

Документ подписан простой электронной подписью

Информация: Министерство науки и высшего образования РФ

ФИО: Игнатенко Виталий Иванович

Должность: Проректор по образовательной деятельности и молодежной политике  
ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»

Дата подписания: 06.03.2023 09:45:24

Уникальный идентификатор документа

Кафедра технологических машин и оборудования  
a49ae343af5448d45d7e3e1e499659da8109ba78

# КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА И СВОЙСТВА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*Методические указания  
к практическим работам*

Норильск 2023

Классификация, маркировка и свойства цветных металлов и сплавов: метод. указ. к практ. работам / составитель А.Я. Са-рафанова; Министерство науки и высшего образования РФ, Заполярный гос. ун-т им. Н.М. Федоровского. – Норильск: ЗГУ, 2023. – 88 с. – Библиогр.: с. 86–87. – Текст: непосредственный.

В методических указаниях представлены практические работы по классификации конструкционных материалов, составу, маркировке в соответствии с ГОСТ, и назначению сплавов на основе алюминия и меди, применяемых в машиностроении, металлургии и строительстве, а также теоретический и справочный материал.

Предназначены для обучающихся бакалавриата технических направлений подготовки и специалитета всех форм обучения.

## ВВЕДЕНИЕ

Металлы и их сплавы используются для конструкций машин, оборудования, инструмента и т.д. Несмотря на широкий круг искусственно созданных материалов, керамики, клеев, металлы служат основным конструкционным материалом и в будущем по-прежнему будут доминировать.

В природе металлы встречаются как в чистом виде, так и в рудах, оксидах и солях. В чистом виде встречаются химически устойчивые элементы (Pt, Au, Ag, Hg, Cu). Масса наибольшего самородка меди составляет 420 т, серебра – 13,5 т, золота – 112 кг.

Из 109 открытых элементов, представленных в периодической системе элементов Д.И. Менделеева, 22 являются неметаллами.

Металлические материалы обычно делятся на две большие группы: железо и сплавы железа (сталь и чугун) называют *черными металлами*, а остальные металлы и их сплавы – *цветными*. Все цветные металлы, применяемые в технике, подразделяются:

- на легкие металлы (Mg, Be, Al, Ti) с плотностью до 5 г/см<sup>3</sup>;
- тяжелые металлы (Pb, Mo, Ag, Au, Pt, W, Ta, Ir, Os) с плотностью, превышающей 10 г/см<sup>3</sup>;
- легкоплавкие металлы (Sn, Pb, Zn) с температурой плавления соответственно 232, 327, 410 °С;
- тугоплавкие металлы (W, Mo, Ta, Nb) с температурой плавления существенно выше, чем у железа (> 1536 °С);
- благородные металлы (Au, Ag, Pt) с высокой устойчивостью против коррозии;
- урановые металлы, или актиноиды (актиниды), используемые в атомной технике;
- редкоземельные металлы (РЗМ) – лантаноиды, применяемые для модифицирования стали;
- щелочные и щелочноземельные металлы (Na, K, Li, Ca), в свободном состоянии применяемые в качестве жидкометаллических теплоносителей в атомных реакторах; натрий также используется в качестве катализатора в производстве искусственного каучука, литий – для легиро-

вания легких и прочных алюминиевых сплавов, применяемых в самолетостроении.

Свойства металлов разнообразны. Ртуть замерзает при температуре  $-38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вольфрам выдерживает рабочую температуру до  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_{пл} = 3410\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), литий, натрий, калий легче воды, а иридий и осмий в 42 раза тяжелее лития. Электропроводность серебра в 130 раз выше, чем марганца. Вместе с тем металлы имеют характерные общие свойства:

- высокая пластичность;
- высокие тепло- и электропроводность;
- положительный температурный коэффициент электрического сопротивления, означающий рост сопротивления с повышением температуры, и сверхпроводимость многих металлов (около 30) при температурах, близких к абсолютному нулю;
- хорошая отражательная способность (металлы непрозрачны и имеют характерный металлический блеск);
- термоэлектронная эмиссия, т.е. способность к испусканию электронов при нагреве;
- кристаллическое строение в твердом состоянии.

*Практическая работа №1.*  
**КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА, СВОЙСТВА  
И ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ**

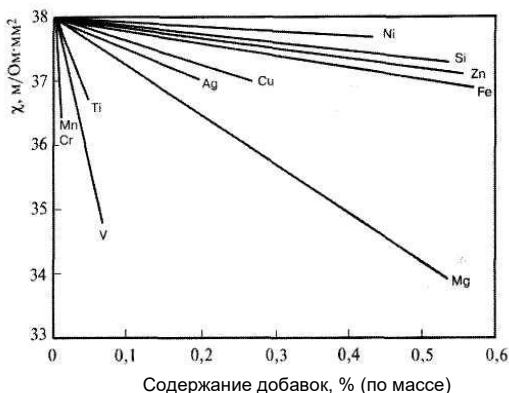
Алюминий относится к третьей группе периодической системы Д.И. Менделеева. Физические свойства алюминия в сравнении с другими металлами даны в табл. 1.1.

**Алюминий** – легкий металл (плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>) серебристого цвета, хорошо полируется. Полированная поверхность достаточно долго сохраняет зеркальный блеск.

По распространенности алюминий занимает первое место среди конструкционных металлов. В земной коре содержится 8,8% алюминия, в то время как железа всего 5,1%. Алюминий входит в состав всех глин, полевого шпата, боксита и ряда других горных пород.

Алюминий кристаллизуется в гранцентрированной кубической решетке с периодом 0,40412 нм при 20 °С. Его удельная теплоемкость и скрытая теплота плавления весьма значительны, поэтому для нагрева и расплавления этого металла требуются затраты большого количества тепла.

Алюминий имеет высокую тепло- и электропроводность. Электропроводность алюминия чистотой 99,997% составляет 65,5% от электропроводности меди. Примеси и легирующие элементы в той или иной степени уменьшают электропроводность алюминия (рис. 1.1).



**Рис. 1.1. Влияние примесей и легирующих элементов на электропроводность  $\chi$  алюминия**

Особенно сильно повышают электросопротивление алюминия марганец, ванадий, хром и титан, мало влияют никель, кремний, цинк, железо и медь. Температурный коэффициент его электросопротивления равен примерно  $0,004 \text{ K}^{-1}$ . Алюминий – парамагнитный металл.

Таблица 1.1

**Основные физические свойства цветных металлов**

| Свойства                                                                     | Металл |        |         |       |        |        |
|------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|
|                                                                              | Be     | Mg     | Al      | Ti    | Ni     | Cu     |
| Атомный номер                                                                | 4      | 12     | 13      | 22    | 28     | 29     |
| Атомная масса                                                                | 9,013  | 24,32  | 26,981  | 47,88 | 58,70  | 63,54  |
| Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>                                       | 1,8477 | 1,737  | 2,698   | 4.507 | 8,897  | 8,94   |
| Температура плавления, °С                                                    | 1287   | 650    | 660,24  | 1668  | 1455   | 1083   |
| Температура кипения, °С                                                      | 2450   | 1107   | 2520    | 3169  | 2822   | 2360   |
| Атомный диаметр, нм                                                          | 0,226  | 0,320  | 0,286   | 0,290 | 0,248  | 0,256  |
| Скрытая теплота плавления, кДж/кг                                            | 1625   | 357    | 389,37  | 358,3 | 302    | 205    |
| Скрытая теплота испарения, кДж/кг                                            | 34395  | 5498   | 10885   | 9790  | 6376   | 6340   |
| Удельная теплоемкость при 20 °С, Дж/(кг·К)                                   | 1826   | 1047,6 | 961,7   | 521   | 450    | 385    |
| Удельная теплопроводность при 20 °С, Вт/(мК)                                 | 2930   | 167    | 221,5   | 21,9  | 88,5   | 387    |
| Коэффициент линейного расширения при 25 °С · 10 <sup>6</sup> К <sup>-1</sup> | 12     | 26     | 23,3    | 9,2   | 13,5   | 16.8   |
| Удельное электросопротивление при 20 °С, мкОм·м                              | 0,04   | 0,045  | 0,02767 | 0,58  | 0,0684 | 0,0172 |
| Модуль нормальной упругости, ГПа                                             | 311,1  | 44,1   | 70,6    | 103   | 203    | 125    |
| Модуль сдвига, ГПа                                                           | 140    | 17,854 | 27      | 39,2  | 73     | 46,4   |

Модуль Юнга алюминия, равный 70000 МПа, довольно велик для его температуры плавления, но он значительно меньше, чем у сталей.

Алюминий – химически активный металл. Однако он легко покрывается с поверхности оксидной пленкой, которая защищает его от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой. На воздухе при комнатной температуре толщина этой пленки 5–10 нм, при нагреве до температуры плавления на поверхности твердого металла возрастает до 200 нм. Окись алюминия имеет удельный объем, близкий к удельному объему алюминия, поэтому оксидная

пленка плотная, обладает очень хорошим сцеплением с металлом и малопроницаема для всех газов.

Минеральные кислоты действуют на алюминий, причем с повышением температуры действие усиливается. Некоторые разбавленные кислоты взаимодействуют с алюминием сильнее, чем концентрированные. Концентрированная холодная азотная кислота не растворяет алюминий, а разбавленная разрушает очень быстро. Слабые растворы серной кислоты (до 10%  $H_2SO_4$ ) мало действуют на алюминий, но с повышением температуры и концентрации скорость коррозии возрастает. Однако концентрированная серная кислота слабо взаимодействует с алюминием. Соляная кислота, растворы плавиковой и бромистоводородной кислот быстро растворяют алюминий. Разбавленные растворы фосфорной (менее 1%) и хромовой (до 10%) кислот алюминий растворяют незначительно.

