температуры менее 275 °С. Структура сплавов цинка с 5–10 % Al представляет доэвтектоидный сплав  $\beta$  плюс эвтектоид ( $\alpha + \beta$ ). При быстром охлаждении сплава реакция эвтектоидного распада может не произойти. Как следствие,  $\alpha_2$ -фаза переохлаждается до низких температур. Получаемая структура не

Таблица 4 – Основные физические и механические свойства цинка

Атомная масса	65,39
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	7,133
Температура плавления, °С	419,58
Температура кипения, °С	906,2
Модуль упругости при 20 °С, ГПа	99,2
Прочность на растяжение $\sigma_b$ , МПа	70–100
Относительное удлинение, %	20–60
Твердость по Бринеллю, МПа (для отожженного образца)	412

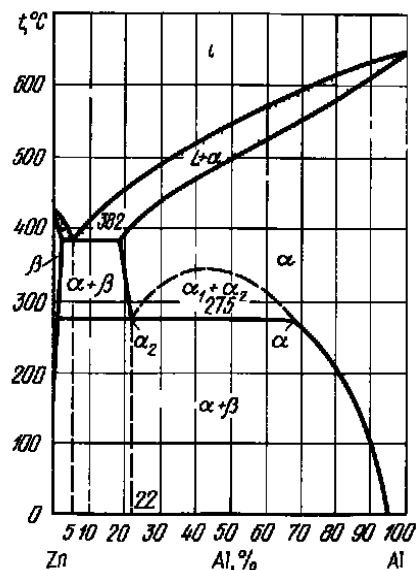


Рисунок 12 – Диаграмма состояния Zn – Al

устойчивая и претерпевает распад (распад переохлажденной  $\alpha_2$ -фазы). Это сказывается на изменении размеров изделий, что особенно нежелательно для высокоточных отливок (отливок под давлением). Добавка магния (0,1 %) уменьшает скорость распада переохлажденного  $\alpha_2$ -твердого раствора.

Сплавы цинка с медью не склонны к старению, но по механическим свойствам хуже сплавов с алюминием.

Наиболее прочными сплавами на основе цинка являются тройные сплавы Zn – Al – Cu. Структура этих сплавов в основном определяется соотношением и количеством алюминия и меди и состоит из первичных выделений  $\beta$  (чистый цинк),  $\alpha$  (раствор на базе алюминия, богатый

цинком),  $\epsilon$  (химическое соединение  $\text{CuZn}_3$ ), двойных эвтектик  $\beta + \alpha$ ,  $\epsilon + \alpha$  или  $\beta + \epsilon$  и тройной эвтектики  $\alpha + \beta + \epsilon$ . Состав некоторых промышленных цинковых сплавов приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Состав цинковых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %			Свойства		
	Al	Cu	Mn	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость НВ
ЦА4*	3,5–4,5	–	0,03–0,08	250–300	3–6	70–90
ЦАМ4-1*	3,5–4,5	0,75–1,25	0,03–0,08	270–330	2–5	80–100
ЦАМ4-3*	3,5–4,5	2>3,5	0,02–0,10	320–380	2–3	80–120
ЦМ1	–	0,8–1,2	–	200–300	30–40	45–75
ЦАМ4-1	3,7–4,3	0,6–1,0	0,02–0,15	370–440	8–12	90–105
ЦАМ10-1	9–11	0,6–1,0	0,02–0,05	400–460	8–12	90–110
ЦАМ15	14–16	–	0,02–0,04	250–400	10–40	40–110

\* Отмечены марки сплавов, предназначенные для литья под давлением. Остальное – для изготовления листов и профилей методом прокатки и прессования.

### 3.2 Свинец

Свинец (Pb) – синева-серый металл с сильным металлическим блеском в свежем срезе. Свинец является конечным продуктом распада радиоактивных элементов: U, Ac, Th. Обычный свинец является смесью свинца различного происхождения. Кристаллизуется свинец в гранцентрированной кубической решетке. Тепло- и электропроводность свинца примерно в 10 раз меньше, чем у меди (менее 10 % от теплопроводности Ag). Основные физические и механические свойства цинка приведены в таблице 6.

В сухом воздухе при нормальной температуре свинец практически не окисляется. Он хорошо сопротивляется воздействию серной кислоты (с концентрацией до 80 %) и не растворяется в плавиковой, фосфорной и хромовой кислотах, в большинстве органических кислот и щелочей. Интенсивно растворяется свинец в азотной кислоте. Мягкая питьевая вода также способна растворять свинец. Слабо действуют на свинец морская вода и рудничные воды. Газы: хлор, сероводород, сернистый газ, ангидрид серной кислоты почти не действуют на свинец, как в сухом, так и во влажном состоянии.

Под действием фтористого водорода свинец быстро корродирует.

В зависимости от чистоты свинец делится на марки С000, С00, С0, С1, С2, С3, содержание свинца в которых не менее 99,99954; 99,99852; 99,992; 99,985; 99,95; 99,9 соответственно.

Чистый свинец пластичен. Он остается пластичным материалом, как при высоких, так и низких температурах ( $\psi = 100\%$ ). С понижением температуры, характеристики прочности свинца и его сплавов увеличиваются. Удлинение повышается вследствие уменьшения локальной деформации (равномерное удлинение) (таблица 7).

Таблица 7 – Влияние температуры на механические свойства свинца (чистота 99,98 %)

Механические свойства	Температура, °C		
	-253	-196	20
$\sigma_B$ , МПа	70	44	14
$\delta$ , %	36	34	26



**Влияние примесей на свойства свинца.** Механические и физико-химические свойства свинца сильно изменяются под влиянием примесей:

**Bi** и **Zn** понижают кислотоупорность свинца;

**Na**, **Ca** и **Mg** резко повышают прочность и твердость свинца, но снижают его химическую стойкость;

**Cu** увеличивает устойчивость свинца против действия серной кислоты;

**Sb** повышает твердость и кислотоупорность свинца в отношении серной кислоты;

**Ba** и **Li** повышают твердость свинца;

**Cd**, **Te** и **Sn** повышают твердость и сопротивление усталости свинца.

Примеси сегрегируют к границам зерен даже при наличии в количествах, значительно меньших, чем их растворимость в твердом состоянии. Так, добавка одного атома золота или серебра на  $10^4$  атомов свинца заметно повышает микротвердость большеугловых границ последнего; аналогичное влияние оказывают добавки олова и цинка. При повышении температуры разность твердостей границ и тела зерен уменьшается и при  $130\text{ }^\circ\text{C}$  равна нулю. Микротвердость границ и тела зерен высокочистого свинца одинакова и равна 51 при минус  $196\text{ }^\circ\text{C}$ , 39 – при  $270\text{ }^\circ\text{C}$  и 22 МПа при  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . Добавка всего лишь одного атома золота или серебра на 1 млн атомов зонно очищенного свинца уменьшает скорость миграции границ зерен на два порядка.

Применение. *Большое количество свинца расходуют на производство аккумуляторов. Свинец широко применяют для производства различных сплавов, в том числе антифрикционных сплавов (бabbitов), свинцовых бронз, свинцовооловянных припоев, легкоплавких свинцовокадмиевооловянных сплавов, типографских сплавов, для производства фольги. Используют его также для сооружений, защищающих от радиоактивных излучений и для многих других целей.*

### 3.3 Олово

Олово (**Sn**) – серебристо-белый металл слегка голубоватого оттенка. Олово полиморфно. Достаточно ярко выражены две его модификации –  $\alpha$  (серое олово) и  $\beta$  (белое олово). Серое олово кристаллизуется в кубической решетке типа алмаза и устойчиво при температурах ниже  $13,2\text{ }^\circ\text{C}$ . Белое олово кристаллизуется в тетрагональной кристаллической решетке. Принято считать, что оно устойчиво в интервале температур  $13,2\text{--}161\text{ }^\circ\text{C}$ . При температурах выше  $161\text{ }^\circ\text{C}$  олово становится хрупким, резко изменяются его теплоемкость и другие свойства, что дает основание предполагать наличие еще одной модификации олова ( $\gamma$ ). Белое олово обладает значительно большей плотностью, чем серое. Переход обычного белого олова в модификацию  $\alpha$  сопровождается резким уменьшением плотности и увеличением объема, в

результате чего металл рассыпается в порошок («оловянная чума»). Чтобы предупредить переход белого олова в серое, слитки и полуфабрикаты из олова необходимо хранить при температуре не ниже  $+10\text{ }^\circ\text{C}$ . Примеси, особенно висмут, снижают скорость образования серого олова. В таблице 8 приведены физические и механические свойства олова.

Таблица 8 – Основные физические и механические свойства олова

Атомная масса	118,71
Плотность, г/см <sup>3</sup> :	
$\alpha$ -Sn	5,75
$\beta$ -Sn	7,28
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	231,9
Температура кипения, $^\circ\text{C}$	$\approx 2600$
Прочность на растяжение $\sigma_v$ , МПа ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ )	10–40
Относительное удлинение, %:	
литого	45–60
отожденного	80–90
Твердость по Бринеллю, МПа:	
$\alpha$ -Sn	62
$\beta$ -Sn	152

На воздухе при нормальной температуре олово устойчиво против окисления, что связано с образованием на поверхности металла плотной тонкой пленки окислов, предохраняющей его от дальнейшего окисления. С повышением температуры окисляемость олова увеличивается. В мягкой пресной и дистиллиро-

ванной воде олово не подвергается коррозии. Олово практически не реагирует с большинством органических кислот. Фруктовые соки при комнатной температуре незначительно влияют на скорость коррозии олова. Смазочные масла, бензин, керосин на скорость коррозии олова практически не влияют. Незначительно корродирует олово в спирте. В разбавленной соляной кислоте олово растворяется очень медленно, в концентрированной кислоте – быстро (особенно при нагревании) с образованием хлороловянных кислот. С разбавленной  $\text{H}_2\text{SO}_4$  олово практически не реагирует, с концентрированной серной кислотой металл взаимодействует медленно. Олово энергично взаимодействует с концентрированной  $\text{HNO}_3$ , хорошо растворяется в царской водке. С растворами щелочей олово медленно реагирует даже на холоду.

В зависимости от чистоты олово делится на марки **ОВЧ-000**, **О1 п. ч.**, **О1**, **О2**, **О3**, **О4**, содержание олова в которых не менее 99,999; 99,915; 99,90; 99,565; 98,40; 96,35 соответственно.

Применение. *Стандартом рекомендуется следующее примерное назначение олова различных марок: ОВЧ-000 – для полупроводниковой техники; О1 п. ч. – для лужения консервной жести; О1 – для лужения жести, для изготовления припоя ПОС-61; О2 – для изготовления баббита Б-83, припоя*

**ПОС-61**, оловянных труб, фольги, накладного олова, лужения кухонной утвари и котлов для варки пищи; **ОЗ** – для изготовления припоя **ПС-40** и солей; **О4** – для изготовления остальных баббитов, припоев, малооловянистых сплавов.

**Сплавы олова.** Основными легирующими элементами олова являются **Pb, Sb, Cu, Bi, Zn, Cd**. Сплавы олова характеризуются, как правило, низкой температурой плавления, относительно низкими прочностью и твердостью, высокой пластичностью. Со многими металлами образуют эвтектики, имеющие более низкую температуру плавления, чем исходные металлы: (приведены % Sn по массе, т. пл.) Bi – Sn (45 %, 139 °С), Cd – Sn (67,76 %, 177 °С), Pb – Sn (61,9 %, 183 °С), Zn – Sn (91 %, 198 °С). Твердые растворы с легирующими элементами образуют редко. Для олова характерно образование интерметаллических соединений (*станнидов*), имеющих, как правило, высокие температуры плавления:  $Zr_3Sn_2$  (т. пл. 1985 °С),  $Ti_3Sn$  (т. пл. 1663 °С),  $Pt_3Sn$  (т. пл. 1420 °С),  $Mg_2Sn$  (т. пл. 778 °С) и др.

**Применение.** Сплавы олова используют для изготовления припоев, антифрикционных сплавов, в виде покрытий и фольги.

### 3.4 Баббиты

Баббитами называют антифрикционные сплавы на основе свинца или олова. Применяются для заливки подшипников скольжения. Основные требования, предъявляемые к баббитам – низкий коэффициент трения (пара трения баббит – сталь), хорошая прирабатываемость и отсутствие схватывания со сталью. Требования выполняются при условии хорошей смазки, обеспечивающей малую изнашиваемость, как шейки вала, так и самого подшипника. Смазка хорошо удерживается в зоне трения, если структура подшипникового сплава представляет собой мягкую основу с равномерно распределенными твердыми включениями (**правило Шарпи**). Полагают, что при этом мягкая основа хорошо «прирабатывается» к трущейся поверхности, не истирая ее, а твердые включения не позволяют ей прилипнуть к поверхности и вместе с тем создают капиллярные ходы для смазочного материала.

На рисунке 13 приведена структура баббита **Б83**. Темное основное поле представляет  $\alpha$  твердый раствор сурьмы и меди в олове. В качестве твердых частиц в структуре присутствуют кристаллы  $\beta$ -фазы (SnSb) в форме кубиков и кристаллы  $Cu_3Sn$  в виде мелких звезд и игл. Соединения  $Cu_3Sn$  при кристаллизации выделяются первыми, образуют своеобразный скелет, препятствующий ликвации кристаллов  $\beta$ -фазы.

Таким образом, в данном сплаве структура согласуется с **правилом Шарпи**. Основной твердый раствор представляет мягкую и вязкую пла-

стичную фазу более прочную и твердую, чем чистое олово. Соединения SnSb и  $Cu_3Sn$  являются, наоборот, относительно твердыми фазами. Следует отметить, что согласно **правилу Шарпи**, твердые включения обязательно должны равномерно располагаться в мягкой массе и иметь размеры не очень крупные, но и не слишком мелкие, что достигается лишь в определенных условиях отливки. Для получения надлежащих качеств сплава для вкладыша в подшипнике недостаточно иметь только правильный химический состав, но необходимо строго соблюдать технологические условия его заливки и охлаждения.