Алюминий устойчив во многих органических кислотах: уксусной, масляной, лимонной, винной, пропионовой, яблочной, глюконовой. В щавелевой и муравьиной кислотах коррозионная стойкость алюминия мала.

Данный металл быстро растворяется в растворах едких щелочей. При нагревании восстанавливает большинство окислов, что положено в основу алюмотермии.

Алюминий маркируют буквой «А» и цифрами, обозначающими доли процента свыше 99,0% Al.

Постоянные примеси алюминия – Fe, Si, Cu, Zn, Ti. В зависимости от содержания примесей первичный алюминий подразделяют на три класса:

1) особой чистоты А999 – 99,999% Al (< 0,001% примесей);

2) высокой чистоты А995, А99, А97, А95 (0,005–0,05% примесей);

3) технической чистоты А85 – 99,85%Al, А8 – 99,8%Al и др. (0,15–1% примесей).

Буква «Е» в конце марки обозначает повышенное содержание железа и пониженное кремния. Алюминий особой чистоты применяется для лабораторных целей.

Технический алюминий, выпускаемый в виде деформируемого полуфабриката (листы, профили, прутки и др.),

маркируют АД0 и АД1. Механические свойства алюминия зависят от его чистоты и состояния. Увеличение содержания примесей, и пластическая деформация повышают прочность и твердость Al (табл. 1.2).

Ввиду низкой прочности алюминий применяют для ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется легкость, свариваемость, пластичность. Так, из него изготавливают рамы, двери, трубопроводы, фольгу, цистерны для перевозки нефти и нефтепродуктов, посуду и др. Благодаря высокой теплопроводности его используют для различных теплообменников, в промышленных и бытовых холодильниках. Высокая электрическая проводимость алюминия способствует его широкому применению для конденсаторов, проводов, кабелей, шин и т.п.

Таблица 1.2

**Механические свойства алюминия**

| Марка | Сумма примесей, % | Состояние                    | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | НВ |
|-------|-------------------|------------------------------|------------------|----------------------|--------------|----|
| A995  | 0,005             | Литое                        | 50               | –                    | 45           | 15 |
| A5    | 0,5               | Литое                        | 75               | –                    | 29           | 20 |
| A0    | 1                 | Литое                        | 90               | –                    | 25           | 25 |
|       |                   | Деформированное и отожженное | 90               | 30                   | 30           | 25 |
|       |                   | Деформированное              | 140              | 100                  | 12           | 32 |

Алюминий хорошо обрабатывается давлением, сваривается газовой и контактной сваркой, но плохо обрабатывается резанием. Имеет большую усадку при затвердевании (6%). Высокие теплота плавления и теплоемкость способствуют медленному остыванию алюминия из жидкого состояния, что дает возможность улучшать отливки из алюминия и его сплавов путем модифицирования, рафинирования и других технологических операций.

**Классификация алюминиевых сплавов**

Для получения алюминиевых сплавов с различными свойствами алюминий легируют другими металлами.



Наиболее широко в качестве легирующих элементов применяют медь, магний, марганец, цинк, кремний, а в последнее время и литий, но пока в ограниченных масштабах. Кроме основных шести, известно еще около двух десятков легирующих добавок. В промышленности используют около 55 марок алюминиевых сплавов

В зависимости от способа получения полуфабрикатов и изделий алюминиевые сплавы можно разделить:

- на деформируемые;
- литейные.

Из *деформируемых* алюминиевых сплавов получают полуфабрикаты и изделия методами обработки металлов давлением (прокаткой, прессованием, ковкой, штамповкой и т.д). *Литейные* сплавы предназначены для фасонного литья.

Помимо этого, методами порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые порошки (САП) и спеченные алюминиевые сплавы (САС) (рис. 1.2).

Заготовки, полученные методами порошковой металлургии, подвергают обработке давлением, поэтому порошковые алюминиевые сплавы следует рассматривать как разновидность деформируемых.

Деформируемые и литейные сплавы можно разделить на термически упрочняемые и термически неупрочняемые. В свою очередь термическое упрочнение может достигаться закалкой с последующим естественным и искусственным старением. Деление на естественно и искусственно стареющие сплавы несколько условно.

Все применяемые в промышленности сплавы можно разбить по системам, в которых основные легирующие компоненты будут определять типичные для данной системы физические и химические свойства. Кроме основных определяющих элементов в сплавы одной системы могут входить различные добавки других элементов, которые придают сплаву какие-то новые свойства, но не изменяют их основной природы.

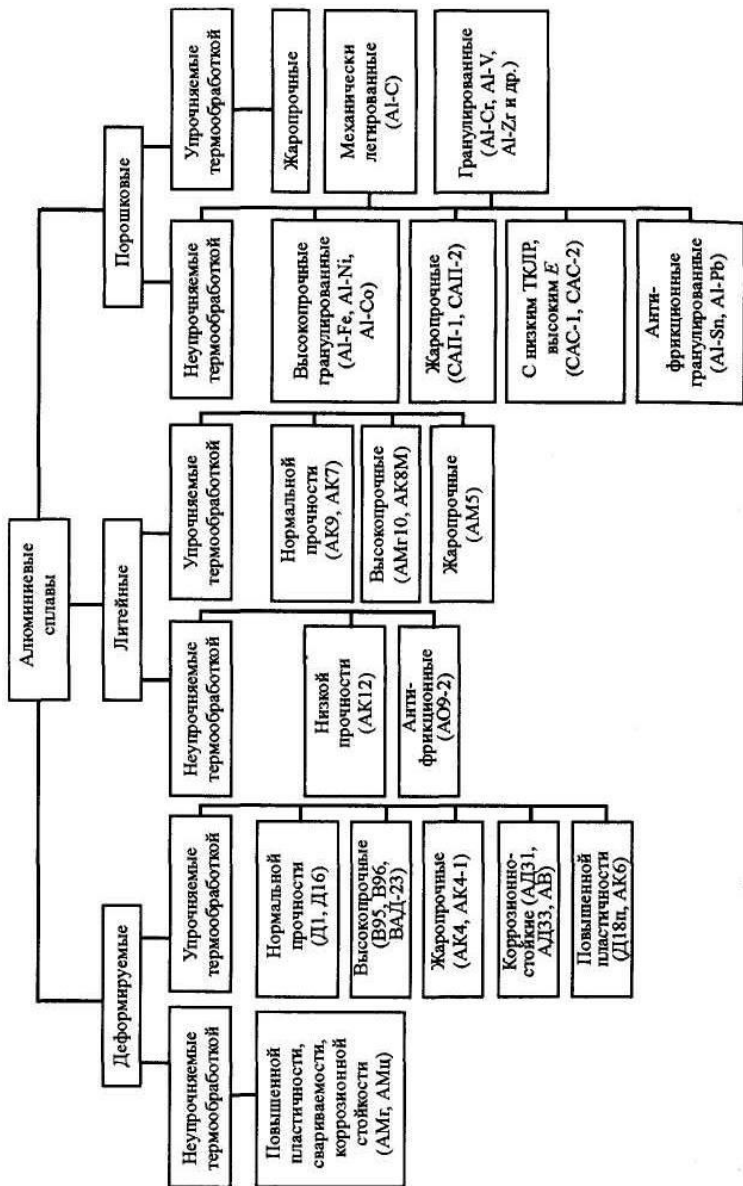


Рис. 1.2. Классификация алюминиевых сплавов

В табл. 1.3 и 1.4 приведены химические составы основных промышленных алюминиевых сплавов, разбитых по системам.

Таблица 1.3

**Состав основных промышленных деформируемых  
алюминиевых сплавов (основа – алюминий,  
примеси не указаны)**

| Группа | Система  | Марка сплава* | Компоненты, % |          |           |                                                     |         |                                              |
|--------|----------|---------------|---------------|----------|-----------|-----------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------|
|        |          |               | Cu            | Mg       | Mn        | Zn                                                  | Si      | прочие                                       |
| 1      | 2        | 3             | 4             | 5        | 6         | 7                                                   | 8       | 9                                            |
| 1      | Al-Mn    | AMц           | –             | –        | 1,0–1,6   | –                                                   | –       | –                                            |
| 2      | Al-Mg    | AMr1          | –             | 0,4–1,7  | –         | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | AMr2          | –             | 1,8–2,8  | 0,2–0,6   | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | AMr3          | –             | 3,2–3,8  | 0,3–0,6   | –                                                   | 0,5–0,8 | –                                            |
|        |          | AMr5          | –             | 4,8–5,8  | 0,3–0,8   | –                                                   | –       | (0,02–0,10)Ti<br>(0,0002–0,005)Be            |
|        |          | AMr6          | –             | 5,8–6,8  | 0,5–0,8   | –                                                   | –       | (0,02–0,10)Ti<br>(0,0002–0,005)Be            |
| 3      | Al-Cu-Mn | 1201          | 5,8–6,8       | –        | 0,2–0,4   | –                                                   | –       | (0,02–0,1)Ti<br>(0,1–0,25)Zr<br>(0,05–0,15)V |
| 4      | Al-Cu-Mg | Д18           | 2,2–3,0       | 0,2–0,5  | –         | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | В 65          | 3,9–4,5       | 0,15–0,3 | 0,3–0,5   | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | Д1            | 3,8–4,8       | 0,4–0,8  | 0,4–0,8   | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | Д16           | 3,8–4,9       | 1,2–1,8  | 0,3–0,9   | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | Д16ч          | 3,8–4,9       | 1,2–1,8  | 0,3–0,9   | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | 1163          | 3,6–4,5       | 1,2–1,6  | 0,4–0,8   | –                                                   | –       | –                                            |
|        |          | Д19           | 3,8–4,3       | 1,7–2,3  | 0,5–1,0   | –                                                   | –       | (0,0002–0,005)Be                             |
|        |          | AK4–1         | 1,9–2,7       | 1,2–1,8  | –         | –                                                   | –       | (0,8–1,4)Fe<br>(0,8–1,4)Ni<br>(0,02–0,1)Ti   |
|        |          | AK4–1ч        | 1,9–2,7       | 1,2–1,8  | –         | –                                                   | –       | (0,8–1,4) Fe<br>(0,8–1,4)Ni<br>(0,02–0,1) Ti |
| ВАД1   | 3,8–4,5  | 2,3–2,7       | 0,35–0,8      | –        | –         | (0,0002–0,005)Be;<br>(0,02–0,1) Ti<br>(0,07–0,2) Zr |         |                                              |
| 5      | Al-Mg-Si | AB            | 0,1–0,5       | 0,45–0,9 | 0,15–0,35 | –                                                   | 0,5–1,2 | –                                            |
|        |          | АД31          | –             | 0,4–0,9  | –         | –                                                   | 0,3–0,7 | –                                            |
|        |          | ЛД33          | 0,15–0,4      | 0,8–1,2  | –         | –                                                   | 0,4–0,8 | (0,15–0,35)Cr                                |
|        |          | АД 35         | –             | 0,8–1,4  | 0,5–0,9   | –                                                   | 0,8–1,2 | –                                            |