Баббит должен удовлетворять следующим условиям:

1) обладать легкоплавкостью, так как наилучший способ его применения – заливка непосредственно в подшипник; однако плавкость антифрикционного сплава не должна быть очень низкой, чтобы сплав не размягчался и тем более не расплавлялся при обычном незначительном разогревании в шейке во время работы;

2) легко переплавляться и при этом не изменять своего состава от выгорания составляющих;

3) при заливке легко припаиваться к стенкам подшипника;

4) иметь хорошую теплопроводность и значительное сопротивление сжатию, износу и коррозионным воздействиям.

Баббиты обладают низкой твердостью 13–32 НВ, имеют невысокую температуру плавления 240–450 °С, повышенную размягчаемость (9–24 НВ при 100 °С), отлично прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами. В то же время у них низкое сопротивление усталости, что влияет на работоспособность подшипников.

#### 3.4.1 Оловянные баббиты

Применяются для подшипников ответственного назначения, работающих при больших скоростях и высоких (**Б88**), а также средних (**Б83**, **Б83С**) нагрузках в подшипниках турбин крупных судовых дизелей, турбокомпрессоров, опорных подшипников гребных валов, электрических и других тяжело нагруженных машин.

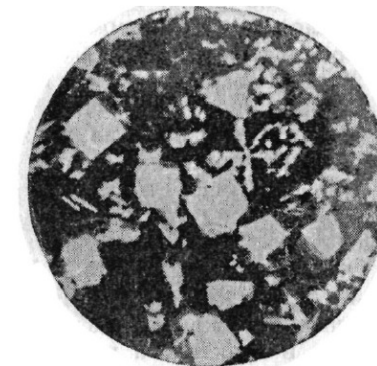


Рисунок 13 – Структура баббита Б83

Баббиты **Б88** и **Б83** являются многокомпонентными сплавами, но основой их служит система Sn – Sb (рисунок 14). Мягкая основа сплава –  $\alpha$ -

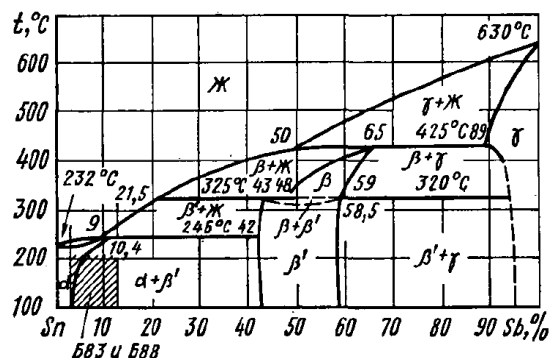


Рисунок 14 – Диаграмма состояния Sn – Sb

вводят медь. Она образует с сурьмой химическое соединение  $Cu_3Sn$ . Это соединение имеет более высокую температуру плавления и, как ранее уже было отмечено, кристаллизуется первым, образуя разветвленные дендриты, которые препятствуют ликвации кубических кристаллов  $\beta$ -фазы ( $SnSb$ ). Кристаллы  $Cu_3Sn$  образуют в баббите твердые включения, дополнительно повышающие износостойкость вкладышей.

Оловянные баббиты, благодаря вязкой и пластичной оловянной основе, в сравнении с остальными баббитами, менее склонны к усталостному разрушению.

Основным недостатком представленных сплавов является дороговизна, обусловленная большим содержанием дефицитного олова. Это ограничивает их применение в практике и приводит к замене Sn более дешевым металлом – Pb.

### 3.4.2 Свинцово-оловянные баббиты

Свинцово-оловянные баббиты (**Б16**, **БН**, **БС6**) отличаются низким содержанием олова (таблица 9). В качестве мягкой основы они имеют эвтектику, состоящую из кристаллов твердого раствора  $\alpha$  (Sn, Sb и Cu в Pb) и  $\beta$  ( $SnSb$ ) фазы. Твердыми включениями служат крупные избыточные кристаллы  $\beta$ -фазы и частицы интерметаллидных фаз  $Cu_3Sn$  и  $Cu_2Sb$ , способствующих устранению ликвации по плотности.

**Б16** применяется как заменитель **Б83** в подшипниках ответственного назначения для спокойных условий работы без ударных нагрузок (отличается повышенной хрупкостью). Из него изготавливают моторно-осевые и опорные подшипники электровозов, путевых машин, гидротурбин и др.

Антифрикционные и механические свойства баббитов повышаются при введении в их состав **Ni**, **Cd** и **As**. Никель упрочняет  $\alpha$  раствор, повышает износостойкость баббита и сопротивляемость окислению. Кадмий повышает коррозионную стойкость баббита, мышьяк улучшает жидкотекучесть и теплопрочность. Кадмий с мышьяком (сплав **БН**) образуют соединения  $AsCd$ , которые служат зародышами для формирования соединения  $SnSb$  ( $\beta$ -фазы).

**БН** применяется для заливки вкладышей подшипников дизельных двигателей, компрессоров, судовых приводов, подвергающихся ударным нагрузкам, и как замена **Б83** для заливки подшипников двигателей внутреннего сгорания, паровых турбин.

**БС6** (наиболее дешевый среди баббитов данной группы) применяется для подшипников нефтяных двигателей, металлообрабатывающих станков, трансмиссий, а также для работающих в условиях ударных нагрузок подшипников автотракторных двигателей.

Таблица 9 – Химический состав и структура баббита

Марка баббита	Содержание основных элементов, %				Прочее	Структура		Т <sub>пл.</sub> , °C	$\sigma_{в}$ , МПа
	Sn	Sb	Cu	Pb		Мягкая основа	Твердые включения		
<b>Б83</b>	Основа	10–12	5,5–6,5	–	–	Sn	SnSb, $Cu_3Sn$	380	90
<b>Б89</b>	Основа	7,25–8,25	2,5–3,5	–	–	Sn	$Cu_3Sn$	342	90
<b>Б6</b>	5–6	14–16	2,5–3,0	Основа	1,75–2,25 Cd	Pb	SnSb, $Cu_3Sn$	460	70
<b>БТ</b>	9–11	14–16	0,7–1,1	–	0,05–0,20 Te	Pb	SnSb	–	80
<b>БН</b>	9–11	13–15	1,5–2,0	Основа	0,5–0,9 As 0,75–1,25 Ni 1,25–1,75 Cd	Pb	SnSb, $SnAs_2$	400	70
<b>Б16</b>	15–17	15–17	1,5–2,0	–	–	Pb	SnSb, $Cu_3Sn$	410	80
<b>БС</b>	–	16–18	1,0–1,0	–	–	Эвтектика Pb-Sn	Sb	410	40
<b>БК</b>	–	–	–	–	0,85–1,15 Ca 0,6–0,9 Na	Pb	$Pb_2Ca$ , $Pb_3Na$	470	100

### 3.4.3 Щелочно-земельные баббиты

Щелочноземельными баббитами называются баббиты, в которых к свинцу добавляются щелочноземельные элементы – **Ca**, **Ba**, **Sr**, обычно в количестве не более 1–2 % (таблица 10). Эти элементы образуют со свинцом твердые химические соединения ( $Pb_2Ca$ ,  $Pb_3Ba$  и др.), которые и являются твердой составляющей, рассеянной на мягкой основе – почти чистом свинце. Чтобы последний сделать несколько более твердым, к нему добавляют обычно натрий в количестве нескольких десятых процента.

Главный их недостаток – малая стойкость против коррозии на воздухе, а при расплавлении – сильная окисляемость и выгорание щелочноземельных добавок, из-за чего при переплавке и заливке ими подшипников рекомендуется несколько повышать содержание выгораемых примесей.

Таблица 10 – Химический состав щелочноземельных баббитов

Марка сплава	Ca	Na	Sn	Mg	Al	Zn
<b>БКА</b>	0,95–1,15	0,7–0,9	–	–	0,05–0,20	–
<b>БК2</b>	0,3–0,55	0,2–0,4	1,5–2,1	0,06–0,11	–	–
<b>БК2Ш</b>	0,65–0,9	0,7–0,9	1,5–2,1	0,11–0,16	–	–
<b>БК2Ц</b>	0,95–1,15	0,7–0,9	1,5–2,1	–	–	0,4–0,6

Свинцовые баббиты с кальцием и натрием являются одними из самых дешевых (**БКА**, **БК2**). Кальций и натрий образуют со свинцом твердые растворы переменной растворимости, что вызывает у этих баббитов склонность к естественному старению с соответствующим повышением твердости. Нагрев до 50–75 °С ускоряет этот процесс. Растворимость кальция в свинце очень мала (при комнатной температуре около 0,01 %) и он присутствует в основном в виде химического соединения  $Pb_3Ca$ . Следует отметить, что Na и другие элементы, вводимые в сплав, повышают твердость  $\alpha$ -раствора. В литом состоянии структура представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор Na и Ca в Pb (мягкая основа) и дендриты химического соединения  $Pb_3Ca$  (твердые включения).

**БКА**, **БК2** применяется для подшипников городского и железнодорожного транспорта (подшипники вагонов, подшипники коленчатого вала, тепловозных дизелей и т. д.) горнорудных машин.

Существует множество подобных свинцово-щелочноземельных сплавов под различными названиями. К свинцу добавляется незначительное количество прочих элементов, поэтому эти сплавы недороги. Вместе с тем по качеству в некотором отношении они не уступают свинцово-сурьмянистым и даже оловянным, например, по твердости и стойкости при нагреве. Поэтому щелочноземельные баббиты находят большое применение в практике (особенно в железнодорожной технике).

### 3.4.4 Алюминиевые баббиты

Алюминиевые сплавы подразделяются на две группы. К группе I относятся сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих

( $FeAl_3$ ,  $Al_3Ni$ ,  $CuAl_2$ ,  $Mg_2Si$ ,  $AlSb$ , Si и др.) в пластичной основе металла. В сплавах группы II, наряду с твердыми составляющими, имеются мягкие включения (**АО9-1**: Cu – 1 %, Sn – 9,0 %, остальное Al; **АО3-1**: Ni – 0,4 %, Cu – 1 %, Si – 1,85 %, Sn – 3,0 %, остальное Al; **АО20-1**: Cu – 1 %, Sn – 20 %, Ti – 0,02÷0,10 %, остальное Al; **АО10С2**: Sn – 10 %, Pb – 2 %, Zn – 0,3 %, Cu – 1,5 %, Si – 1,5 % остальное Al (по сравнению со сплавом **АО20-1** обладает повышенной (до 40 %) усталостной прочностью и задиристостью)). Составы некоторых применяемых антифрикционных сплавов на алюминиевой основе представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Химический состав и свойства алюминиевых баббитов

Марка баббита	Содержание основных элементов, %						Твердые включения	T <sub>пл</sub> , °С	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
	Sb	Pb	Mg	Ni	Cu	Si				
<b>АСС6-5</b>	5–6	4–5	0,5–0,7	–	–	–	AlSb	750	80	14
<b>АСМ</b>	3,5–5	–	0,5–0,7	–	–	–	AlSb	750	90	29
<b>АН2,5</b>	–	–	–	2,7÷3,4	–	–	$Al_3Ni$	650	140	23
<b>Алькусин D</b>	–	–	–	–	7,5–9,5	1,5–1,25	$CuAl_2$	632	160	1

Сплавы на основе алюминия обладают достаточным сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью в маслах, имеют сравнительно высокую задиристость и хорошие антифрикционные свойства. Это позволяет использовать их для замены антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основе, а также свинцовистой бронзы.

Алюминиевые сплавы используют для производства монометаллических деталей (втулок, подшипников, шарниров и др.) и биметаллических подшипников. Последние изготовляют штамповкой из биметаллической полосы или ленты со слоем алюминиевого сплава, соединенного со сталью в процессе совместного пластического деформирования при прокатке. Для получения биметаллов большой толщины применяют сварку взрывом. Для монометаллических подшипников употребляют сравнительно твердые сплавы, а слой биметаллических вкладышей изготовляют из менее твердого пластичного металла.

### 3.5 Подшипниковые сплавы на основе цинка

В связи с низкой температурой плавления (около 400 °С) данные сплавы в большей степени, чем бронзы и алюминиевые сплавы, размягчаются при нагреве, благодаря чему легче прирабатываются. По этой причине подшип-

ники из цинковых сплавов меньше изнашивают сопряженные поверхности цапфы при попадании абразивов.

Цинковые сплавы являются технологичными при изготовлении как монометаллических, так и биметаллических трущихся деталей. Соединение цинкового сплава со сталью легко достигается литьем и совместной прокаткой, либо с помощью слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Подшипники и другие детали из цинковых сплавов используют в литом и обработанном давлением (прокатка, прессование) состояниях. Составы стандартных сплавов (ГОСТ 21437-91) и их свойства приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Состав и свойства сплавов на цинковой основе

Сплав	Al	Cu	Mg	Свойства сплавов		
				σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	НВ, МПа
				не менее		
<b>ЦАМ9-1,5</b>	9,0–11,0	1,0–2,0	0,03–0,06	250/300	1,0/10	950/ 850
<b>ЦАМ10-5</b>	9,0–12,0	4,0–3,5	0,03–0,06	250/350	0,4/4,0	1000/900
<i>Примечание</i> – В числителе свойства литых сплавов, в знаменателе – обработанных давлением.						

После горячей обработки давлением (250–300 °С) прочность и пластичность цинковых сплавов повышаются. Это сказывается и на сопротивлении усталости.