Окончание табл. 1.3

| Группа | Система                           | Марка сплава* | Компоненты, % |         |         |         |         |                                                         |
|--------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------------------------------|
|        |                                   |               | Cu            | Mg      | Mn      | Zn      | Si      | прочие                                                  |
| 6      | Al-Cu-Mg-Si                       | AK6           | 18-26         | 0,4-0,8 | 0,4-0,8 | -       | 07-12   | -                                                       |
|        |                                   | AK8           | 3,9-4,8       | 0,4-0,8 | 0,4-1,0 | -       | 0,6-1,2 | -                                                       |
|        |                                   | AK4           | 1,9-2,5       | 1,4-1,8 | -       | -       | 0,5-1,2 | (0,8-1,3)Ni<br>(0,8-1,3)Fe                              |
| 7      | Al-Zn-Mg                          | 1915          | -             | 1,3-1,8 | 0,2-0,6 | 3,4-4,0 | -       | (0,15-0,22) Zr<br>(0,1-0,2)Cr                           |
|        |                                   | 1925          | -             | 1,3-1,8 | 0,2-0,7 | 3,4-4,0 | -       | (0,1-0,2) Zr<br>(0,1-0,2)Cr                             |
|        |                                   | B93           | 0,8-1,2       | 1,6-2,2 | -       | 6,5-7,3 | -       | (0,2-0,4)Fe                                             |
| 8      | Al-Zn-Mg-Cu                       | B93пч         | 0,8-1,2       | 1,6-2,2 | -       | 6,5-7,3 | -       | (0,2-0,4)Fe                                             |
|        |                                   | B95           | 1,4-2,0       | 1,8-2,8 | 0,2-0,6 | 5,0-7,0 | -       | (0,1-0,25)Cr                                            |
|        |                                   | B95пч,        | 1,4-2,0       | 1,8-2,8 | 0,2-0,6 | 5,0-6,5 | -       | (0,1-0,25)Cr                                            |
|        |                                   | B95оч         | -"            | -"      | -"      | -"      | -       | -"                                                      |
|        |                                   | B95пч         | 1,4-2,0       | 1,8-2,8 | 0,2-0,6 | 5,0-6,5 | -       | (0,1-0,25)Cr                                            |
|        |                                   | B96ц          | 2,0-2,6       | 2,3-3,0 | -       | 8,0-9,0 | -       | (0,1-0,2)Zr                                             |
|        |                                   | B96ц-3        | 1,4-2,0       | 1,7-2,3 | -       | 7,6-8,6 | -       | (0,1-0,2)Zr                                             |
| 9      | Al-Mg-Li                          | 1420          | -             | 4,5-6,0 | -       | -       | -       | (1,9-2,3)Li<br>(0,08-0,15)Zr                            |
| 10     | Al-Cu-Li                          | 1450          | 2,6-3,3       | -       | -       | -       | -       | (1,8-2,3)Li<br>(0,09-0,14)Zr,<br>Ce, Ti, Be             |
| 11     | Al-Cu-Mg-Li                       | 1440          | 1,2-1,9       | 0,6-1,1 | -       | -       | -       | (2,1-2,6)Li<br>(0,1-0,2)Zr, Ti,<br>Be                   |
|        |                                   | 1441          | 1,6-2,0       | 0,7-1,1 | -       | -       | -       | (1,7-2,0)Li<br>(0,04-0,16)Zr<br>(0,01-0,4)Mn, Ti,<br>Ni |
| 12     | Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | САП1          | -             | -       | -       | -       | -       | (6-8)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     |
|        |                                   | САП2          | -             | -       | -       | -       | -       | (9-12)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    |

\* Сплавы Д16, Д16ч, 1163 различаются допустимым содержанием примесей Fe и Si; сплавы АК4-1 и АК4-1ч различаются допустимым содержанием примесей Si, Mn и Zn; в сплаве 1925 по сравнению с 1915 допускается более высокое содержание примесей Fe, Si и Cu; сплавы В93 и В93пч различаются допустимым содержанием примеси Si; сплавы В95, В95пч, В95оч различаются допустимым содержанием примесей Fe и Si.

Таблица 1.4

**Состав основных промышленных алюминиевых  
литейных сплавов (основа – алюминий)**

| Группа | Система     | Марка сплава     | Компоненты, % |           |         |    |          |                    |                                                   |
|--------|-------------|------------------|---------------|-----------|---------|----|----------|--------------------|---------------------------------------------------|
|        |             |                  | Si            | Mg        | Cu      | Zn | Mn       | Ni                 | прочие                                            |
| 1      | 2           | 3                | 4             | 5         | 6       | 7  | 8        | 9                  | 10                                                |
| 1      | Al-Si       | AK12 (АЛ2)       | 10,0–13,0     | –         | –       | –  | –        | –                  | –                                                 |
| 2      | Al-Si-Mg    | AK9ч (АЛ4)       | 8,0м10,5      | 0,17–0,3  | –       | –  | 0,2–0,5  | –                  | –                                                 |
|        |             | AK7ч (АЛ9)       | 6,0–8,0       | 0,2–0,4   | –       | –  | –        | –                  | –                                                 |
|        |             | AK8л (АЛ34)      | 6,5–8,5       | 0,35–0,55 | –       | –  | –        | –                  | (0,1–0,3)Ti;<br>(0,15–0,4)Be                      |
| 3      | Al-Si-Mg-Cu | AK5M (АЛ5)       | 4,5-5,5       | 0,35-0,6  | 1,0-1,5 | –  | –        | –                  | –                                                 |
|        |             | AK8M (АЛ32)      | 7,5–9,0       | 0,3–0,5   | 1,0–1,5 | –  | 0,3–0,5  | –                  | (0,1–0,3)Ti                                       |
|        |             | AK12M2MgH (АЛ25) | 11,0–13,0     | 0,8–1,3   | 1,5–3,0 | –  | 0,3–0,6  | –                  | (0,05–0,2)Ti                                      |
|        |             | AK21M2,5H2,5     | 20,0–22,0     | 0,2–0,5   | 2,2–3,0 | –  | 0,2–0,4  | 0,8–1,3<br>2,2–2,8 | (0,1–0,3)Ti;<br>(0,2–0,4)Cr                       |
| 4      | Al-Cu       | АЛ7              | –             | –         | 4,0-5,0 | –  | –        | –                  | –                                                 |
|        |             | AM5 (АЛ 19)      | –             | –         | 4,5-5,3 | –  | 0,6–1,0  | –                  | (0,15–0,35)Ti                                     |
|        |             | AM4,5Кд (ВАЛ10)  | –             | –         | 4,5-4,9 | –  | 0,35–0,8 | –                  | (0,15–0,35)Ti;<br>(0,07–0,25)Cd                   |
|        |             | ВАЛ 14           | –             | –         | 4,5-5,0 | –  | 0,5–0,9  | –                  | (0,15–0,35)Ti;<br>(0,04–0,12)Cd;<br>(0,05–0,25)Zr |
|        |             | АЛ33 (ВАЛ1)      | –             | –         | 5,5-6,2 | –  | 0,6–1,0  | 0,8–1,2            | (0,05–0,2)Zr;<br>(0,15–0,3)Ce                     |

Окончание табл. 1.4

| 1 | 2            | 3                        | 4       | 5                  | 6       | 7                  | 8       | 9 | 10                                               |
|---|--------------|--------------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|---|--------------------------------------------------|
| 5 | Al-Mg        | AMr5K(АЛ13)              | 0,8–1,3 | 4,5–5,5            | –       | –                  | 0,1м0,4 | – | –                                                |
|   |              | AMr5Mц<br>(АЛ28)         | –       | 4,8–6,3            | –       | –                  | 0,4–1,0 | – | (0,05-0,15)Ti                                    |
|   |              | AMr6л<br>(АЛ23)          | –       | 6,0–7,0            | –       | –                  | –       | – | (0,05-0,15)Ti;<br>(0,05-0,2)Zr;<br>(0,02-0,1)Be  |
|   |              | AMr10(АЛ27)              | –       | 9,5–10,5           | –       | –                  | –       | – | (0,05-0,15)Ti;<br>(0,05-0,2)Zr;<br>(0,05-0,15)Be |
| 6 | Al-Zn-<br>Mg | АЦ4Mг<br>(АЛ24)<br>ВАЛ12 | –       | 1,5–2,0<br>2,0–2,8 | 1,0–1,5 | 3,5–4,5<br>6,5–7,5 | 0,2–0,5 | – | (0,1–0,2)Ti<br>(0,1–0,2)Ti;<br>(0,1–0,2)Zr       |

Долгое время в маркировке алюминиевых сплавов не было единой системы. Разные организации, присваивая буквенно-цифровые марки сплавам, руководствовались разными принципами. Выделяют марки, характеризующие состав сплава:

- АМг2 (алюминий–магний около 2%);
- АМц (алюминий–марганец).