В литом виде сплавы применяют для монометаллических вкладышей, втулок, ползунов и т. д. Сплав **ЦАМ-10-5** применяется и для отливки биметаллических изделий со стальным корпусом. В деформированном виде сплав **ЦАМ-9,5-1,5** используют для получения биметаллических полос со сталью и алюминиевыми сплавами методом проката и последующей штамповки вкладыша. Вследствие высоких антифрикционных свойств и достаточной прочности ( $\sigma_{\sigma} = 25...40$  кгс/мм<sup>2</sup>) при 120 °С указанные сплавы могут заменять бронзы для узлов трения, температура которых не превышает 100 °С. При более высоких температурах сплавы размягчаются и налипают на вал.

### 3.6 Припой

Припой представляют собой металлы или сплавы, применяемые для получения монолитного паяного соединения путем заполнения зазора между соединяемыми деталями.

Требования, предъявляемые к припоям: 1) более низкая температура

плавления, чем материал, подвергаемый пайке; 2) способность образовывать с паяемым материалом прочную связь; 3) смачивать в жидком состоянии паяемый материал и свободно растекаться по нему при заполнении зазора между соединяемыми поверхностями; 4) температурные коэффициенты линейного расширения металла и припоя должны быть близки.

Припой различают по следующим признакам:

- 1) металлической основе и характерным компонентам (оловянные, кадмиевые, цинковые, магниевые, алюминиевые, медные, никелевые, серебряные, палладиевые, индиевые и т. п.);
- 2) технологическим особенностям (самофлюсующие, металлокерамические);
- 3) назначению (жаропрочные, кислотостойкие);
- 4) температуре плавления (тугоплавкие, среднеплавкие, легкоплавкие, особо легкоплавкие).

К *тугоплавким припоям* относят припой с температурой плавления выше 1850 °С. Пайка тугоплавких металлов твердыми высокотемпературными припоями осуществляется в атмосфере Ag или He, а также в вакууме. Нагрев производится в электропечах токами высокой частоты, пламенем плазменной горелки, электроконтактным способом.

К *легкоплавким припоям* относят свинцовые и цинковые сплавы, а также олово, кадмий и их сплавы с температурой плавления 145–450 °С.

К *особо легкоплавким припоям* относят припой, содержащие висмут, олово, свинец, кадмий, индий, галлий, цинк. Температура плавления особо легкоплавких припоев обычно колеблется от 5 до 145 °С.

Выбор припоев для пайки определяется назначением сплавов и природой их материала.

**Пайка медных сплавов.** Для пайки медных сплавов применяют особо легкоплавкие, легкоплавкие и среднеплавкие припой, не содержащие магния и алюминия. Наиболее часто для пайки медных сплавов применяют оловянно-свинцовые, меднофосфористые, серебряные и медноцинковые припой. Медь и медные сплавы склонны к образованию интерметаллидов с *алюминием, оловом, кадмием, цинком*. Во избежание этого, длительность контакта медных сплавов с жидкими припоями, содержащими эти элементы, и степень перегрева припоев должны быть минимальными (применение быстрого регулируемого нагрева мощными электропаяльниками или электроконтактным способом).

**Пайка никелевых сплавов.** Для пайки никелевых сплавов применяют серебряные, никелевые и оловянно-свинцовые припой, а также медь и латунь. Не применяют для пайки никелевых сплавов припой на основе *алюми-*

*ния, магния, титана*, так как швы из таких припоев обладают большой хрупкостью. Детали из жаропрочных и жаростойких никелевых сплавов паяют специальными никелевыми сплавами и палладиевыми припоями. Пайку никелевых сплавов чаще всего выполняют в специальных контейнерах, вакуумированных восстановительными газами и нагреваемых в печах электросопротивления или индукционных печах.

**Пайка титановых сплавов.** Для пайки титановых сплавов наиболее пригодны припои, богатые серебром. Для пайки титана с алюминием применяют алюминиевые припои. Не пригодны для пайки титановых сплавов припои на основе *цинка, меди, никеля* и многих других сплавов, так как они образуют хрупкие швы и интенсивно растворяют основной металл.

**Пайка стали.** Для пайки стали используют припои на основе олова, свинца, серебра, меди и никеля. Мало пригодны для пайки стали железные, алюминиевые, кадмиевые и цинковые припои. Алюминиевые и цинковые припои образуют на сталях хрупкие, отслаивающиеся швы, а кадмиевые припои плохо смачивают поверхность и затекают в зазор.

Серебряные и медные припои, не содержащие лития, а также никелевые припои пригодны для пайки нержавеющей стали в вакууме или в смесях сухого аргона и с газовыми флюсами. Для пайки тонкостенных конструкций из нержавеющей и жаростойких сталей, длительно работающих при повышенных температурах, применяют палладиевые припои: двухкомпонентные (палладий – никель) и трехкомпонентные (палладий – никель – марганец). Иногда в эти припои вводят добавки хрома, кремния, бериллия, золота, алюминия.

Стали некоторых марок проявляют большую склонность к хрупкому разрушению при контакте с жидкими припоями: сталь 30ХГСА – при контакте с оловом, припоем **ПОС 40** и **ПОС 61**; сталь Х18Н9Т – при контакте с серебряными припоями и т. д. Особенно подвержены хрупкому разрушению при контакте с жидкими припоями стали, в которых перед пайкой или в процессе пайки создаются растягивающие напряжения – закаленные или низкоотпущенные стали, при наклепе и т. д.

**Пайка алюминиевых сплавов.** Пайка алюминиевых сплавов производится припоями на основе алюминия, цинка, олова. Пайка алюминия и его сплавов усложняется тем, что они интенсивно окисляются на воздухе с образованием тугоплавкой окиси алюминия. Интенсивность окисления резко возрастает при нагреве. Для удаления окисной пленки используют активные флюсы, содержащие хлориды и фториды. Например, при пайке мягкими припоями применяют флюс из смеси хлористого цинка (73 %) и фтористого натрия (27 %). Для пайки тугоплавкими припоями иногда используют флюс,

состоящий из хлористого лития (25–30 %), фтористого калия (8–12 %), хлористого цинка (8–15 %) и хлористого калия (59–43 %). Для мягкой пайки применяют припой, состоящий из 55 % Sn, 25 % Zn, 20 % Cd с температурой плавления 200 °С или из 60 % Sn, 40 % Zn с температурой плавления 310 °С. В качестве твердого припоя часто используют состав из 6 % Si, 28 % Cu, остальное алюминий. Температура плавления этого припоя 525 °С. Следует отметить, что ни тщательная подготовка спаиваемых поверхностей, ни использование различных флюсов не предотвращают полностью вредное влияние пленки окиси алюминия в процессе пайки. Эффективным способом удаления окисной пленки является применение ультразвука.

**Пайка цинковых сплавов.** Цинк паяют при помощи припоев на цинковой основе, иногда свинцово-оловянными припоями. Сплавы цинка, содержащие более 2 % Al, паяют цинкооловянными припоями. В качестве флюса обычно используют раствор хлористого аммония.

**Пайка магниевых сплавов.** При пайке магниевых сплавов на спаиваемых поверхностях образуются окисные пленки. Легкоплавкие эвтектики, входящие в состав магниевых сплавов, выплавляются и, взаимодействуя с компонентами припоя, вызывают глубокое растворение (проплавление) основного металла. Кроме того, магниевые сплавы могут образовывать с компонентами припоя очень хрупкие интерметаллические соединения. Пайку магниевых сплавов ведут с использованием в качестве флюса смеси фтористых и хлористых соединений калия, натрия, лития. Наиболее эффективен флюс, состоящий из 42,5 % KCl; 10 % NaCl; 37 % LiCl; 0,5 % NaAlF<sub>6</sub>; 10 % NaF. Нагрев в процессе пайки производится пламенем горелок, работающих на бензино-воздушных смесях или бытовом газе, а также электрическим током высокой частоты. Флюсы для пайки магниевых сплавов должны быть хорошо просушены. Для предотвращения коррозии паяных швов необходимо тщательно удалять остатки флюсов сразу же после пайки.

Основные виды применяемых припоев представлены в таблицах 13–16.

Кроме оловянно-свинцовых припоев, представленных в таблице 13, применяют и оловянно-цинковые припои, содержащие 90, 70, 60 и 40 % Sn, остальное цинк (**ПОЦ-90**, **ПОЦ-70**, **ПОЦ-60** и **ПОЦ-40**). Оловянно-цинковые припои, по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями, имеют более высокую прочность, но меньшую пластичность. Наилучшим припоем из представленной серии является припой **ПОЦ-90**, имеющий самую низкую температуру начала кристаллизации –198 °С. Сплавы **ПОЦ-70**, **ПОЦ-60** и **ПОЦ-40** имеют температуру начала кристаллизации соответственно 325, 345 и 365 °С.

Таблица 13 – Химический состав и свойства припоев

Марки	Содержание, % (остальное свинец)				Температурный интервал затвердевания, °С	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
	Sn	Sb	Cd	Cu				
<i>Бессурьмянистые</i>								
<b>ПОС 90</b>	89–91				183–220	49	40	15,4
<b>ПОС61</b>	60–62				183–190	43	46	14,0
<b>ПОС 40</b>	39–41				183–238	38	52	12,5
<b>ПОС 10</b>	9–10				268–299	32	44	12,5
<b>ПОС 61М</b>	60–62			1,5–2,0	183–192	45	40	14,9
<b>ПОСК 50-18</b>	49–51		17–19		142–145	40	40	14,0
<i>Малосурьмянистые</i>								
<b>ПОССу 61-0,5</b>	60–62				183–189	45	35	13,5
<b>ПОССу 50-0,5</b>	49–51				183–216	38	62	13,2
<b>ПОССу 40-0,5</b>	39–41				183–235	40	50	13,0
<b>ПОССу 25-0,5</b>	24–26				183–256	36	45	13,6
<i>Сурьмянистые</i>								
<b>ПООСу 95-5</b>	94–96	4,0–5,0			234–240	40	46	18,0
<b>ПООСу 25-2</b>	24–26	1,5–2,0			185–260	38	35	–
<b>ПОССу 8-3</b>	7–8	2,0–3,0			240–290	40	43	12,8

*Примечание* – В оловянно-свинцовые припой сурьма добавляется для упрочнения (увеличивая прочность припоя, сурьма делает его хрупким и ухудшает его растекание на меди). Такие сплавы применяют для пайки меди и медных сплавов, стали и железа. Припой с сурьмой не рекомендуется применять для пайки цинка и оцинкованного железа из-за высокой хрупкости таких паяных швов (при пайке цинка содержание сурьмы в припое не должно превышать 0,25 %). Соединения, выполненные оловянно-свинцовыми припоями, могут работать от температур, близких к абсолютному нулю, до +100 °С. При более высоких температурах швы из оловянно-свинцовых припоев становятся непрочными.

Таблица 14 – Химический состав и назначение медно-цинковых припоев

Марка припоя	Содержание*, %			Примерное назначение
	Cu	Fe	Pb	
<b>ПМЦ 36</b>	36±2	0,1	0,5	Для пайки латуни, содержащей до 68 % меди
<b>ПМЦ 48</b>	48±2	0,1	0,5	Для пайки медных сплавов, содержащих меди свыше 68 %
<b>ПМЦ 54</b>	54±2	0,1	0,5	Для пайки меди, томпака, бронзы и стали.

\* Остальное цинк.

Таблица 15 – Состав и свойства свинцово-серебряных припоев

Марка припоя	Содержание*, %		Свойства	
	Ag	Sn	Температурный интервал затвердевания, °С	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа
<b>ПСр-1,5</b>	1,3–1,7	0,75–1,25	309–309	–
<b>ПСр-2,5</b>	2,3–2,7	–	304–304	33
<b>ПСр-3</b>	2,7–3,3	–	300–305	31

\* Основа указанных припоев – свинец, содержание примесей ≤ 0,5 %

Таблица 16 – Состав и свойства серебряных припоев

Марка припоя	Содержание*, %			Температурный интервал затвердевания, °С
	Cu	Zn	$\Sigma_{\text{прим}}$ (не более)	
<b>ПСр-72</b>	27,3–28,5	–	0,25	779–779
<b>ПСр-50</b>	49,3–50,5	–	0,25	779–850
<b>ПСр-45</b>	29,5–0,5	24–26,5	0,50	660–725
<b>ПСр-25</b>	39–41	33,5–37	0,50	745–775
<b>ПСр-10</b>	52–54	35,5–39	0,50	815–850

\* Основа указанных припоев – серебро. Среднее его содержание показывает марочное обозначение.

### Вопросы для самоконтроля

- 1 Цинк, олово, свинец. Основные физические, химические и механические свойства. Область применения.
- 2 Объясните сущность явления «оловянная чума».
- 3 Баббиты. Правило Шарпи. Основные требования, предъявляемые к баббитам.
- 4 Оловянные баббиты. Маркировка. Структура сплавов. С какой целью при производстве оловянных баббитов в сплав добавляют медь. Область применения оловянных баббитов.
- 5 Свинцово-оловянные баббиты. Маркировка. Структура сплавов. Область применения.
- 6 Щелочноземельные баббиты. Маркировка. Структура сплавов. Область применения.
- 7 Алюминиевые подшипниковые сплавы. Структура сплавов. Преимущества и недостатки в сравнении с антифрикционными сплавами на основе свинца или олова.
- 8 Маркировка алюминиевых подшипниковых сплавов. Область применения.
- 9 Подшипниковые сплавы на основе цинка. Преимущества и недостатки в сравнении с другими антифрикционными сплавами. Область применения.
- 10 Припой. Классификация припоев. Требования, предъявляемые к припоям.
- 11 Пайка медных сплавов. По какой причине пайку медных сплавов рекомендуют проводить с применением мощных электропаяльников с быстрым регулируемым

нагревом или электроконтактным способом.

12 Пайка никелевых сплавов. Применяемые припой.

13 Пайка стали. Применяемые припой.