Другие марки отражают технологию получения изделий:

- АЛ2, АЛ4, АЛ7, где буквы «АЛ» показывают, что сплав литейный, цифры после букв – порядковые номера сплавов, не несущие никакой полезной информации о сплаве;

- АК4, АК6 – алюминиевые сплавы дляковки.

В марках многих сплавов отражена организация-разработчик: ВАЛЮ, ВАЛ14 – литейные сплавы, разработанные во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ), ВАД1 – деформируемый сплав, разработанный там же.

В 70-х гг. XX в. была предпринята попытка в министерстве авиационной промышленности ввести единую цифровую систему маркировки алюминиевых сплавов, которая могла быть распространена и на другие сплавы.

В соответствии с этой системой первая цифра показывает основу сплава (для алюминия 1), вторая цифра

обозначает систему легирования (показывает основные легирующие компоненты), третья и четвертая цифры – порядковый номер сплава, при этом для деформируемых сплавов последняя цифра должна быть 0 или нечетное число, для литейных сплавов – четное число. Таким образом, главная информация о составе сплава определяется второй цифрой марки.

Для цифр, стоящих в марке на втором месте, приняты следующие обозначения:

- 0 – легирующих элементов нет, есть только примеси, т.е. обозначение разных сортов алюминия;
- 1 – сплавы системы Al–Cu–Mg, т.е. сплавы, в которых основными легирующими элементами являются Cu и Mg;
- 2 – сплавы системы Al–Cu–Mg;
- 3 – сплавы системы Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu;
- 4 – сплавы, легированные литием, а также малораспространяемыми в алюминии компонентами Mn, Cr, Zr и др.;
- 5 – сплавы системы Al–Mg;
- 9 – сплавы системы Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–Cu.

Цифры 6, 7, 8 (на втором месте) для маркировки алюминиевых сплавов пока не используются.

Цифровая маркировка применяется для деформируемых алюминиевых сплавов, разработанных в течение последних 20–25 лет; старые сплавы также имеют цифровую маркировку, не получившую распространения в производственной практике.

Для литейных алюминиевых сплавов цифровая маркировка вообще не нашла применения. Для них по ГОСТ 1583–89 введена единая система буквенно-цифровой маркировки, аналогичная применяемой для сталей: первая буква «А» показывает Al, последующие буквы – основные легирующие компоненты (К – кремний, М – медь, Mg – магний, Mn – марганец, Н – никель, Ц – цинк); числа, стоящие после букв, показывают среднее содержание данного компонента в % (по массе); если содержание компонента меньше единицы, буква, обозначающая данный компонент в марке, как правило (за редким исключением), не указывается. ГОСТ 1583–93 предусматривает обозначение

сплавов буквенно-цифровой маркой с указанием в скобках старой марки.

Буквы «ц» (чистый) или «оч» (особой чистоты) как для деформируемых, так и для литейных сплавов указывают на повышенную чистоту сплавов по примесям железа и кремния.

### Технический алюминий

Первичный алюминий в России производят по ГОСТ 11069–2001. Химический состав алюминия, отвечающий этому ГОСТу, приведен в табл. 1.5. Заводы по производству алюминия выпускают этот металл в виде чушек массой 20 и 1000 кг, а также в виде круглых слитков для прессования и плоских слитков для листовой прокатки.

Таблица 1.5

#### Марки первичного алюминия (по ГОСТ 11069–2001)

| Марка                        | Химический состав, % |                  |        |       |
|------------------------------|----------------------|------------------|--------|-------|
|                              | Al                   | Примеси не более |        |       |
|                              |                      | Fe               | Si     | всего |
| <i>Особо высокой чистоты</i> |                      |                  |        |       |
| A999                         | 99,999               | –                | –      | 0,001 |
| <i>Высокой чистоты</i>       |                      |                  |        |       |
| A995                         | 99,995               | 0,0015           | 0,0015 | 0,005 |
| A99                          | 99,99                | 0,003            | 0,003  | 0,010 |
| A97                          | 99,97                | 0,015            | 0,015  | 0,03  |
| A95                          | 99,95                | 0,030            | 0,030  | 0,05  |
| <i>Технической чистоты</i>   |                      |                  |        |       |
| A85                          | 99,85                | 0,08             | 0,06   | 0,15  |
| A8                           | 99,8                 | 0,12             | 0,10   | 0,20  |
| A7                           | 99,7                 | 0,16             | 0,16   | 0,30  |
| A6                           | 99,6                 | 0,25             | 0,20   | 0,40  |
| A5                           | 99,5                 | 0,30             | 0,30   | 0,50  |
| A0                           | 99,0                 | 0,50             | 0,50   | 1,0   |
| A5E*                         | 99,5                 | 0,35**           | 0,12   | 0,50  |

\* Сумма Ti + V + Mn + Cr < 0,015%.

\*\* Железо не менее 0,18%1.

Буква «E» в марках первичного алюминия показывает, что металл предназначен для электротехнических це-



лей. В таком алюминии жестко ограничивается допустимое содержание примесей титана, ванадия, марганца и хрома, которые сильно снижают электропроводность. Марки АД00, АД0 и АД деформируемого алюминия по допустимому суммарному содержанию примесей железа и кремния соответствуют маркам первичного алюминия А7, А5 и А0. Отличие заключается только в том, что в марках деформируемого алюминия в более широких пределах допускается изменение соотношения в содержаниях примесей железа и кремния.

Из технического алюминия изготавливают листы, проволоку, прутки. Основная продукция – листы, они составляют около 60% всей листовой продукции, выпускаемой металлургическими заводами по обработке алюминиевых сплавов. Основные примеси в алюминии – железо и кремний.

## **Деформируемые алюминиевые сплавы**

### ***Технически неупрочняемые деформируемые сплавы***

**Сплавы системы Al–Mn (АМц).** Сплавы данной системы широко применяют в промышленности, так как они обладают повышенной по сравнению с алюминием прочностью, высокой пластичностью и технологичностью, высокой коррозионной стойкостью, хорошо свариваются. Из сплавов этой системы получают в основном листовую продукцию и в меньшей степени трубы.

Марганец образует с алюминием ряд соединений. Наиболее богатое алюминием соединение  $Al_6Mn$  образует с ним эвтектику, содержащую 1,95% Mn, кристаллизующуюся при 658,5 °С.

Промышленный сплав системы Al–Mn (его маркируют АМц) содержит от 1 до 1,6% Mn. В действительности, сплав АМц не является двойным, примеси железа и кремния, неизбежные в алюминии, делают его многокомпонентным.

Конечной термической обработкой сплава АМц обычно является рекристаллизационный отжиг. Очень высокая пластичность сплава дает возможность значительно

упрочнить его холодной деформацией. Листы из сплава АМц выпускают в мягком и полунагартованном состояниях (АМцМ и АМцН2), редко – в нагартованном (Н). Свойства сплава АМц в этих состояниях приведены в табл. 1.6. Мягкие полуфабрикаты получают отжигом нагартованного материала.

Таблица 1.6

**Типичные механические свойства листов из сплава АМц**

| Сплав | $\sigma_0$ , МПа | $\sigma_{1,2}$ , МПа | $\delta$ , % | НВ |
|-------|------------------|----------------------|--------------|----|
| АМцМ  | 130              | 50                   | 23           | 30 |
| АМцН2 | 160              | 130                  | 10           | 40 |

**Сплавы системы Al-Mg (АМг).** Первый отечественный промышленный сплав системы Al-Mg (альтмаг) был выпущен в 1930 г. Ю.Г. Музалевским и содержал 5% Mg; 0,45% Mn; 0,1% Ti, остальное – Al. Этот сплав применяют до сегодняшнего дня под маркой АМг5.

С 1936 г. началось широкое внедрение низкопрочностного сплава этой системы АМг, содержащего 2,5% Mg. Этот сплав был предложен как заменитель сплава АМц и отличался от последнего более высокой прочностью, но несколько худшей свариваемостью, затем появился сплав АМг3. Позднее был разработан сплав АМг6, наиболее прочный из промышленных сплавов системы Al-Mg. Средний состав основных деформируемых сплавов системы Al-Mg приведен в табл. 1.7.

Таблица 1.7

**Средний химический состав промышленных сплавов системы Al-Mg (основа – алюминий)**

| Сплав | Содержание компонента, % |      |      |      |
|-------|--------------------------|------|------|------|
|       | Mg                       | Mn   | Ti   | Si   |
| АМг1  | 1,1                      | –    | –    | –    |
| АМг2  | 2,3                      | 0,4  | –    | –    |
| АМг3  | 3,5                      | 0,45 | –    | 0,65 |
| АМг5  | 5,3                      | 0,55 | 0,06 | –    |
| АМг6  | 6,3                      | 0,65 | 0,06 | –    |

Промышленные сплавы обязательно содержат примесь кремния, в связи с чем в их структуре может присутствовать силицид магния  $Mg_2Si$ . При содержании в спла-

вах железа, марганца и кремния возможно образование соединения  $AlFeSiMn$ .

Магний существенно упрочняет алюминий (рис. 1.3). Каждый процент (по массе) магния повышает прочность алюминия примерно на 30 МПа. Относительное удлинение сохраняется достаточно высоким (до 11–12% Mg). Сплавы, содержащие до 8% Mg, термически не упрочняются. Лишь при содержании более 8% Mg сплавы системы Al–Mg упрочняются в результате термической обработки. Однако деформируемые сплавы со столь высоким содержанием магния не применяют. При повышенной концентрации магния (более 6%) резко ухудшается коррозионная стойкость, сплавы становятся склонными к коррозии под напряжением.

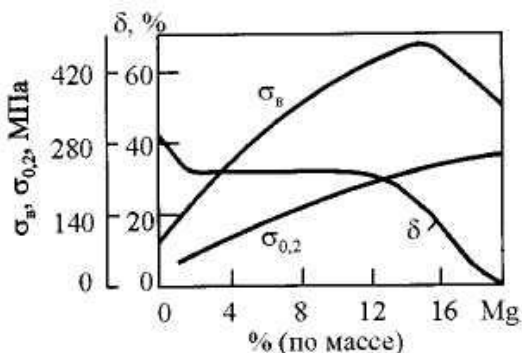


Рис. 1.3. Влияние магния на механические свойства алюминиево-магниевых сплавов

В последние годы сплавы системы Al–Mg все шире применяют для изготовления сварных конструкций.

Чтобы улучшить свойства, сплавы системы Al–Mg дополнительно легируют марганцем, хромом, титаном и ванадием. Марганец и хром упрочняют сплавы этой системы: 0,3–0,5% Mn или 0,1–0,2% Cr увеличивают временное сопротивление на 20–25 МПа.

Марганец присутствует в виде дисперсных частиц фазы  $Al_6Mn$ , являющихся продуктами распада твердого раствора марганца в алюминии, образующегося при кристаллизации. Эти дисперсные частицы упрочняют шив, затрудняют процессы, протекающие при рекристалл-

лизации, и способствуют получению в полуфабрикатах более мелкозернистой структуры.

Основное назначение малых добавок титана – улучшить свариваемость сплавов. Титан, обуславливая резкое измельчение зерна в наплавленном металле, уменьшает склонность сплавов к образованию трещин при сварке и улучшает механические свойства сварных соединений.

Легирование сплавов системы Al–Mg хромом, титаном и ванадием уменьшает их склонность к коррозии под напряжением. Небольшие добавки кремния (0,5–0,6%) благоприятно влияют на свариваемость сплавов типа AMg.

Большое влияние на свойства сплавов системы Al–Mg оказывают ничтожно малые количества натрия (тысячные доли процента). Натрий может переходить в металл при плавке из криолитсодержащих флюсов. Растворимость натрия в жидком и твердом алюминии практически равна нулю. При кристаллизации натрий оттесняется растущими ветвями дендритов алюминия в междендритные пространства, которые сильно обогащаются натрием. На границах дендритов возникают прослойки из чистого натрия с температурой плавления 96 °С. Поэтому сплавы типа AMg, загрязненные натрием, оказываются склонными к горячеломкости.

Отрицательно влияют на свойства сплавов AMg также железо и медь. Медь несколько повышает прочностные свойства сплавов, но снижает коррозионную стойкость и свариваемость, поэтому содержание меди в сплавах типа AMg не должно превышать 0,05–0,1%.

Ценность сплавов системы Al–Mg определяется сочетанием удовлетворительной прочности, высокой пластичности (табл. 1.8), очень хорошей коррозионной стойкости и свариваемости. Все эти качества обусловили широкое применение алюминиево-магниевых сплавов для сварных конструкций. Особенно велико значение сплава AMg6 –наиболее прочного из числа термически неупрочняемых сплавов.

Таблица 1.8

**Типичные механические свойства сплавов системы Al–Mg**

| Сплав    | Обработка         | $\sigma_0$ , МПа | $\sigma_{-0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | НВ | $\sigma_1$ , МПа |
|----------|-------------------|------------------|-----------------------|--------------|----|------------------|
| AMг2M    | Отжиг             | 200              | 100                   | 23           | 45 | 110              |
| AMг2H2   | Неполный отжиг    | 250              | 200                   | 10           | 60 | 135              |
| AMг3M    | Отжиг             | 220              | 110                   | 20           | 50 | –                |
| AMг5M    | То же             | 300              | 150                   | 20           | 65 | –                |
| AMг6M    | – «–»             | 350              | 170                   | 20           | 70 | 130              |
| AMг6H    | Нагартовка на 20% | 390              | 300                   | 10           | –  | –                |
| AMг6HПП* | Нагартовка на 30% | 430              | 350                   | 8            | –  | –                |

\* Нагартованный повышенной прочности (ПП).

Важным показателем свариваемости сплава является отношение прочности сварного соединения к прочности основного металла сплава AMг6, которое составляет 0,85–0,9.

Недостаток сплавов системы Al–Mg – относительно низкий предел текучести. Чтобы повысить его, сплавы AMг5, особенно AMг6, все чаще подвергают холодной деформации на 20–30%.

Алюминиево-магниевые сплавы отличаются высокой вибрационной стойкостью.

### ***Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой***

**Оптимальный комплекс свойств термически упрочняемых алюминиевых сплавов в зависимости от условий работы.** При выборе конструкционного материала для той или иной конкретной конструкции всегда анализируют комплекс механических и коррозионных свойств, присутствующих данному материалу. В одном случае наиболее целесообразно применение высокопрочного материала, даже если он имеет низкую коррозионную стойкость, в другом – коррозионностойкого материала умеренной прочности, в третьем главным требованием является сопротивление ползучести при повышенной температуре и т.д. Один и тот же материал в зависимости от условий работы в конструкции может применяться в разных состояниях.

При выборе алюминиевых сплавов для нагруженных, в том числе ответственных, самолетных конструкций до

недавнего времени предпочтение отдавалось высокопрочным сплавам, термически обработанным на максимальную прочность. Такой подход можно объяснить тем, что, во-первых, удельная прочность является в авиации одним из главных требований к материалам, во-вторых, тем, что алюминиевые сплавы, даже высокопрочные, менее склонны к хрупкому разрушению, чем стали. Однако опыт применения в авиационных конструкциях полуфабрикатов из алюминиевых сплавов с максимальной прочностью показывает, что эти полуфабрикаты в ряде случаев имеют невысокую *конструкционную прочность*.

Термин «конструкционная прочность» был введен в связи с тем, что прочность материала, определенная при испытании стандартных (гладких) образцов, не всегда характеризует поведение материала в конструкциях. В процессе эксплуатации конструкции преждевременное разрушение деталей часто происходит при напряжениях меньших, чем предел текучести, и даже меньших, чем предел выносливости.

В реальных условиях эксплуатации детали, в отличие от испытываемых при контроле материала образцов, имеют зародыши разрушения, всякого рода микро- и макроскопические повреждения. Это внутренние металлургические дефекты (оксидные плены, расслоения, грубые включения интерметаллидных фаз), дефекты поверхности (риски, забоины), нанесенные при обработке деталей или в процессе эксплуатации. Дефекты, а также некоторые конструктивные элементы деталей (отверстия, острые углы и т.д.) служат концентраторами напряжения. И поэтому при невысоком среднем уровне напряжений в детали в зоне дефекта напряжения могут быть в несколько раз большими, что определяет возможность возникновения и распространения трещин.

Долговечность работы материала в конструкции определяется не только вязкостью разрушения, но в значительной степени его коррозионными характеристиками, прежде всего склонностью к коррозии под напряжением, которая оценивается величиной критического напряжения при стандартных условиях испытания, а также склонно-

стью к расслаивающей коррозии, которая оценивается в баллах по стандартной методике.

Применительно к высокопрочным термически упрочняемым алюминиевым сплавам наметились два основных пути получения оптимального комплекса свойств, необходимых для надежной работы этих сплавов в ответственных конструкциях:

1. Повышение чистоты сплавов по основным металлическим примесям (Fe и Si), т.е. снижение в сплавах допустимого содержания примесей железа и кремния. В большинстве алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784–74 допускается до 0,5% Fe и до 0,5% Si. Снижение допустимого содержания железа и кремния до 0,1–0,3% приводит к резкому уменьшению объемной доли нерастворимых интерметаллидных фаз и значительному повышению вязкости разрушения. При этом остальные свойства сплавов изменяются незначительно. В связи с этим в последние годы начали применять сплавы повышенной чистоты.

2. Применение режимов старения, обуславливающих некоторое перестаривание материала. Такие режимы называют «смягчающим режимом» старения и для деформируемых сплавов обозначаются шифрами T2 и T3 (старение на максимальную прочность обозначают шифром T1, а закалку с последующим естественным старением – T), T3 соответствует более сильному перестариванию, чем T2. Смягчающее старение по сравнению со старением на максимальную прочность обуславливает некоторое снижение прочности, но существенное повышение вязкости разрушения, устойчивости против коррозии под напряжением и расслаивающей коррозии.

Комплекс свойств высокопрочных сплавов после смягчающего старения в случае применения их для ответственных конструкций длительного ресурса наиболее предпочтителен. Это не исключает применения высокопрочных сплавов в состоянии T1 для высоконагруженных конструкций малого ресурса при условии надежной защиты от коррозии.

**Сплавы на основе системы Al–Cu–Mg с добавками марганца (дуралюмины).** В 1908 г. немецкий исследова-

тель А. Вильм предложил способ упрочнения (закалку и старение) алюминиевого сплава с медью и магнием (4,0% Cu; 0,5% Mg; 0,5% Mn), который позднее получил название дуралюмина и стал родоначальником группы весьма важных, сыгравших огромную роль в развитии самолетостроения, промышленных сплавов (табл. 1.9). В табл. 1.3 приведено среднее содержание легирующих компонентов в дуралюминах, что необходимо для анализа структуры и свойств этих сплавов.

Все дуралюмины, применяющиеся в настоящее время в промышленности, можно разделить на четыре подгруппы:

1) классический дуралюмин (Д1), состав которого мало изменился со времени А. Вильма;

2) дуралюмин повышенной прочности (Д16), отличающийся от Д1 более высоким содержанием магния;

3) дуралюмины повышенной жаропрочности (Д19, ВАД1 и ВД17), главным отличием которых от Д1 является увеличенное отношение Mg/Cu;

4) дуралюмины повышенной пластичности (Д18, В65), которые отличаются от Д1 пониженным содержанием всех или некоторых компонентов.