14 Пайка алюминиевых сплавов. Основная сложность, возникающая при пайке алюминиевых сплавов. С какой целью рекомендуют осуществлять пайку с применением ультразвука?

15 Пайка цинковых, магниевых и титановых сплавов.

16 Приведите пример оловянно-цинковых и серебряных припоев. Область их применения.

#### 4 МАГНИЙ И СПЛАВЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

**Магний (Mg)** – щелочноземельный металл II группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева, порядковый номер 12, атомная масса 24,305.

Магний – металл серебристо-белого цвета. Он не имеет аллотропических превращений, кристаллизуется в плотноупакованной гексагональной решетке с периодом  $a = 0,3210$  нм и  $c = 0,5200$  нм. Температура плавления – 650 °С, температура кипения – 1105 °С, плотность – 1740 кг/м<sup>3</sup>.

В зависимости от химического состава установлены следующие марки магния: **Mg96** (99,96 % Mg), **Mg95** (99,95 % Mg), **Mg90** (99,90 % Mg).

Главными недостатками магния как технического металла являются низкая коррозионная и химическая стойкость. Он усиленно корродирует в пресной и морской воде, разрушается многими кислотами и растворами солей. При нагревании магний активно окисляется и легко воспламеняется, особенно в виде порошка или мелкой стружки.

Литой магний имеет крупнокристаллическую структуру и низкие механические свойства:  $\sigma_b = 115$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 25$  МПа,  $\delta = 8$  %; твердость 30 НВ. Пластическая деформация и модифицирование цирконием, приводящие к измельчению структуры, несколько улучшают механические свойства:  $\sigma_b = 260$  МПа;  $\delta = 9$  % (холоднокатаный лист). Низкая пластичность магния при комнатной температуре объясняется тем, что в металлах с гексагональной кристаллической решеткой скольжение происходит только по базисным плоскостям. Повышение температуры приводит к появлению новых плоскостей скольжения и двойникования и увеличению пластичности, поэтому обработка давлением магния проводится при температурах 350–450 °С в состоянии наибольшей пластичности.

Главное достоинство магния как технического металла – малая удельная масса, почти в четыре раза меньшая, чем у меди и железа, и значительно меньшая, чем у алюминия.

*Чистый магний применяется в пиротехнике, в химической промышленности для синтеза органических препаратов, в металлургии различных металлов и сплавов – как раскислитель, восстановитель и легирующий элемент.*

#### 4.1 Магниевые сплавы

Преимуществом магниевых сплавов является высокая удельная прочность. Предел прочности отдельных сплавов достигает 350–400 МПа при плотности менее 2000 кг/м<sup>3</sup>.

**Легирующие элементы.** Основными легирующими элементами магниевых сплавов являются **Al, Zn, Mn**. Для дополнительного легирования используют **Zr, Cd, Ce** и др. (в большинстве случаев применяют сплавы магния с алюминием (до 10 %), цинком (до 5–6 %), марганцем (до 2,5 %), цирконием (до 1,5 %)).

Механические свойства сплавов магния при температуре 20–25 °С улучшаются при легировании **Al, Zn, Zr** (рисунок 15, а), а при повышенной температуре – добавкой **Ce, Nd, Th** (рисунок 15, б).

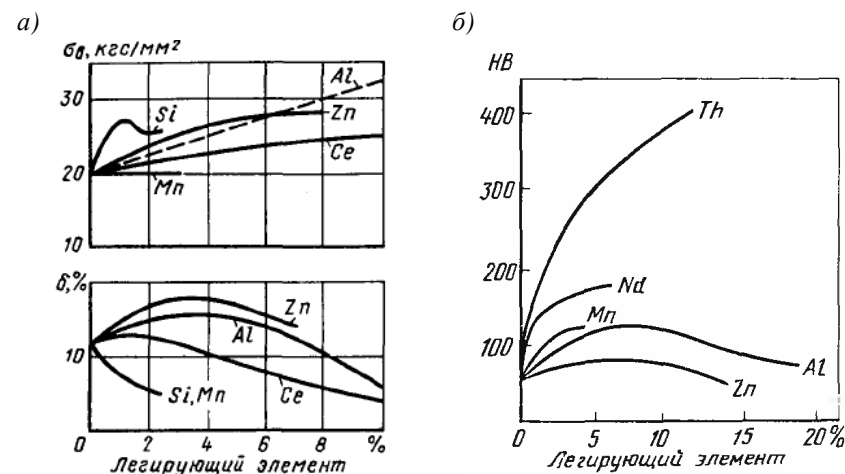


Рисунок 15 – Влияние легирующих элементов на механические свойства магния при 20 °С (а), 250 °С (б)

Добавка 0,5–0,7 % **Zr** уменьшает размер зерна магния в 80–100 раз. Данное явление объясняется структурным и размерным соответствием кристаллических решеток Mg и Zr<sub>α</sub> (ГПУ,  $a = 0,3223$  нм,  $c = 0,5123$  нм).

**Zr и Mn** способствуют значительному уменьшению влияния примесей Fe и Ni на свойства сплавов (улучшают коррозионную стойкость). Они образуют с этими элементами промежуточные фазы большой плотности, которые при кри-



сталлизации выпадают на дно тигля, очищая сплав от вредных примесей.

Для повышения предела ползучести, длительной прочности и твердости при повышенных температурах жаропрочные сплавы легируют **Nd, Ce, Th**, образующими фазы соответственно: **Mg<sub>3</sub>Nd, Mg<sub>3</sub>Ce, Mg<sub>3</sub>Th**. Лучшей жаропрочностью среди литейных сплавов обладают сплавы с торием.

**Ве** в количестве 0,005–0,012 % уменьшает окисляемость магния при плавке, литье и термической обработке.

По технологии изготовления магниевые сплавы подразделяют на литейные (**Мл**) и деформируемые (**МА**) (таблица 17), по механическим свойствам – на сплавы невысокой и средней прочности, высокопрочные и жаропрочные, по склонности к упрочнению с помощью термической обработки – на сплавы, упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой (приложения В.7, В.8).

Таблица 17 – Химический состав и механические свойства магниевых сплавов

Марка сплава	Содержание, %			Прочее	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
	Mn	Zn	Al				
<i>Деформируемые сплавы</i>							
<b>МА1</b>	1,3–2,5	–	–	–	240	140	4
<b>МА3</b>	0,15–0,5	0,2–0,8	3,0–4,0	–	270	170	10
<b>МА5*</b>	0,15–0,5	0,2–0,8	7,8–9,2	–	320	220	14
<b>МА8</b>	1,3–2,2	–	–	0,15–0,35 Ce	260	150	7
<b>МА11*</b>	1,5–2,5	–	–	2,5–4,0 Nd 0,1–0,25 Ni	280	140	10
<b>МА13*</b>	0,4–0,8	–	–	1,7–2,5 Th	220	160	4
<b>МА14*</b> <b>(ВМ65*)</b>	–	5,0–6,0	–	0,3–0,9 Zr	350	300	9
<b>ВМД1</b>	1,2–2,0	–	–	2,5–3,5 Th	300	250	5
<i>Литейные сплавы</i>							
<b>Мл2</b>	1,0–2,0	–	–	–	100	30	10
<b>Мл3</b>	0,15–0,5	0,5–1,5	2,5–3,5	–	180	55	8
<b>Мл4*</b>	0,15–0,5	2,0–3,0	5,0–7,0	–	255	115	6
<b>Мл5*</b>	0,15–0,5	0,2–0,8	7,5–9,0	–	255	120	6
<b>Мл6*</b>	0,1–0,5	0,6–1,2	9,0–10,2	–	260	140	1
<b>Мл12*</b>	–	4,0–5,0	–	0,6–1,1 Zr	270	160	6

\* Свойства приведены после закалки и старения, для других деформируемых сплавов – в горячепрессованном состоянии, для литейных – в литом состоянии.

Магниевые сплавы хорошо обрабатываются резанием (лучше, чем стали, алюминиевые и медные сплавы), легко шлифуются и полируются. Высокие скорости резания и небольшой расход энергии способствует снижению

стоимости обработки резанием деталей из магниевых сплавов по сравнению с другими сплавами. Магниевые сплавы удовлетворительно свариваются контактной роликовой и дуговой сваркой. Прочность сварных швов деформируемых сплавов составляет 90 % от прочности основного металла.

Недостатками магниевых сплавов являются низкая коррозионная стойкость, малый модуль упругости, плохие литейные свойства, склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при их изготовлении.

#### 4.2 Термическая обработка магниевых сплавов

Ряд магниевых сплавов может быть упрочнен закалкой и старением. Способность сплавов к упрочнению связана с изменением растворимости компонентов сплавов (Al, Zn, Zr и др.) в магний в зависимости от температуры. Нагрев приводит к растворению избыточных фаз (MgZn<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Mg<sub>4</sub>, Mg<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Zn<sub>2</sub> и т. д.) и получению после закалки пересыщенного твердого раствора. В процессе старения происходит выделение упрочняющих фаз. Особенностью магниевых сплавов является малая скорость диффузионных процессов, поэтому фазовые превращения в них протекают медленно. Это требует больших выдержек при нагреве под закалку (4–24 ч) и искусственном старении (16–24 ч). По этой же причине возможна закалка на воздухе. Магниевые сплавы закаляются при охлаждении отливок или изделий после горячей обработки давлением на воздухе, а следовательно, они могут упрочняться при искусственном старении без предварительной закалки. *Наибольшее упрочнение термической обработкой достигается у сплавов магния, легированных неодимом (Nd). В этом случае при распаде пересыщенного твердого раствора в зависимости от температуры и времени старения могут образовываться зоны Гинье-Престона, метастабильные и стабильные упрочняющие фазы, тогда как в других сплавах (например, системы Mg – Al – Zn) при старении сразу появляются стабильные фазы.*

Старение литых сплавов проводят при 300–315 °С, а деформированных при 175–200 °С. Прочность магниевых сплавов в процессе старения можно повысить только на 20–35 %. Пластичность сплавов при этом уменьшается, поэтому нередко ограничиваются только гомогенизацией (закалкой), улучшающей механические свойства сплавов. Естественное старение не вызывает изменения структуры и свойств магниевых сплавов.

В зависимости от состава сплава закалку осуществляют при нагреве до 380–540 °С и проводят последующее старение при 150–200 °С.

Слитки и фасонные отливки часто подвергают гомогенизирующему отжигу, обычно при 400–420 °С в течение 15–30 ч, для устранения ликвации

легирующих элементов. При гомогенизации магниевых сплавов избыточные фазы, выделившиеся по границам зерен, растворяются, и состав по объему зерен выравнивается, что облегчает обработку давлением и повышает механические свойства.

Для устранения наклепа магниевые сплавы подвергают рекристаллизационному отжигу при  $\sim 350$  °С.

Временное сопротивление и особенно предел текучести магниевых сплавов значительно повышается при проведении термомеханической обработки, заключающейся в пластическом деформировании закаленного сплава перед его старением.

#### 4.3 Литейные магниевые сплавы

Сплав **Мл2** (низкопрочный) обладает хорошей герметичностью, свариваемостью и коррозионной стойкостью (после оксидирования). Преимущественно однофазная структура твердого раствора является причиной низких литейных свойств сплава. Термической обработкой сплав не упрочняется.

*Сплав Мл2 применяется для ненагруженных деталей несложной формы, от которых требуется повышенная герметичность, коррозионная стойкость и свариваемость (например, арматура).*

Сплав **Мл3** (средней прочности) обладает хорошей герметичностью. По химическому составу он близок деформируемому сплаву **МА2**, имеет аналогичную структуру твердого раствора и  $\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$ -фазы. Упрочнение при термической обработке очень незначительно из-за малого количества  $\gamma$ -фазы.

*Сплав применяется для средненагруженных деталей простой формы повышенной герметичности (арматура, детали корпусов насосов).*

Сплав **Мл5** (высокопрочный) отличается от сплава **Мл3** повышенным содержанием алюминия и поэтому большим количеством упрочняющей  $\gamma$ -фазы. При неравновесной кристаллизации в структуре сплава появляется эвтектика. Среди магниевых сплавов **Мл5** обладает лучшими литейными свойствами. Большое количество выделений  $\gamma$ -фазы по границам зерен твердого раствора в литом состоянии делает сплав хрупким, поэтому он подвергается гомогенизации при 420 °С в течение 12–24 ч. Из-за малой скорости диффузии алюминия в магнии охлаждение на воздухе после гомогенизации приводит к закалке и значительному упрочнению. Старение (170 °С, 16 ч) мало повышает предел прочности, но значительно увеличивает предел текучести сплава **Мл5**.

Сплав **Мл12** характеризуется высокими механическими свойствами при комнатной и повышенных температурах, хорошими литейными свойствами, высокой коррозионной стойкостью.

*Сплавы Мл5 и Мл12 применяют для высоконагруженных деталей самолетов и авиадвигателей (корпусы компрессоров и приборов, картеры, фермы шасси, колонки управления, коробки передач, маслопомпы, тормозные барабаны).*

Для защиты от коррозии изделия из магниевых сплавов подвергают оксидированию с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

*Следует отметить, что чем мельче зерно, тем выше механические свойства литых магниевых сплавов. Измельчение зерна сплавов, содержащих алюминий, достигается перегревом расплава или модифицированием его добавкой мела или магнезита (до 1 % от массы шихты). В обоих случаях образуются нерастворимые частицы ( $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ), играющие роль зародышей для кристаллизации твердого раствора.*

*При выплавке и литье магниевых сплавов применяют специальные меры предосторожности для предотвращения загорания сплава. Плавку ведут в железных тиглях под слоем флюса, а при разливке струю металла посыпают серой, образующей сернистый газ, предохраняющий металл от воспламенения. В формовочную землю для уменьшения окисления металла добавляют специальные присадки, например, фтористые соли алюминия. Для получения качественного металла его сильно перегревают.*

#### 4.4 Деформируемые магниевые сплавы

Эти сплавы изготавливают в виде горячекатаных прутков, полос, профилей, а также поковок и штамповок. Магниевые сплавы, имеющие гексагональную решетку, как ранее было уже отмечено, при низких температурах малопластичны, так как сдвиг происходит только по плоскостям базиса (0001). При нагреве до 200–300 °С появляются дополнительные плоскости скольжения (1011) и (1120), и пластичность возрастает, поэтому обработку давлением ведут при повышенных температурах. Чем меньше скорость деформации, тем выше технологическая пластичность магниевых сплавов. Прессование в зависимости от состава сплава ведут при 300–480 °С, а прокатку в интервале температур от 340–440 °С (начало) до 225–250 °С (конец). Штамповку проводят в интервале температур 480–280 °С в закрытых штампах под прессами. Вследствие текстуры деформации полуфабрикаты (листы, прутки, профили и др.) из магниевых сплавов обнаруживают сильную анизотропию механических свойств. Холодная прокатка требует частых промежуточных рекристаллизационных отжигов.

Сплав **МА1** (пониженной прочности) имеет структуру твердого раствора и небольшое количество мелких включений  $\beta(\text{Mn})$ -фазы. Сплав отличается относительно высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемо-

стью, имеет удовлетворительную пластичность при комнатных и хорошую при повышенных температурах. В горячем состоянии из него изготавливаются все виды полуфабрикатов: листы, профили, штампованные заготовки и др.

*Сплав МА1 применяется для малонагруженных деталей: сварных масло- и бензобаков, арматуры топливных и масляных систем.* Сплав МА8 (средней прочности) отличается от сплава МА1 наличием 0,15–0,35 % Се, который улучшает механические свойства за счет дополнительного легирования твердого раствора и образования тонкодисперсной фазы  $Mg_9Se$ . При этом сохраняются основные преимущества сплава МА1: высокая по сравнению с другими магниевыми сплавами коррозионная стойкость и хорошая свариваемость.

*Сплав МА8 применяют в отожженном состоянии для средненагруженных деталей самолета (обшивок элеронов, закрылок, рулей).*

Сплав МА2 относится к системе Mg – Al – Zn. Наличие алюминия и цинка обеспечивает ему хорошую технологическую пластичность, что позволяет изготавливать из него кованные и штампованные детали сложной формы (например, *крыльчатки и жалюзи капота самолета*). Из-за низкого содержания алюминия в сплаве и поэтому небольшого количества фазы  $Mg_4Al_3$  в его структуре сплав МА2 мало упрочняется при закалке и старении. Сплав применяется в горячепрессованном или отожженном состоянии. Недостатком сплава является склонность к коррозии под напряжением.

Сплавы МА5 и ВМ65 являются *высокопрочными магниевыми сплавами*. Данные сплавы подвергаются упрочняющей термической обработке. Сплав МА5 с повышенным содержанием алюминия упрочняется при старении благодаря фазе  $Mg_4Al_3$ , а ВМ65 с повышенным содержанием цинка – за счет фазы  $MgZn$ . Более высокий предел прочности и, особенно предел текучести при хорошей пластичности сплава ВМ65 объясняется модифицирующим действием циркония, который также благоприятно влияет и на коррозионную стойкость. Недостаток сплава ВМ65 – склонность к образованию трещин, что затрудняет горячую прокатку и сварку сплава.

*Сплав ВМ65-1 применяется для несвариваемых сильно нагруженных деталей (обшивки самолетов, деталей грузоподъемных машин, автомобилей, ткацких станков и др.).*

Сплавы МА11, МА13 и ВМД1 являются жаропрочными магниевыми сплавами. Высокие механические свойства при повышенных температурах сплавы имеют благодаря наличию дисперсных включений интерметаллидных фаз  $Mg_9Nd$ ,  $Mg_9Se$  и  $Mg_5Th$ , не склонных к коагуляции при высоких температурах. Сплавы характеризуются высоким пределом ползучести, длительной прочностью и твердостью при повышенных температурах. Эти сплавы хорошо деформируются, не склонны к коррозии под напряжением,

удовлетворительно свариваются. Сплавы, содержащие Nd и Th, подвергаются упрочняющей термической обработке, а также применяются в горячепрессованном или отожженном состоянии.

*Применение. МА13 и ВМД1 применяются в ракетной технике для деталей, работающих длительно при температурах до 350 °С и кратковременно при температурах до 400 °С (корпуса ракет, обтекатели, корпуса насосов, стабилизаторы и др.).*

### Вопросы для самоконтроля

- 1 Магний. Основные физические, химические и механические свойства металла. Область применения.
- 2 Основные легирующие элементы магниевых сплавов. Классификация магниевых сплавов. Достоинства и недостатки магниевых сплавов.
- 3 Причина повышения механических свойств магниевых сплавов в процессе термической обработки.
- 4 Закалка, старение, гомогенизирующий отжиг магниевых сплавов. Назначение и реализация на практике данных видов термической обработки.
- 5 Литейные магниевые сплавы. Маркировка. Область применения.
- 6 Деформируемые магниевые сплавы. Маркировка. Область применения.

## 5 ТИТАН И СПЛАВЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

**Титан (Ti)** – элемент IV группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Порядковый номер – 22, атомная масса – 47,88. Температура плавления  $1665 \pm 5$  °С.

Титан – металл серебристо-белого цвета, обладает полиморфизмом: низкотемпературная модификация  $Ti_\alpha$  имеет гексагональную плотноупакованную решетку с периодами  $a = 2,951 \text{ \AA}$ ,  $c = 4,697 \text{ \AA}$ ; высокотемпературная –  $Ti_\beta$  – решетку объемно-центрированного куба с периодом  $3,269 \text{ \AA}$  (при 900 °С). Плотность  $Ti_\alpha$  титана составляет  $4505 \text{ кг/м}^3$ ,  $Ti_\beta$  –  $4320 \text{ кг/м}^3$  при 900 °С. Температура перехода  $\alpha \leftrightarrow \beta$  равна 882 °С. Коэффициент линейного расширения титана в интервале температур 20–100 °С равен  $8,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Модуль упругости титана  $E_{упр} = 112 \text{ ГПа}$  (железа – 214, алюминия – 71, меди – 121, магния – 45 ГПа). Низкий модуль упругости титана затрудняет изготовление жестких конструкций.

Механические свойства титана сильно зависят от наличия примесей, особенно водорода, кислорода, азота и углерода, которые образуют с титаном твердые растворы внедрения и промежуточные фазы: гидриды, окислы, нитриды и карбиды (рисунок 16). Небольшое количество кислорода, азота и

углерода повышает твердость, предел прочности и предел текучести, но при этом значительно уменьшается пластичность, снижается коррозионная стойкость, ухудшается свариваемость, способность к пайке и штампуемость. Поэтому содержание каждой из этих примесей ограничивают – не более 0,02–0,06 % (мас.).

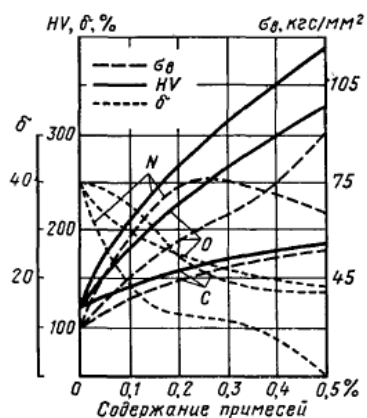


Рисунок 16 – Влияние примесей (N, O, C) на механические свойства титана

Чистый титан не является жаропрочным материалом. При повышении температуры до 250 °С предел прочности снижается почти в 2 раза. Титан обладает склонностью к ползучести даже при комнатной температуре. Предел ползучести титана составляет ~60 % от предела текучести. Наличие примесей кислорода, азота, а также пластическая деформация повышают сопротивление ползучести. Титан обладает высокой удельной прочностью не только при комнатной температуре, но и в условиях глубокого холода. При температуре жидкого гелия (~ -270 °С) предел прочности титана равен 1250 МПа. Если содержание водорода мало (менее 0,002 %), титан сохраняет высокую пластичность (относительное удлинение 15–20 %).

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана (рисунок 17). При степени деформации 60–70 % прочность увеличивается почти в 2 раза. Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг при температуре 650–750 °С.

Технический титан изготавливают марок: **BT1-00** (99,53 % Ti) и **BT1-0** (99,48 % Ti). Механические свойства технического титана **BT1-00** и **BT1-0**:  $\sigma_B = 300 \dots 550$  МПа и  $\delta = 20 \dots 30$  %.

В связи с тем, что на поверхности титана легко образуется стойкая оксидная пленка, титан обладает высокой сопротивляемостью коррозии в пресной и морской воде, в разбавленных растворах  $H_2SO_4$ , HCl и щелочей, в

Особо вредная примесь в титане и его однофазных  $\alpha$ -сплавах – водород. Присутствуя в очень незначительном количестве, водород выделяется в виде тонких хрупких пластин гидридной фазы на границах зерен, что приводит к охрупчиванию титана. Водородная хрупкость наиболее опасна в сварных конструкциях из-за наличия в них внутренних напряжений. Допустимое содержание водорода в техническом титане находится в пределах 0,008–0,012 %.

Чистый титан не является жаропрочным материалом. При повышении температуры до 250 °С предел

растворах хлоридов и в атмосфере влажного  $Cl_2$ . Титан устойчив против кавитационной коррозии и под напряжением. В  $HNO_3$  пассивируется.

При повышении температуры титан активно поглощает газы: с 50–70 °С – водород, свыше 400–500 °С – кислород, с 600–700 °С – азот, окись углерода и углекислый газ. Способность к газопоглощению титана при повышении температуры используют в радио- и электронной промышленности для повышения вакуума электронных ламп, в вакуумной технике – газоразрядные насосы и др.

Технический титан хорошо обрабатывается под давлением, сваривается в среде аргона. Сварной шов обладает хорошим сочетанием прочности и пластичности. Прочность шва составляет 90 % от прочности основного металла. Титан плохо обрабатывается резанием, налипает на инструмент и быстро его изнашивает. Для обработки титана требуются инструменты из быстрорежущей стали и твердых сплавов, малые скорости резания при большой подаче и глубине резания и интенсивное охлаждение. К недостатку титана относятся также низкие антифрикционные свойства.

Применение технического титана как конструкционного материала в общем машиностроении ограничено из-за его высокой стоимости, а в авиации и ракетостроении из-за невысокой жаропрочности. Титан широко применяется в химической промышленности для изделий, работающих в сильно агрессивных средах (компрессоры и насосы для перекачки серной, соляной кислот и их солей). Способность не образовывать накипь и высокая химическая стойкость позволяют изготавливать из титана, несмотря на низкую теплопроводность, тонкостенные теплообменники. Благодаря высокой коррозионной стойкости в морской воде, а также отсутствию налипания ракушек, он используется в судостроении для обшивки морских судов, подводных лодок, изготовления гребных валов и др. Все большее применение находит титан в электронике, ядерной и других областях техники.

**Влияние легирующих элементов на структуру и свойства титановых сплавов.** По влиянию на полиморфизм титана все легирующие элементы подразделяются на три группы:  **$\alpha$ -стабилизаторы**,  **$\beta$ -стабилизаторы** и **нейтральные элементы**.

**$\alpha$ -стабилизаторы** (Al, O, N) повышают температуру полиморфного превращения, расширяя область твердых растворов на основе  $Ti_\alpha$ . Практическое

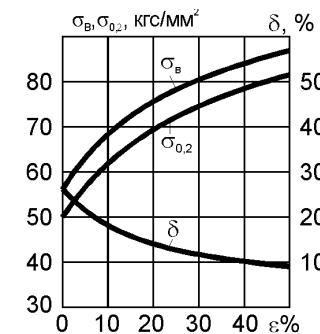


Рисунок 17 – Изменение механических свойств титана в зависимости от степени пластической деформации

значение для легирования титана имеет только алюминий, так как кислород и азот сильно охрупчивают титановые сплавы. Алюминий – широко распространенный, доступный и дешевый металл. Введение его в титановые сплавы уменьшает их плотность и склонность к водородной хрупкости, повышает модуль упругости, прочность, жаропрочность и жаростойкость.

**β-стабилизаторы (Mo, V, Ta, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu)** снижают температуру полиморфного превращения титана, расширяя область твердых растворов на основе Ti<sub>β</sub>. Они образуют с титаном диаграммы состояния двух типов. Некоторые из β-стабилизаторов (**Mo, V, Ta**), имеющих, как и Ti<sub>β</sub>, кристаллическую решетку объемноцентрированного куба, неограниченно растворяются в Ti<sub>β</sub>. Другие р-стабилизаторы, например **Cr, Mn, Fe, Ni, Cu**, образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным распадом.

Большинство легирующих элементов, являющихся β-стабилизаторами, повышают прочность, жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов, несколько снижая их пластичность. Кроме того они способствуют упрочнению сплавов с помощью термической обработки. Наиболее благоприятное влияние на свойства титановых сплавов оказывают **Mo, V, Cr, Mn**.

**Нейтральные элементы (Sn, Zr, Hf, Th)** мало влияют на температуру полиморфного превращения. Наибольшее практическое значение имеют олово и цирконий. Олово упрочняет титановые сплавы без заметного снижения пластичности, значительно повышает их жаропрочность, цирконий увеличивает предел ползучести и длительную прочность.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяют на деформируемые и литейные, по механическим свойствам – на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности (*приложении В.9*). По способности упрочняться с помощью термической обработки они делятся на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой, по структуре в отожженном состоянии – на α-, псевдо-α-, (α + β)-, псевдо-β- и β-сплавы.

### 5.1 Термическая обработка титановых сплавов

Титановые сплавы в основном подвергают отжигу, закалке и старению, а также химико-термической обработке.