Таблица 1.9

**Средний состав промышленных дуралюминов  
(основа – алюминий)**

| Сплав     | Содержание компонентов, % |      |      |      |      |
|-----------|---------------------------|------|------|------|------|
|           | Cu                        | Mg   | Mn   | Ti   | Zr   |
| Д1        | 4,3                       | 0,6  | 0,6  | –    | –    |
| Д16, Д16ч | 4,3                       | 1,5  | 0,6  | –    | –    |
| Д19       | 4,0                       | 2,0  | 0,75 | –    | –    |
| ВАД1      | 4Д                        | 2,5  | 0,60 | 0,06 | 0,15 |
| ВД17      | 3,0                       | 2,2  | 0,55 | –    | –    |
| Д18       | 2,6                       | 0,35 | –    | –    | –    |
| В65       | 4,2                       | 0,25 | 0,4  | –    | –    |

Дуралюмины, всегда содержащие неизбежные примеси железа и кремния (десятые доли процента), являются многокомпонентными сплавами с весьма сложным фазовым составом.

Изделия из дуралюмина обычно подвергаются закалке и в большинстве случаев естественному старению. Отличительная особенность термической обработки дуралюминов –



необходимость жесткого соблюдения рекомендованной температуры нагрева под закалку.

Допустимые колебания температуры нагрева под закалку, особенно высокопрочных дуралюминов (Д16, Д19, ВАД1), очень невелики (Д1 – 495–510 °С; Д19 – 495–505 °С; Д16 – 492–500 °С).

Нагрев под закалку до температуры выше допустимых пределов может привести к оплавлению легкоплавких структурных составляющих по границам зерен, что сопровождается окислением металла и образованием при последующей кристаллизации жидкой фазы усадочной пористости.

При закалке дуралюминов важно обеспечить высокую скорость охлаждения, поэтому их следует охлаждать в холодной воде при минимальном времени переноса нагретых изделий из печи в воду.

Все дуралюмины, за исключением низколегированного Д18, интенсивно упрочняются (после закалки) при естественном старении. Время достижения максимальных прочностных характеристик зависит от соотношения Mg/Cu; чем больше это отношение, тем медленнее идет старение. Так, для сплавов Д1 и Д16 максимальная прочность достигается через 4 сут., для сплава Д19 – через 5 сут., а для сплава ВАД1 – через 10 сут.

Естественное старение дуралюминов обеспечивает сочетание высоких значений временного сопротивления разрыву и относительного удлинения. При искусственном старении временное сопротивление разрыву практически не меняется.

Из всех дуралюминов наибольшее распространение получили сплавы Д1 и Д16, широко использующихся в авиационной промышленности. Из них изготавливают листы, профили, трубы, проволоку, штамповки и поковки.

Дуралюмины повышенной пластичности Д18 и В65 имеют узкое назначение – из них изготавливают заклепки, применяющиеся в самолетостроении. Из сплавов ВД17, Д19 и ВАД1 можно получать различные деформированные полуфабрикаты, предназначенные для работы при повышенных температурах, однако их широко не применяют.

Сплав Д16 при комнатной температуре обладает наиболее высокой прочностью по сравнению с другими дуралюминами.

Для сплавов Д18 и В65, из которых изготавливают только заклепки, основной прочностной характеристикой является сопротивление срезу.

Из сплавов Д16 и Д19 можно также изготавливать заклепки. Для коррозионной стойкости конструкции лучше всего, когда заклепки сделаны из того же материала, что и склепываемые детали. Однако сплавы Д16 и Д19 весьма неудобны в производстве, поскольку заклепки из этих сплавов должны быть использованы непосредственно после закалки (в течение 1–2 ч для сплава Д16 и 4–6 ч для сплава Д19). Более длительное естественное старение этих сплавов приводит к снижению пластичности, и в заклепках при их расклепывании могут появиться трещины.

Сплав Д18 обладает высокой пластичностью, поэтому он хорошо расклепывается в естественно состаренном состоянии в течение любого времени после закалки. Однако для ответственных силовых соединений он не может быть применен из-за низкой прочности.

Сплав В65 сочетает высокую технологичность (хорошо расклепывается после искусственного старения по режиму 75 °С, 24 ч) с высокой прочностью, почти такой же, как у Д16.

Сплавы Д19 и ВАД1, как уже отмечалось, отличаются повышенной жаропрочностью, что определяется их фазовым составом.

Важная отличительная особенность сплава ВАД1 по сравнению с другими дуралюминами – его хорошая свариваемость. Сплав ВАД1 сваривается не только контактной точечной сваркой, как остальные дуралюмины, но и аргоно-дуговой.

Все дуралюмины отличаются высокой прочностью в сочетании с высокой пластичностью, что определило их широкое использование в самолетостроении, особенно сплава Д16, а также пониженной коррозионной стойкостью и нуждаются в специальных средствах защиты от коррозии. Наибольшее распространение в промышленно-

сти получили два способа: плакировка (покрытие) дуралюмина техническим алюминием (А7, А8) и электрохимическое оксидирование, которое обычно называют анодированием.

**Сплавы на основе системы Al-Mg-Si.** Эти сплавы хорошо известны под названием «авиаль» (авиационный алюминий). Первый термически упрочняемый сплав системы Al-Mg-Si был получен в 1923 г.

Деформируемые сплавы системы Al-Mg-Si легированы в меньшей степени, чем дуралюмины; суммарное содержание легирующих компонентов в этих сплавах обычно колеблется в пределах от 1 до 2%. Промышленные сплавы системы Al-Mg-Si (табл. 1.10) менее прочны, чем дуралюмины, но более пластичны и обладают лучшей коррозионной стойкостью. Сплав АВ (так же, как и АД35), обладая максимальной среди сплавов Al-Mg-Si прочностью, подвержен межкристаллитной коррозии, которая связана с выделением избыточного кремния по границам зерен при искусственном старении. Разработанные позднее сплавы АД31 и АД33 уступают сплаву АВ по прочности, но отличаются более высокой коррозионной стойкостью.

Таблица 1.10

**Средний состав промышленных сплавов системы Al-Mg-Si (основа – алюминий)**

| Сплав | Содержание компонентов, % |     |     |      |      |
|-------|---------------------------|-----|-----|------|------|
|       | Mg                        | Si  | Cu  | Mn   | Cr   |
| АВ    | 0,7                       | 0,9 | 0,4 | 0,25 | –    |
| АД31  | 0,7                       | 0,5 | –   | –    | –    |
| АД33  | 1,0                       | 0,6 | 0,3 | –    | 0,25 |
| АД35  | 1Д                        | 1,0 | –   | 0,7  | –    |

Небольшие добавки меди в сплавах АВ и АД33 несколько повышают прочность, но так как они снижают коррозионную стойкость, сплав АВ иногда применяют без меди.

Марганец и хром в сплавах системы Al-Mg-Si играют ту же роль, что и в других сплавах (Al-Mg, дуралюмин).

Сплавы системы Al–Mg–Si закалывают. Температуру нагрева под закалку сплавов Al–Mg–Si обычно выбирают в пределах 520–540 °С, причем строгого соблюдения выбранной температуры, как это принято для дуралюминов, здесь не требуется.

Критическая скорость охлаждения (при закалке) у сплавов Al–Mg–Si меньше, чем у дуралюминов, и тем меньше, чем менее легирован сплав. Наименьшая критическая скорость охлаждения наблюдается у сплава АД31, так как он, во-первых, наименее легирован магнием и кремнием, во-вторых, не содержит добавок переходных металлов (Mn, Cr и др.), которые уменьшают устойчивость твердого раствора основных компонентов в алюминии.

Закаленные сплавы системы Al–Mg–Si упрочняются при естественном и искусственном старении. Естественное старение протекает несколько медленнее, чем в дуралюминах, прирост прочности продолжается в течение двух недель после закалки.

На практике чаще применяют искусственное старение, так как оно дает больший прирост прочности.

Сочетание достаточной прочности с высокой технологичностью и хорошей коррозионной стойкостью, удовлетворительная свариваемость, хорошее качество поверхности после анодирования определяют широкое применение сплавов системы Al–Mg–Si, особенно АД31, в различных отраслях народного хозяйства (строительстве, транспортном машиностроении и т.д.). Сплав АД31, в частности, широко применяют в строительных конструкциях.

Использование сплавов Al–Mg–Si в народном хозяйстве обеспечивает хорошие эксплуатационные свойства изделий (например, длительную службу в атмосферных условиях).

Качество поверхности изделий из сплавов системы Al–Mg–Si в том случае, когда для получения декоративного вида их подвергают специальной обработке (полировке, анодированию с последующим наполнением оксидной пленки различными красителями), зависит от чистоты сплава, главным образом, от содержания железа. Для декоративных изделий (отделка легковых автомобилей, кор-

пусы часов и т.д.) применяют сплавы типа АД31 с пониженным содержанием примесей ( $< 0,1\% \text{ Fe}$ ).

**Сплавы на основе системы Al-Mg-Si-Cu.** Широко распространены в качестве специальных сплавов, предназначенных для изготовления поковок и штамповок. В России используют сплав АК6, разработанный С.М. Вороновым, и сплав АК8.

Сплавы системы Al-Mg-Si-Cu по своей природе имеют нечто общее с дуралюминами (Al-Cu-Mg) и с авиалами (Al-Mg-Si), они занимают промежуточное положение между ними (табл. 1.11).

Отличаются сплавы АВ, АК6 и АК8 содержанием меди.

Сплавы подвергают закалке и искусственному старению. Температура нагрева под закалку сплава АК6 составляет  $520 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , сплава АК8 –  $505 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Искусственное старение обоих сплавов проводят по режиму:  $160\text{--}170 \text{ }^\circ\text{C}$ , 12–15 ч.