**Отжиг** проводится главным образом после холодной деформации для снятия наклепа. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации, но не должна превышать границу перехода в β-состояние во избежание быстрого роста зерна и соответственно уменьшению конструктивной прочности детали. Поэтому отжиг α-сплавов проводят при 800–850 °С, а (α + β)-сплавов при 750–800 °С. В последние годы все шире применяется ва-

куумный отжиг, который позволяет уменьшить содержание водорода в титановых сплавах, что приводит к существенному повышению вязкости разрушения, уменьшению склонности к замедленному разрушению и коррозионному растрескиванию.

При охлаждении со скоростью выше критической (**закалка**) сплавов, нагретых до области фазы, протекает мартенситное превращение в интервале температур M<sub>n</sub>-M<sub>к</sub> (рисунок 18). Чем выше содержание в сплаве β-стабилизаторов, тем ниже температура мартенситного превращения M<sub>n</sub> и M<sub>к</sub>. После закалки малолегированных сплавов образуется α'-фаза (рисунок 18).

Мартенситная α'-фаза представляет собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в α-титане. Она имеет несколько искаженную гексагональную решетку и характерное для мартенсита игольчатое строение. При концентрации легирующего элемента выше точки С (см. рисунок 18) возникает мартенситная α''-фаза с ромбической решеткой. Появление α''-фазы вызывает уменьшение твердости и прочности сплавов и увеличение пластичности.

После закалки сплавов, имеющих концентрацию β-стабилизатора более C<sub>к</sub>, образуются α'- и β-фазы, а выше C<sub>к</sub> – только метастабильная β-фаза. В β-фазе, как это видно из рисунка 18, может образоваться мартенситная ω-фаза с гексагональной структурой, которая когерентно связана с матрицей и при микроструктурном анализе не выявляется. Возникновение ω-фазы сильно охрупчивает сплав. Закалку (α + β)-сплавов во избежание сильного роста зерна производят от температур, соответствующих (α + β)-области (см. рисунок 18), чаще от 850–890 °С. При этом α'-фаза остается без изменений, а β-фаза претерпевает те же превращения, какие протекают в сплаве того же состава, что и β-фаза, при закалке из β-области.

В процессе старения закаленных сплавов (500–600 °С) происходит их упрочнение, обусловленное распадом α', α''-фаз и остаточной β-фазы. Повышение прочности при распаде α'-фазы невелико. Упрочнение, связанное с образованием дисперсных выделений α-фазы.

Упрочнение, связанное с образованием ω-фазы, использовать нельзя из-

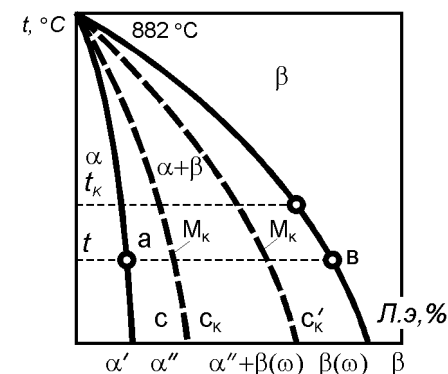


Рисунок 18 – Структура сплавов титана после закалки из области в зависимости от количества β-стабилизаторов

за возникновения высокой хрупкости сплавов. Чтобы избежать хрупкости, связанной с образованием  $\omega$ -фазы, применяют более высокую температуру старения: 450–600 °С. Наибольшее упрочнение после закалки и старения получили сплавы с высоким содержанием  $\beta$ -стабилизаторов.

Упрочняющая термическая обработка для крупных деталей из титановых сплавов применяется редко. Это объясняется малой прокаливаемостью титановых сплавов, низким значением вязкости разрушения и короблением деталей. Прокаливаемость возрастает с увеличением содержания  $\beta$ -фазы, усложнением состава сплава (**BT9**, **BT3**, **BT22**) и применением регламентированной скорости охлаждения при закалке (для сплава **BT9** до 20 °С/с).

Высокую конструктивную прочность обеспечивает «мягкая закалка», которая сводится к нагреву при температурах ( $\alpha + \beta$ )-области, охлаждению со скоростью 50–150 °С/ч до 700–600 °С и последующему охлаждению на воздухе или в воде. После мягкой закалки производится старение при 450–500 °С. После такой обработки частицы  $\alpha'$ -фазы в метастабильной  $\beta$ -фазе вместо пластинчатой формы имеют округлую форму, что и повышает надежность деталей в эксплуатации.

Типовые сплавы имеют низкие антифрикционные свойства, и при использовании в узлах трения они подвергаются **химико-термической обработке**. Для повышения износостойкости титан азотируют при 850–950 °С в течение 30–60 ч в атмосфере азота. Толщина диффузионного слоя в сплавах титана после азотирования при 950 °С в течение 30 ч 0,05–0,15 мм, HV 750–900. Для устранения хрупкого нитридного слоя и уменьшения хрупкости азотированного слоя рекомендуется проводить вакуумный отжиг (при температуре 800–900 °С).

Для повышения жаростойкости титановые сплавы подвергают силицированию и другим видам диффузионной металлизации.

**Промышленные титановые сплавы** по сравнению с техническим титаном имеют при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности более высокую прочность при 20÷25 °С и повышенных температурах. По сравнению с бериллием они более пластичны и технологичны, меньше стоят, безопасны для здоровья при обработке. По сравнению с алюминиевыми и магниевыми сплавами обладают более высокой удельной прочностью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью (таблица 18).

*Титановые сплавы получили широкое применение в авиации, ракетной технике, судостроении, химической и других отраслях промышленности. Их применяют для обшивки сверхзвуковых самолетов, изготовления деталей конструкций реактивных авиационных двигателей (дисков и лопаток ком-*

*прессора, деталей воздухозаборника и др.), корпусов ракетных двигателей второй и третьей ступени, баллонов для сжатых и сжиженных газов, обшивки морских судов, подводных лодок и т. д.*

Таблица 18 – Химический состав и механические свойства титановых сплавов

Сплав	Содержание элементов, (остальное Ti), %				Структура	Механические свойства		
	Al	V	Mo	Прочие		$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
						МПа		
BT5	4,3–6,2	–	–	–	$\alpha$ -сплавы	700–950	660–850	10–15
BT5-1	4–6	–	–	2–3 Sn		750–950	650–850	10–15
OT41	1–25	–	–	0,7–2 Mn	Псевдо- $\alpha$ -сплавы	600–750	470–650	20–40
OT4	3,55	–	–	0,8–2 Mn		700–900	550–650	–
BT20	–	0,8–23	0,5–1,8	1,4–2,5 Zr	$(\alpha+\beta)$ сплавы	950–1150	850–1000	12–208
BT6*	5,3–6,9	3,5–5,3	–	–		1100–1150	1000–1050	14–16
BT14*	3,5–6,3	0,8–1,5	2,5–3,8	–		1150–1400	1080–1300	6–10
BT16*	1,6–3,8	4,0–5,0	4,5–5,5	0,8–1,2 Cr		1250–1450	1100–1200	4–6
BT22	4,8–5,2	4,5–5,5	4,5–5,5	0,8–1,2 Fe		1100–1250	–	9

\* Свойства этих сплавов приведены после закалки и старения, остальных в отожженном состоянии.

#### Вопросы для самоконтроля

- 1 Титан. Основные физические, механические, химические и технологические свойства. Область применения.
- 2 Влияние на структуру и свойства титановых сплавов легирующих элементов ( $\alpha$ -стабилизаторы,  $\beta$ -стабилизаторы и нейтральные элементы).
- 3 Структурные превращения, протекающие в титановых сплавах в процессе термообработки (отжиг, закалка, старение).
- 4 Назначение химико-термической обработки титановых сплавов.
- 5 Область применения титановых сплавов.

#### Список литературы

- 1 **Лахтин, Ю.М.** Металловедение и термическая обработка металлов : [монография] / Ю.М. Лахтин. – М. : Metallurgy, 1977. – 408 с.
- 2 **Основы материаловедения** : учеб. для вузов / под ред. И. И. Сидорина. – М. : Машиностроение, 1976. – 436 с.
- 3 **Кашенко, Г.А.** Основы металловедения : [монография] / Г.А. Кашенко. – М. : Машгиз, 1959. – 397 с.
- 4 **Ривлин, Ю.И.** Металлы и их заменители : [монография] / Ю.И. Ривлин, М.А. Коротков, В.Н. Чернобыльский. – М. : Metallurgy, 1973. – 440 с.

5 **Справочник по конструкционным материалам** : справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.

6. **Материаловедение** : учеб. / В.А. Струк [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.

7. **Гуляев, А.П.** **Металловедение** : учеб. для вузов / А.П. Гуляев.– 6-е изд., перераб. и доп.– М. : Металлургия, 1986. – 544 с.

8. **Химическая энциклопедия : в 5 т.** / ред-кол.: И.Л. Кнунянц (гл. ред.) [и др.]. – М. : Сов. энцикл., 1988. – 623 с.

9. **Металлургия алюминия** : [монография] / Ю.В. Борисоглебский [и др.]. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 438 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### Условные обозначения основных элементов в марках металлов и сплавов

Элемент	Символ	Принятое обозначение элементов в марках металлов и сплавов		Элемент	Символ	Принятое обозначение элементов в марках металлов и сплавов	
		черных	цветных			черных	цветных
Азот	N	А	–	Неодим	Nd	–	Нм
Алюминий	Al	Ю	А	Никель	Ni	Н	Н
Барий	Ba	–	Бр	Ниобий	Nb	Б	Нп
Бериллий	Be	Л	–	Олово	Sn	–	О
Бор	B	Р	–	Осмий	Os	–	Ос
Ванадий	V	Ф	Вам	Палладий	Pd	–	Пд
Висмут	Bi	Ви	Ви	Платина	Pt	–	Рл
Вольфрам	W	В	–	Празеодим	Pr	–	Пр
Гадолиний	Gg	–	Гм	Рений	Re	–	Ре
Галлий	Ga	Гл	Гл	Родий	Rh	–	Рд
Гафний	Hf	–	Гф	Ртуть	Hg	–	Р
Германий	Ge	–	Г	Рутений	Ru	–	Ру
Гольмий	Ho	–	гом	Самарий	Sm	–	Сам
Диспрозий	Dy	–	ДИМ	Свинец	Pb	–	С
Европий	Eu	–	Ев	Селен	Se	Е	СТ
Железо	Fe	–	Ж	Серебро	Ag	–	Ср
Золото	Au	–	Зл	Скандий	Sc	–	Скм
Индий	In	–	Ин	Сурьма	Sb	–	Су
Иридий	Ir	и	И	Таллий	Tl	–	Тл
Иттербий	Yb	–	ИТМ	Тантал	Ta	–	ТТ
Иттрий	Y	–	ИМ	Теллур	Te	–	Т
Кадмий	Cd	Кд	Кд	Тербий	Tb	–	Том
Кобальт	Co	К	К	Титан	Ti	Т	ТПД
Кремний	Si	С	Кр(К)	Тулий	Tu	–	ТУМ
Лантан	La	–	Ла	Углерод	С	У	–
Литий	Li	–	Лэ	Фосфор	P	п	Ф
Лютеций	Lu	–	Люм	Хром	Cr	Х	Х(Хр)
Магний	Mg	Ш	Мг	Церий	Ce	–	Се
Марганец	Mn	Г	Мц(Мр)	Цинк	Zn	–	Ц
Медь	Cu	Д	М	Цирконий	Zr	Ц	ЦЭВ
Молибден	Mo	М	–	Эрбий	Er	–	Эрм

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
(справочное)

**Условные обозначения марок сталей и сплавов**

Материал	Обозначение
<i>Стали</i>	
Углеродистая обыкновенного качества (ГОСТ 380-94)	Буквами Ст и цифрами 0, 1, 2, 3 и т. д. до 6. Увеличение номера указывает на повышение содержания углерода, предела прочности и текучести (Ст1, Ст2). Слева от букв Ст ставят букву Б или В, которые обозначают группу стали (группа А в обозначении марки стали не указывается). Группа А – стали с регламентируемыми механическими свойствами, Б – химическим составом, В – механическими свойствами и химическим составом. Если сталь кипящая, то после цифр ставят буквы кп, полуспокойная – пс, спокойная – сп. Эти индексы обозначают степень раскисления стали.
Углеродистая качественная (ГОСТ 1050-88)	Двумя цифрами: 05, 08, 10, 15, 20 и т. д. до 60, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (08, 15, 30, 45). Если сталь кипящая, то после цифр ставят буквы кп, полуспокойная – пс, спокойная – сп (08кп, 20пс).
Высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные (ГОСТ 5632-72)	Первые две цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, а буквы за цифрами означают, что в составе стали находятся легирующие элементы (обозначения элементов см. выше) (40Х, 40ХН, 30ХГС). Цифры, стоящие после букв, указывают примерное содержание легирующего элемента в целых единицах процента (35Г2, 30Х2, ГН2). Если содержание легирующего элемента менее 1,5 % – цифра отсутствует (50Х, 15ХР, 30ХГС). Буква А в конце обозначений марок указывает, что сталь высококачественная (15ХА, 20ХНЗА).
Углеродистая инструментальная (ГОСТ 1435-74)	Буквой У и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в десятых долях процента (У7, У8). Для высококачественной стали в конце ставят букву А (У8А)
Легированная конструкционная (ГОСТ 4543-71)	Первые двузначные цифры означают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, стоящие после букв, обозначающих легирующий элемент, показывают среднее содержание легирующего элемента в целых единицах процента (30ХГС, 16Г2С)
Легированная инструментальная (ГОСТ 5950-73)	Первые цифры означают среднее содержание углерода в десятых долях процента. Они могут не указываться, если содержание углерода в стали меньше 0,1 % (9Х, 4ХС, 5ХГН). Цифры, стоящие после букв, обозначающих легирующий элемент, показывают среднее содержание легирующего элемента в целых единицах процента (Х12, Х12М, 8Х3)
Подшипниковая (ГОСТ 801-78)	Буквами ШХ и цифрами, показывающими содержание хрома в десятых долях процента. Буквы после цифр показывают наличие дополнительных легирующих элементов (ШХ15)
Конструкционная повышенной и высокой обрабатываемости резанием (ГОСТ 1414-75)	Буквой А и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (А 12)