Для сплава АК6 характерно сочетание достаточно высокой прочности и очень хорошей пластичности в нагретом и холодном состояниях. Поковки и штамповки сложной конфигурации из этого сплава широко применяют в авиационной и других отраслях промышленности.

Сплав АК8 относится к числу наиболее прочных алюминиевых сплавов и применяется для ответственных силовых штамповок.

Таблица 1.11

**Средний состав промышленных сплавов системы Al-Mg-Si-Cu в сравнении со сплавами АВ и Д1**

| Сплав | Содержание компонентов, % |         |     |      |
|-------|---------------------------|---------|-----|------|
|       | Mg                        | Si      | Cu  | Mn   |
| АВ    | 0,7                       | 0,9     | 0,4 | 0,25 |
| АК6   | 0,65                      | 0,9     | 2,2 | 0,6  |
| АК8   | 0,6                       | 0,9     | 4,3 | 0,7  |
| Д1    | 0,6                       | примесь | 4,3 | 0,6  |

Сплав АК8 существенно уступает сплаву АК6 по вязкости разрушения, но обладает хорошей свариваемостью. Оба сплава (АК6 и АК8) характеризуются низкой коррозионной стойкостью, и изделия из них нуждаются в тщательной защите от коррозии.

**Сплавы на основе системы Al–Cu–Mg с добавками железа и никеля.** По своей природе сплавы этой группы близки к дуралюминам. Основные легирующие компоненты, обуславливающие возможность упрочнения термообработкой в них, также как и в дуралюминах, – медь и магний. Кроме этих металлов, сплавы содержат специальные добавки практически нерастворимых в твердом алюминии железа и никеля. Железо и никель при нормальной температуре не улучшают механических свойств. Они даже несколько снижают пластичность при незначительном увеличении прочности, но при повышенных температурах улучшают механические свойства. Сплавы системы Al–Cu–Mg с добавками железа и никеля предназначены для работы при повышенных температурах.

Наиболее типичный представитель этой группы – сплав АК4–1. Аналогичные сплавы используют в Англии, Франции и других странах. Среднее содержание легирующих элементов в сплаве АК4–1 следующее: 2,2% Cu; 1,6% Mg; 1,1% Fe; 1,1% Ni; 0,06% Ti.

Сплав АК4–1 подвергают закалке с  $530 \pm 5$  °С в холодной или горячей (для уменьшения внутренних напряжений) воде и старению при 190–200 °С в течение 12–24 ч.

При температурах от 20 до 200 °С сплав АК4–1 не имеет преимуществ по прочности перед жаропрочными дуралюминами (Д19, ВД1). Однако при температурах 250–300 °С сплав АК4–1 является одним из наиболее прочных алюминиевых сплавов.

Высокая жаропрочность сплава АК4–1 (а также сплава АК4, отличающегося специальной добавкой кремния) в сочетании с высокой пластичностью при температурах горячей деформации обусловили основную область применения этих сплавов – для изготовления поковок и штамповок, работающих при температурах 250–200 °С. В частности, из сплавов АК4–1 и АК4 изготавливают штампованные поршни авиационных двигателей.

**Сплавы на основе системы Al–Cu–Mn.** Деформируемые алюминиевые сплавы с медью и добавками марганца (титана, циркония, ванадия) имеют высокие механические свойства при комнатной, повышенных (до +250 °С) и крио-

генных температурах (до  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), технологичны в металлургическом производстве и отличаются хорошей свариваемостью.

Средний химический состав промышленных сплавов системы Al–Cu–Mn приведен в табл. 1.12.

Таблица 1.12

**Средний химический состав  
сплавов системы Al–Cu–Mn**

| Сплав | Содержание компонентов, % |     |      |      |     |
|-------|---------------------------|-----|------|------|-----|
|       | Cu                        | Mn  | Ti   | Zr   | V   |
| Д20   | 6,5                       | 0,6 | 0,15 | –    | –   |
| 1201  | 6,3                       | 0,3 | 0,06 | 0,17 | 0,1 |

Сплавы подвергают закалке при температуре  $535\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и последующему искусственному старению при  $170\text{--}190\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 12–18 ч.

Сплавы Д20 и 1201 относятся к числу жаропрочных алюминиевых сплавов. Однако, если в дуралюминах Д19 и ВАД1 для обеспечения повышенной жаропрочности отношение содержания магния к содержанию меди увеличено по сравнению со сплавом Д16, то в сплаве Д20 магния нет, т.е. это отношение сведено до нуля.

Сплавы Д20 и 1201 хорошо свариваются при контактной и аргоно-дуговой сварке. Временное сопротивление разрыву сварных соединений при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (без их термической обработки) составляет 0,5–0,7 от временного сопротивления основного материала, а при  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  – до 0,9, поскольку литая структура сварного шва обеспечивает меньшее разупрочнение шва при нагреве, чем основного материала. Если сварное соединение подвергнуть дополнительно полной термообработке, то его прочность при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  может быть повышена до 0,9 от прочности основного металла.

Коррозионная стойкость сплавов Д20 и 1201 невысокая. Для защиты от коррозии применяют те же средства, что и для дуралюминов (плакировка алюминием или сплавом Al + 1% Zn, анодное оксидирование). Сварные соединения, отличающиеся низкой коррозионной стойкостью, следует защищать от коррозии особенно тщательно.

Из сплавов Д20 и 1201 изготавливают все виды деформированных полуфабрикатов: листы, плиты, профили, штамповки и поковки. Эти сплавы могут использоваться для ответственных сварных конструкций, работающих в широком интервале температур: от  $-250$  до  $+250-300$  °С.

**Сплавы на основе систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu.** Эффект упрочнения сплавов системы Al-Zn-Mg при термической обработке был открыт в 1924 г. С тех пор и до настоящего времени эти сплавы привлекают внимание металловедов всего мира. Перспективность системы Al-Zn-Mg для разработки промышленных сплавов объясняется тем, что из всех легирующих компонентов цинк и магний отличаются самой высокой растворимостью в алюминии при повышенных температурах (цинк 82,8%, магний 17,4%), резко уменьшающейся при охлаждении.

В 30-х гг. XX в. в России и Германии были получены и рекомендованы для применения в промышленности деформируемые сплавы системы Al-Zn-Mg с суммарным содержанием 10–12% (Mg+Zn) и добавками марганца. Эти сплавы характеризовались хорошими механическими свойствами ( $\sigma_s > 580$  МПа,  $\sigma_{0,2} > 500$  МПа,  $\delta > 10\%$ ), однако они не нашли применения из-за резко выраженной подверженности коррозии под напряжением. При хорошей общей коррозионной стойкости образцы из этих сплавов разрушались в течение нескольких часов, если они подвергались действию растягивающих напряжений и коррозионно-активной среды (например, обычной атмосферы).

**Сплавы на основе системы Al-Zn-Mg-Cu.** Обширные исследования сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu с добавками марганца и хрома были проведены в 40-х гг. XX в. Под руководством И.Н. Фридляндера и С.М. Воронова в ВИАМе был разработан новый высокопрочный сплав, превосходящий по прочности дуралюмины, – В95 (марка отражает основных разработчиков сплава: В – ВИАМ, 95 – завод 95, на котором в то время работал С.М. Воронов). Примерно в то же время аналогичный сплав был получен в США.

Все сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu подвергают закалке и искусственному старению. Закалку проводят при темпера-



туре 460–470 °С в холодной или подогретой (до 80–100 °С) воде. Нагрев воды весьма важен при закалке крупногабаритных профилей и штамповок во избежание их растрескивания или сильного коробления. Некоторое уменьшение скорости охлаждения при закалке в горячей воде в отличие от дуралюминов отрицательно не влияет на коррозионную стойкость сплавов Al-Zn-Mg-Cu. Наоборот, с уменьшением скорости охлаждения при закалке склонность к коррозии под напряжением сплавов Al-Zn-Mg-Cu (и Al-Zn-Mg) уменьшается.

Сплавы В95, В96Ц, В93 упрочняются при естественном старении, причем скорость естественного старения значительно меньше, чем у дуралюминов, рост прочности не заканчивается через месяц после закалки.

Из всех рассмотренных сплавов В95 – наиболее универсальный конструкционный материал, из него изготавливают все виды деформированных полуфабрикатов: листы, плиты, профили, трубы, поковки, штамповки. Сплав В95 значительно превосходит по прочности дуралюмины и широко применяется в самолетостроении для обшивки (листы) и внутреннего набора (профили).

Более чистые по примесям железа и кремния модификации сплава В95 – В95пч (< 0,25% Fe и < 0,1% Si) и В95оч (< 0,15% Fe и < 0,1% Si) практически не отличаются по статической прочности и пределу выносливости от В95, но существенно превосходят последний по ударной вязкости и по вязкости разрушения.

Сплавы В95пч и В95оч постепенно вытесняют сплав В95 из самолетных конструкций, поскольку они обеспечивают более длительный ресурс и большую надежность работы изделий.

При создании сплава В96Ц преследовали цель получить сплав с максимальной прочностью. Для этого в сплаве было повышено по сравнению с В95 содержание всех основных легирующих компонентов (цинка, магния, меди) (табл. 1.13).