*Окончание приложения Б*

Материал	Обозначение
Быстрорежущие стали (ГОСТ 19265-73)	Цифра после буквы Р указывает содержание вольфрама. Цифры, стоящие после букв, указывают примерное содержание легирующего элемента в целых единицах процента (Р18, Р6М5)
<i>Чугун</i>	
Серый (ГОСТ 1412-85) Ковкий (ГОСТ 1215-79)	Буквами СЧ и двузначным числом, обозначающим минимальное временное сопротивление при растяжении в МПа·10 <sup>-1</sup> (СЧ 10, около 100 МПа) Буквами КЧ. Первое двузначное число обозначает временное сопротивление при растяжении, в МПа·10 <sup>-1</sup> , второе число – относительное удлинение, % (КЧ 30–6)
Легированный для отливок со специальными свойствами (ГОСТ 7769-82)	Первой буквой Ч и последующими буквами, показывающими наличие легирующих элементов. Цифры обозначают последовательно среднее содержание легирующих элементов в процентах. Буква Ш означает, что графит в чугуне имеет шаровидную форму
<i>Алюминиевые сплавы</i>	
Литейные Деформируемые	Буквами АЛ, после которых указывается номер сплава (АЛ2) Буквами Д, АК, АМ, ВД и В, после которых указывается номер сплава (Д16)
Цифровая маркировка	Первая цифра (1) – основа алюминий, вторая цифра – основные легирующие элементы (1 – Cu-Mg, Cu-Mg-Fe-Ni, 2 – Cu-Li-Cd-Mn, Cu-Mn, 3 – Mg-Si, 4 – Cr, Ni, Be), третья цифра – тип сплава (0 или нечетная – деформируемый сплав, четная – литейный, 9 – металл-керамический, 7 – проволочный) (1160).
<i>Магниеые сплавы</i>	
Литейные Деформируемые	Буквами Мл, после которых указывается номер сплава (Мл5) Буквами МА; за ними следует номер сплава (МА3)
Латуни	Первой буквой Л – латунь и другими буквами, показывающими содержание легирующих элементов. Первое число – процентное содержание меди, остальные – содержание легирующих элементов (Л170, ЛАЖ60-1-1)
Бронзы	Первыми двумя буквами Бр – бронза и последующими, показывающими только легирующие элементы. Цифры указывают их процентное содержание (БрО4-4, БрА10ЖЗМц2)
Медно-никелевые сплавы	Первыми двумя буквами МН и последующими, показывающими элементы сплава. Первое число означает содержание никеля и кобальта в процентах, остальные числа – содержание других элементов в той последовательности, в которой стоят буквы (МНЖМц 30-1-1, МНЦС 16-29-1,8)
Баббиты (ГОСТ 1320-74)	Буквой Б и числом, показывающим содержание олова в процентах (Б88).
Сплавы твердые спеченные (ГОСТ 3882-74)	Группа ВК – вольфрамкобальтовые сплавы, цифра после буквы К означает содержание кобальта в процентах. Группа Т – титановольфрамовые; цифра после Т означает содержание карбида титана. Группа ТТ – титанотанталовольфрамовые; цифра после Т указывает суммарное содержание карбидов титана и тантала. Цифра после буквы К означает содержание кобальта в процентах.



**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
(справочное)  
**Химический состав цветных сплавов**

**В.1 Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов**  
**(ГОСТ 4784-97)**

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Al), %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
<b>Система Al – Cu – Mg</b>										
<b>Д1</b>	02-08	07	35-45	04-10	04-08	010	025	015	020(Ti-Zr)	015
<b>Д16</b>	05	05	38-49	03-09	12-18	010	025	015	020(Ti-Zr)	015
<b>Д16ч</b>	02	03	38-49	03-09	12-18	010	025	015	-	015
<b>В65</b>	025	02	39-45	03-05	015-030	-	01	01	-	01
<b>Д18</b>	08	07	22-30	02	02-05	010	025	-	-	015
<b>Д19</b>	05	05	38-43	05-10	17-23	-	01	01	00002-0005Be	01
<b>Д19ч</b>	02	03	38-43	04-09	17-23	-	01	01	00002-0005Be	01
<b>ВД17</b>	до03	до03	26-32	045-07	20-24	-	до01	до01	-	01
<b>Система Al – Cu – Mn</b>										
<b>АК4</b>	05-12	08-13	19-25	02	14-18	-	03	01	08-13Ni	01
<b>АК4-1</b>	035	08-14	19-27	02	12-18	01	03	002-01	08-14Ni	01
<b>АК4-1ч</b>	010-025	09-13	19-27	-	13-18	-	01	004-01	09-12Ni	015
<b>1201</b>	02-	03	58-68	02-04	002	-	01	002-01	01-025Zr 005-015V	015
<b>АК6</b>	07-12	07	18-26	04-08	04-08	-	03	01	01Ni	01
<b>АК8</b>	05-12	07	39-50	04-10	02-08	01	025	015	020(Ti-Zr)	015
<b>1105</b>	30	15	20-50	03-10	04-20	-	10	-	02Ni 020(Ti-Zr)	02
<b>Система Al – Mn</b>										
<b>ММ</b>	06	07	03	10-15	02-06	01	025	01	-	015
<b>АМп</b>	06	07	005-02	10-15	-	-	01	-	-	015
<b>АМпС</b>	015-035	025045	01	10-14	005	-	01	01	-	01
<b>Д12</b>	030	07	025	10-15	08-13	-	025	-	-	015
<b>Система Al – Mg</b>										
<b>АМг0,5</b>	01	01	01	02	04-08	-	-	-	-	01
<b>АМг1</b>	030	07	02	02	05-11	01	025	-	-	015
<b>АМг1,5</b>	040	07	02	01	11-18	01	025	-	-	015
<b>АМг2</b>	04	05	015	01-05	07-24	005	015	015	-	015
<b>АМг2,5</b>	025	04	01	01	22-28	015-035	01	-	-	015
<b>АМг3</b>	05-08	05	01	03-06	32-38	005	02	01	-	01
<b>АМг3,5</b>	025	04	01	01	31-39	015-035	02	02	00008Be 010-050 (Mn-Cr)	015
<b>АМг4,0</b>	04	05	01	02-07	35-45	005-025	025	015	-	015
<b>АМг4,5</b>	04	04	01	04-10	40-49	005-025	025	015	-	015

Окончание приложения В.1

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Al), %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие	Прочие
<b>Система Al – Mg</b>										
<b>АМг5</b>	05	05	01	03-08	48-58	-	02	002-010	00002-0005Be	01
<b>АМг6</b>	04	04	01	05-08	58-68	-	02	002-010	00002-0005Be	01
<b>1420</b>	01-03	03	-	03	50-60	-	-	01	009-015Zr 19-23Li	0005
<b>Система Al – Mg – Si</b>										
<b>АД31</b>	02-06	035	01	01	045-09	010	01	01	-	015
<b>АД31Е</b>	030-07	05	01	003	035-08	003	01	-	006B	010
<b>АД33</b>	040-08	07	015040	015	08-12	004-035	025	015	-	015
<b>АД35</b>	07-13	05	01	04-10	06-12	025	02	01	-	015
<b>АВ</b>	05-	05	01-05	015-035	045-090	025	02	015	-	01
<b>Система Al – Zn – Mg</b>										
<b>1915</b>	035	04	01	02-07	10-18	006-020	40-50	001-006	008-020Zr	015
<b>1925</b>	07	07	08	02-07	13-18	02	34-40	01	01-02Zr	01
<b>В950ч</b>	01	015	14-20	02-06	18-28	01-025	50-65	005	-	01
<b>В95пч</b>	01	005-025	14-20	02-06	18-28	01-025	50-65	005	01Ni	01
<b>В95</b>	05	05	14-20	02-06	18-28	010-025	50-70	005	01Ni	01
<b>В93пч</b>	01	02-04	08-12	01	16-22	-	65-73	01	-	01
<b>В95-1</b>	15	10	10-30	02-08	06-26	025	08-20	020(Ti+Zr)	02Ni	02
<b>В95-2</b>	15	09	10-30	02-08	10-28	025	20-65	015(Ti+Zr)	02Ni	02
<b>АЦпч</b>	03	03	-	0025	-	-	09-13	015	-	01

**В.2 Химический состав литейных латуней**

Марка латуни	Основные элементы (ост. Zn), %	Примеси не более, %							
		Si	Sn	Sb	Fe	Al	Ni	Прочие	Всего
ЛЦ40С	57-61 Cu; 0,8-2,0 Pb	0,3	0,5	0,05	0,8	0,5	1,0	0,5 Mn	2,0
ЛЦ40Сд	58-61 Cu; 0,8-2,0 Pb	0,2	0,3	0,05	0,5	0,2	1,0	0,2 Mn	1,5
ЛЦ40Мц1,5	57-60 Cu; 1,0-2,0 Mn	0,1	0,5	0,1	1,5	-	1,0	0,7 Pb; 0,03 P	2,0
ЛЦ40Мц3Ж	53-58 Cu; 0,5-1,5 Fe; 3,0-4,0 Mn	0,2	0,5	0,1	-	0,6	0,5	0,5 Pb; 0,05 P	1,7
ЛЦ40Мц3А	55-58,5 Cu; 0,5-1,5 Al; 2,5-3,5 Mn	0,2	0,5	0,05	1,0	-	1,0	0,2 Pb; 0,03 P	1,5
ЛЦ38Мц2С2	57-60 Cu; 1,5-2,5 Mn; 1,5-2,5 Pb	0,4	0,5	0,1	0,8	0,8	1,0	0,05 P	2,2
ЛЦ37Мц2С2К	57-60 Cu; 1,5-2,5 Mn; 0,5-1,3 Si; 1,5-3,0 Pb	-	0,6	0,1	0,7	0,7	1,0	0,05 As; 0,01 Bi; 0,1 P	1,7
ЛЦ30А3	66-68 Cu; 2,0-3,0 Al	0,3	0,7	0,1	-	-	0,3	0,7 Pb; 0,5 Mn; 0,05 P	2,6
ЛЦ25С2	70-75 Cu; 0,5-1,5 Sn; 1,0-3,0 Pb	0,5	-	0,2	0,3	0,3	1,0	0,5 Mn	1,5
ЛЦ16К4	78-81 Cu; 3,0-4,5 Si	-	0,3	0,1	0,6	0,04	0,2	0,3 Pb; 0,8 Mn; 0,1 P	2,5
ЛЦ14К3С3	77-81 Cu; 2,5-4,5 Si; 2,0-4,0 Pb	-	0,3	0,1	0,6	0,3	0,2	0,3 Pb; 1,0 Mn	2,3

**В.3 Химический состав оловянных бронз, обрабатываемых давлением**

Марка бронзы	Основные элементы, (остальное Cu), %	Примеси, не более, %							
		Fe	Pb	Sb	Bi	Al	Si	Прочие	Всего
БрО8,0-0,3	7,5-8,5 Sn; 0,25-0,35 P; 0,1-0,2 Ni	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03 Zn	0,1
БрОФ7-0,2	7,0-8,0 Sn; 0,10-0,25 P	0,05	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,1
БрОФ6,5-0,4	6,0-7,0 Sn; 0,26-0,40 P; 0,1-0,2 Ni	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03 Zn	0,1
БрОФ6,5-0,15	6,0-7,0 Sn; 0,10-0,25 P	0,05	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,1
БрОФ4-0,25	3,5-4,0 Sn; 0,20-0,30 P	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	-	0,1
БрОЦ4-3	3,5-4,0 Sn; 2,7-3,3 Zn	0,05	0,02	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03 P	0,2
БрОЦ4-4-2,5	3,0-5,0 Sn; 3,0-5,0 Zn; 1,5-3,5 Pb	0,05	-	0,002	0,002	0,002	-	0,03 P	0,2
БрОЦ4-4-4	3,0-5,0 Sn; 3,0-5,0 Zn; 3,5-4,5 Pb	0,05	-	0,002	0,002	0,002	-	0,03 P	0,2

**В.4 Химический состав оловянных литейных бронз**

Марка бронзы	Основные элементы (остальное Cu), %				Примеси, не более, %							
	Sn	Zn	Pb	Прочие	Zn	Pb	Al	Fe	Si	P	Sb	Всего
БрО3Ц12С5	2,0-3,5	8,0-15,0	3,0-6,0	-	-	-	0,02	0,4	0,02	0,05	0,5	1,3
БрО3Ц7С5Н1	2,5-4,0	6,0-9,5	3,0-6,0	0,5-2 Ni	-	-	0,02	0,4	0,02	0,05	0,5	1,3
БрО4Ц7С5	3,0-5,0	6,0-9,0	4,0-7,0	-	-	-	0,05	0,4	0,05	0,1	0,5	1,3
БрО4Ц4С17	3,5-5,5	2,0-6,0	14,0-20,0	-	-	-	0,05	0,4	0,05	0,1	0,5	1,3
БрО5Ц5С5	4,0-6,0	4,0-6,0	4,0-6,0	-	-	-	0,05	0,4	0,05	0,1	0,5	1,3
БрО5С25	4,0-6,0	-	23,0-26,0	-	0,5	-	0,02	0,2	0,02	0,05	0,5	1,2
БрО6Ц6С3	5,0-7,0	5,0-7,0	2,0-4,0	-	-	-	0,05	0,4	0,02	0,05	0,5	1,3
БрО8Ц4	7,0-9,0	4,0-6,0	-	-	-	0,5	0,02	0,3	0,02	0,05	0,3	1,0
БрО10Ф1	9,0-11,0	-	-	0,4-1,1 P	0,3	0,3	0,02	0,2	0,02	-	0,3	1,0
БрО10Ц2	9,0-11,0	1,0-3,0	-	-	-	0,5	0,02	0,3	0,02	0,05	0,3	1,0
БрО10С10	9,0-11,0	-	8,0-11,0	-	0,5	-	0,02	0,2	0,02	0,05	0,3	0,9

**В.5 Химический состав безоловянных литейных бронз**

Марка бронзы	Основные элементы (ост. Cu), %	Примеси, не более, %								
		As	Sb	Sn	Si	Pb	P	Zn	Прочие	Всего
БрА9Мц2Л	80-95 Al; 15-25 Mn	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	1,5	1,0 Ni; 1,0 Fe	2,8
БрА10Мц2Л	96-110 Al; 15-25 Mn	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	1,5	1,0 Fe; 1,0 Ni	2,8
БрА9Ж3Л	80-105 Al; 20-40 Fe	0,05	0,05	0,2	0,2	0,1	0,1	1,0	0,5 Mn; 1,0 Ni	2,7
БрА10Ж3Мц2	90-110 Al; 20-40 Fe; 10-30 Mn	0,01	0,05	0,1	0,1	0,3	0,01	0,5	0,5 Ni	1,0
БрА10Ж4Н4Л	95-110 Al; 35-55 Fe; 35-55 Ni	0,05	0,05	0,2	0,2	0,05	0,1	0,5	0,5 Mn	1,5
БрА11Ж6Н6	105-115 Al; 50-65 Fe; 50-65 Ni	0,05	0,05	0,2	0,2	0,05	0,1	0,6	0,5 Mn	1,5
БрА9Ж4Н4Мц1	88-100 Al; 40-50 Fe; 0,5-1,2 Mn; 40-50 Ni	0,05	0,05	0,2	0,2	0,05	0,03	1,0	-	1,2
БрС30	27-31 Sn	0,1	0,3	0,1	0,02	-	0,1	0,1	0,5 Ni; 0,25 Fe	0,9
БрА7Мц15Ж3Н2Ц2	66-75 Al; 25-35 Fe; 140-155 Mn; 1,5-2,5 Ni; 1,5-2,5 Zn	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,02	-	0,05 C	0,5
БрCuZn3Ц3С20Ф	30-40 Ni; 18-22 Pb; 0,15-0,3 P; 30-40 Zn; 3-4 Sb	0,1	-	0,5	0,02	-	-	-	0,02 Al; 0,3 Fe; 0,025 Bi	0,9

**В.6 Химический состав безоловянных бронз, обрабатываемых давлением**

Марка бронзы	Основные элементы (остальное Cu), %					Примеси не более, %							
	Al	Fe	Mn	Ni	Прочие	Sn	Si	Pb	P	Fe	Zn	Прочие	Всего
БрА5	4-6	-	-	-	-	0,10	0,1	0,03	0,01	0,5	0,5	0,5Mn	1,1
БрА7	6-8	-	-	-	-	0,10	0,1	0,03	0,01	0,5	0,5	0,5Mn	1,1
БрАМц9-2	8-10	-	1,5-2,5	-	-	0,10	0,1	0,03	0,01	0,5	1	-	1,5
БрАМц10-2	9-11	-	1,5-2,5	-	-	0,10	0,1	0,03	0,01	0,5	1	-	1,7
БрАЖ9-4	8-10	2-4	-	-	-	0,10	0,1	0,01	0,01	-	1	0,5Mn	1,7
БрАЖМц10-3-1	9-11	2-4	1-2	-	-	0,10	0,1	0,03	0,01	-	0,5	-	0,7
БрАЖН10-44	9,5-11	3,5-5,5	-	3,5-5,5	-	0,10	0,1	0,02	0,01	-	0,3	0,3Mn	0,6
БрБ2	-	-	-	0,2-0,5	1,8-2,1Be 1,85-2,1Be	-	0,15	0,005	-	0,15	-	0,15Al	0,5
БрБНТ1,9	-	-	-	0,2-0,4	0,1-0,25Ti 1,85-2,1Be	-	0,15	0,005	-	0,15	-	0,15Al	0,5
БрБНТ1,9Mn	-	-	-	0,2-0,4	0,1-0,25Ti 0,07-0,13Mg	0,15	0,005	-	0,15	-	0,15Al	0,5	
БрКМц3-1	-	-	1-1,5	-	2,7-3,5Si	0,25	-	0,03	-	0,3	0,5	0,2Ni	1
БрКН1-3	-	-	0,1-0,4	2,4-3,4	0,6-1,1Si	0,10	-	0,15	-	0,1	0,1	0,02Al	0,4
БрМц5	-	-	4,5-5,5	-	-	0,10	0,1	0,03	0,01	0,35	0,4	-	0,9
БрЖНМц9-44	8,8-10	4-5	0,5-1,2	4-5	-	0,10	0,1	0,02	0,01	-	0,5	-	0,7

**В.7 Химический состав литейных магниевых сплавов, %**

Марка сплава	Содержание элементов (основа – Mg), %					Примеси, не более, %				
	Al	Mn	Zn	Zr	Прочие	Si	Fe	Ni	Cu	Прочие
МЛ3	2,5-3,5	0,15-0,5	0,5-1,5	-	-	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5
МЛ4	5,0-7,0	0,15-0,5	2,0-3,5	-	-	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5
МЛ4пч	5,0-7,0	0,15-0,5	2,0-3,5	-	-	0,08	0,007	0,002	0,04	0,13
МЛ5	7,5-9,0	0,15-0,5	0,2-0,8	-	-	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5
МЛ5пч	7,5-9,0	0,15-0,5	0,2-0,8	-	-	0,08	0,007	0,001	0,04	0,13
МЛ5он	7,5-9,0	0,15-0,5	0,2-0,8	-	-	0,35	0,08	0,01	0,25	0,7
МЛ6	9,0-10,2	0,1-0,5	0,6-1,2	-	-	0,25	0,06	0,01	0,1	0,5
МЛ8	-	-	5,5-6,6	0,7-1,1	0,2-0,8Cd	0,03	0,01	0,005	0,03	0,2
МЛ10	-	-	-	0,4-1,0	2,2-2,8Nd	0,03	0,02	0,005	0,03	0,2
МЛ11	-	-	0,2-0,7	0,4-1,0	2,5-4,0PЗМ	0,03	0,01	0,005	0,03	0,25
МЛ12	-	-	4,0-5,0	0,6-1,1	-	0,03	0,01	0,005	0,03	0,12
МЛ15	-	-	4,0-5,0	0,7-1,1	0,6-1,2La	0,03	0,01	0,005	0,03	0,12
МЛ19	-	-	0,1-0,6	0,4-1,0	1,6-2,3Nd 1,4-2,2Y	0,03	0,01	0,005	0,03	0,14
МЛ16	7,5-9,0	0,15-0,5	2,0-3,0	-	-	0,2	0,03	0,01	0,15	-
МЛ16пч	7,5-9,0	0,15-0,5	2,0-3,0	-	-	0,06	0,005	0,001	0,01	-
МЛ16вч	7,5-9,0	0,15-0,5	2,0-3,3	-	-	0,04	0,003	0,001	0,003	-
МЛ14вч	5,0-7,0	0,15-0,5	2,0-3,0	-	-	0,05	0,003	0,001	0,004	-

*Окончание приложения В.7*

Марка сплава	Содержание элементов (основа – Mg), %					Примеси, не более, %				
	Al	Mn	Zn	Zr	Прочие	Si	Fe	Ni	Cu	Прочие
<b>МЦИ</b>	-	-	0,1-0,3	-	-	-	0,4-0,7	0,02-0,05	0,4-0,75	-
<i>Примечания:</i>										
1 При одновременном содержании Be и Zr в сплавах марок МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч содержание Be не должно превышать 0,0015%.										
2 В сплаве МЛ5пч допускается не более 0,005 % Ti.										
(«он» – сплав общего назначения; «пч» – сплав повышенной чистоты; «вч» – сплав высокой чистоты; РЗМ – элементы, входящие в состав цериевого металла, содержащего не менее 4,5 % Се.)										

**В.8 Химический состав деформируемых магниевых сплавов (ГОСТ 14957-76)**

Марка сплава	Содержание элементов (остальное – Mg), %				Примеси, не более, %				
	Al	Mn	Zn	Прочие	Si	Fe	Cu	Ni	Прочие
МА1	-	1,3-2,5	-	-	0,15	0,05	0,05	0,01	0,2
МА2	3,0-4,0	0,15-0,5	0,2-0,8	-	0,1	0,05	0,05	0,005	0,3
МА2-1	3,8-5,0	0,2-0,6	0,6-1,5	-	0,15	0,05	0,05	0,005	0,3
МА3	5,5-7,0	0,15-0,5	0,5-1,5	-	0,3	0,05	0,05	0,005	0,3
МА5	7,8-9,2	0,15-0,5	0,2-0,8	-	0,15	0,05	0,05	0,005	0,3
МА8	-	1,3-2,2	0,15-0,35	0,15-0,35 Се	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3
МА11	-	1,5-2,5	-	2,5-3,5 Nd 0,13-0,25 Ni	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3
МА12	-	-	-	2,5-3,5 Nd 0,3-0,8 Zr	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3
МА9	0,4-0,8	1,0-1,8	-	0,08-0,3 Ca	0,15	0,05	0,05	0,01	0,3
МА14	-	-	5,0-6,0	0,3-0,9 Zr	0,15	0,03	0,03	0,005	0,3
МА15	-	-	2,5-3,5	0,45-0,9 Zr 1,2-2,0 Cd	0,15	0,03	0,03	0,005	0,3
МА18*	0,5-1,0	0,1-0,4	2,0-2,5	10-11,5 Li 0,15-0,35 Се	0,03	0,01	0,03	0,005	0,3
МА19	-	-	5,5-7,0	0,5-0,9 Zr 1,4-2,0 Nd	0,03	0,01	0,03	0,005	0,3
МА21*	4,0-6,0	0,1-0,5	0,8-2,0	7,0-10 Li 3,0-5,0 Cd	0,03	0,01	0,03	0,005	0,3

\* Сверхлегкие сплавы

**В.9 Химический состав промышленных деформируемых титановых сплавов (ГОСТ 19807-91)**

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Ti), %						Примеси не более, %							
	Al	Mn	Mo	V	Zr	Прочие	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Σост.
<i>α-сплавы</i>														
<b>BT5</b>	43-62	–	08	12	–	–	0,10	0,30	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30
<b>BT5-1</b>	43-60	–	–	10	–	20-30Sn	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
<i>Псевдо α-сплавы</i>														
<b>OT4-0</b>	02-1,4	02-1,3	–	–	–	–	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30
<b>OT4-1</b>	1,0-2,5	0,7-2,0	–	–	–	–	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30
<b>OT4</b>	3,5-5,0	0,8-2,0	–	–	–	–	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30
<b>BT20</b>	5,5-7,0	–	0,5-2,0	0,8-2,5	1,5-2,5	–	0,10	0,30	0,15	–	0,15	0,05	0,012	0,30
<b>ПТ7М</b>	1,8-2,5	–	–	–	2,0-3,0	–	0,10	0,25	0,12	–	0,15	0,04	0,006	0,30
<b>ПТЗВ</b>	3,5-5,0	–	–	1,2-2,5	–	–	0,10	0,25	0,12	0,30	0,15	0,04	0,008	0,30
<i>α+β-сплавы</i>														
<b>BT3-1</b>	5,5-7,0	–	2,0-3,0	–	–	0,8-2,3Cr 0,5-0,4Si 0,2-0,7Fe	0,10	–	–	0,50	0,18	0,05	0,015	0,30
<b>BT6</b>	5,3-6,8	–	–	3,5-5,3	–	–	0,10	0,3	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30
<b>BT9</b>	5,8-7,0	–	2,8-3,0	–	0,8-2,0	0,2-0,35Si	0,10	0,25	–	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
<b>BT14</b>	3,5-6,3	–	2,5-3,8	0,9-1,9	–	–	0,10	0,3	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
<b>BT16</b>	1,8-3,8	–	4,5-6,5	4,0-5,5	–	–	0,10	0,25	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
<b>BT22</b>	4,4-5,9	–	4,0-5,5	4,0-5,5	–	0,5-2,0Cr 0,5-1,5Fe	0,10	–	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30
<i>Примечания</i>														
1 В сплаве BT6, предназначенном для изготовления работающих под давлением баллонов, содержится, %: 5,3–6,5 Al, 3,5–4,5 V, ≤ 0,15 O, ≤ 0,25 Fe. Сплав такого состава маркируется дополнительно буквой С ( <b>BT6C</b> );														
2 В плоском прокате из сплава BT14 (толщиной до 10 мм) должно быть 3,5–4,5 % Al, а в остальных видах полуфабрикатов 4,5–6,3 Al;														
3 Во всех сплавах, содержащих Mo, возможна его замена W в количестве ≤ 0,3%;														
4 Во всех сплавах, не содержащих Cr и Mo, последние допускаются как примеси в количестве ≤ 0,15 (в сумме);														
5 Дополнительное ужесточение содержания примесей, а также сужение пределов содержания легирующих элементов, применяются для конкретных видов полуфабрикатов.														

Учебное издание

**Щербаков Сергей Васильевич  
Рогачев Александр Александрович  
Ярмоленко Максим Анатольевич**

**ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**  
Учебно-методическое пособие

Редактор *М.П. Дежко*  
Технический редактор *В.Н. Кучерова*

Подписано в печать 15.10.2009 г. Формат 60x84 1/16  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 5,43. Тираж 300 экз.  
Зак. № Изд. № 31

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный университет транспорта:  
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.  
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.  
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.