Таблица 1.13

**Среднее содержание легирующих элементов и примесей  
в промышленных сплавах системы Al-Zn-Mg-Cu**

| Сплав  | Содержание компонентов и примесей, % |      |     |     |      |      |         |       |
|--------|--------------------------------------|------|-----|-----|------|------|---------|-------|
|        | Zn                                   | Mg   | Cu  | Mn  | Cr   | Zr   | Fe      | Si    |
| B95    | 6,0                                  | 2,3  | 1,7 | 0,4 | 0,18 | –    | < 0,5   | < 0,5 |
| B95пч  | 5,75                                 | 2,3  | 1,7 | 0,4 | 0,18 | –    | < 0,25  | < 0,1 |
| B95оч  | 5,75                                 | 2,3  | 1,7 | 0,4 | 0,18 | –    | < 0,15  | < 0,1 |
| B96Ц   | 8,5                                  | 2,65 | 2,3 | –   | –    | 0,15 | < 0,4   | < 0,3 |
| B96Ц-3 | 8,1                                  | 2,0  | 1,7 | –   | –    | 0,15 | < 0,2   | < 0,1 |
| B93    | 6,9                                  | 1,9  | 1,0 | –   | –    | –    | 0,2–0,4 | < 0,2 |
| B93пч  | 6,9                                  | 1,9  | 1,0 | –   | –    | –    | 0,2–0,4 | < 0,1 |
| 1933   | 6,9                                  | 1,9  | 1,0 | –   | –    | 0,12 | < 0,15  | < 0,1 |

Сплав B96Ц – самый высоколегированный из всех деформируемых алюминиевых сплавов. По прочности при нормальной температуре он превосходит все алюминиевые сплавы, в том числе сплав B95. Однако B96Ц отличается пониженными по сравнению с B95 пластичностью, коррозионной стойкостью и вязкостью разрушения, более чувствителен к надрезам и прочим концентраторам напряжения.

Сплав B93 предназначен для изготовления поковок и штамповок (преимущественно крупных).

Сплав 1933 является модификацией сплава B93: не отличаясь от B93 по содержанию основных компонентов, сплав 1933 содержит добавку Zr (0,12%) вместо Fe. Такое изменение состава обуславливает более высокую прочность, вязкость разрушения и сопротивление усталости, поэтому сплав 1933 будет постепенно вытеснять сплав B93 в самолетостроении. Он имеет лишь один недостаток – худшую прокаливаемость, чем B93: критическая скорость охлаждения при закалке у сплава 1933 составляет 20 °C/с, а у B93 – 3 °C/с.

Таким образом, на основе системы Al-Zn-Mg-Cu были разработаны самые прочные деформируемые алюминиевые сплавы для листов (B95, B95пч, B95оч), профилей (B95, B95пч, B95оч, B96Ц), поковок и штамповок (B95, B93, B96Ц-3, B96Ц).

Сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu (в основном В95 и В93) нашли широкое применение в авиационной промышленности, но все же они не вытеснили ранее внедренные, хотя и менее прочные сплавы систем Al-Cu-Mg (Д16) и Al-Cu-Mg-Si (АК6, АК8). Это объясняется рядом недостатков сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu. Например, по сравнению с дуралюмином Д16 они более чувствительны к концентраторам напряжений, имеют меньшую вязкость разрушения, склонны к коррозии под напряжением и характеризуются низкой жаропрочностью. Так, сплав В95 при температурах выше 125 °С уступает по прочности сплаву Д16, хотя при 20 °С он значительно прочнее дуралюмина. Поэтому сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu мало перспективны для скоростных сверхзвуковых самолетов, обшивка которых испытывает аэродинамический нагрев (до 125–150 °С).

Самые прочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu В96Ц, В96Ц-3 до последнего времени не находили применения в самолетостроении, поскольку использовать их высокую прочность не представлялось возможным в связи с их недостаточной стойкостью против расслаивающей коррозии и коррозии под напряжением. В последние годы в США и в России разработаны новые режимы термообработки, которые позволяют получить высокие прочностные характеристики при удовлетворительной коррозионной стойкости сплава В96Ц-3.

**Сплавы на основе системы Al-Zn-Mg.** Интерес к тройным сплавам системы Al-Zn-Mg резко возрос во второй половине XX в. в связи с потребностью промышленности в более прочных, чем Al-Mg, свариваемых сплавах. Относительно низколегированные сплавы системы Al-Zn-Mg с 5–7% (Zn + Mg) имеют исключительно хорошую свариваемость.

Свойственная тройным сплавам Al-Zn-Mg значительная склонность к образованию трещин при сварке резко уменьшается при введении в сплавы малых добавок модифицирующих компонентов (Ti, Zr).

Многие из этих сплавов, несмотря на добавки переходных металлов (марганца, хрома, циркония) и специальный подбор режимов термообработки, показали недоста-

точную стойкость (главным образом, сварных соединений) против коррозии под напряжением. Это относится прежде всего к сплавам, содержащим больше 6% (Zn+Mg). В настоящее время широко внедрены лишь сплавы, в которых содержится меньше 6% (Zn+Mg).

Типичный представитель этой группы – сплав 1915, среднее содержание легирующих компонентов в котором следующее: 3,7% Zn; 1,5% Mg; 9,4% Mn; 0,14% Cr; 0,18% Zr.

Изделия из сплава 1915 подвергаются закалке с последующим естественным или искусственным старением. Нагрев под закалку проводят при температуре  $450 \pm 10$  °C. Тонкостенные изделия из сплава 1915 закаляются при охлаждении на воздухе. Естественное старение в закаленных сплавах системы Al-Zn-Mg происходит очень медленно, основной прирост прочности и твердости наблюдается в течение 1 мес.; дальнейшее, очень медленное повышение прочности продолжается десятки лет. Характеристики пластичности при этом изменяются незначительно, например, после десятилетнего естественного старения относительное удлинение сплава типа 1915 остается выше 12–14%.

Оптимальный режим искусственного старения для сплава 1915 – двухступенчатый: 100 °C, 10–24 ч + 175 °C, 3–5 ч. Перерыв между закалкой и искусственным старением положительно влияет на эффект искусственного старения. Если перед искусственным старением происходит естественное, то продолжительность выдержки при температуре первой ступени может быть сокращена, а длительное естественное старение (> 1 мес.) может полностью заменить первую ступень искусственного старения, обеспечивающего более высокий предел текучести и лучшую коррозионную стойкость.

Сочетание указанных механических свойств с хорошей свариваемостью и высокой технологичностью при горячей обработке давлением делает сплав 1915 ценным и перспективным конструкционным материалом.

Сплав 1915 можно отнести к термически упрочняемым алюминиевым сплавам средней прочности.

Из-за присутствия в сплаве 1915 модифицирующей добавки циркония склонность к образованию трещин при

сварке у данного сплава не выше, чем у лучших свариваемых сплавов, не упрочняемых термообработкой, например АМгб. По прочности основного материала и сварных соединений сплав 1915 значительно превосходит АМгб и выгодно отличается от других свариваемых термически упрочняемых сплавов меньшим разупрочнением сварного соединения по сравнению с основным материалом. Прочность сварных соединений из сплава 1915 (после естественного старения) составляет не менее 0,9 прочности основного металла.

В настоящее время сплав 1915 нашел наибольшее применение для изготовления прессованных профилей и труб, при производстве которых максимально используются его высокие технологические свойства, в меньшей мере – для листов и других полуфабрикатов.

Сплав 1925, предназначенный для несварных конструкций, является более дешевой модификацией сплава 1915. В сплаве 1925 допускается высокое содержание примесей (Cu до 0,8%; Fe до 0,7%; Si до 0,7%), что позволяет при изготовлении полуфабрикатов использовать большое количество отходов. Высокое содержание примеси меди резко ухудшает свариваемость и поэтому сплав 1925 не рекомендуют для сварных конструкций. Сплав 1925, так же, как и 1915, применяют для изготовления прессованных труб и профилей. После закалки на прессе (с охлаждением на воздухе) и естественного старения его механические свойства близки к свойствам соответствующих полуфабрикатов из сплава 1915. Профили и трубы из сплава 1925 используют в строительстве, транспортном машиностроении и других гражданских отраслях промышленности.

## **Литейные алюминиевые сплавы**

Возможность применения того или иного сплава в промышленности для массового или крупносерийного производства определяется, во-первых, его *эксплуатационными свойствами* (прочностью, физическими свойствами, коррозионной стойкостью), во-вторых, *технологическими свойствами*, т.е. теми свойствами, которые обу-

словливают поведение сплава в процессе изготовления из него изделий.

К *технологическим свойствам* относятся литейные свойства, способность к обработке давлением, обрабатываемость резанием, свариваемость и др. Нередки случаи, когда сплав с очень хорошими эксплуатационными свойствами не находит применения из-за плохих технологических свойств.

Для литейных сплавов значение технологических свойств особенно велико. Главные технологические свойства для них – литейные:

- жидкотекучесть;
- объемная и линейная усадка;
- склонность к образованию горячих трещин;
- склонность к образованию усадочной и газовой пористости;
- склонность к ликвации.

Литейные свойства сплавов, которые не обрабатывают давлением и используют в конструкции в литом состоянии, определяют не только возможность получения изделия (фасонной отливки), но и качество этого изделия. Все дефекты литой структуры, зависящие от литейных свойств (усадочная и газовая пористость, ликвационная неоднородность состава, микротрещины), сохраняются в изделии.

Большая часть литейных свойств зависит от температурного интервала кристаллизации сплава: чем больше интервал кристаллизации, тем меньше жидкотекучесть сплава и тем больше он склонен к образованию рассеянной усадочной пористости и горячих трещин.

В качестве литейных наиболее широко распространены сплавы на основе систем Al-Si (двойные и более сложные), для которых характерны малые температурные интервалы кристаллизации (ноль для эвтектического состава) и очень хорошие литейные свойства.

Для фасонного литья применяют также сплавы на основе систем Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg-Ni и другие сложные сплавы, не отличающиеся в принципе от деформируемых, но часто с более высоким содержанием ле-

гирующих компонентов (меди и магния), тугоплавких добавок (титана и никеля) и примесей (железа). Однако эти сплавы значительно меньше распространены, чем Al-Si-сплавы (силумины), в связи с их худшими литейными свойствами.

В литейных сплавах допустимое содержание неизбежных примесей, и в частности, железа зависит от способа литья сплава.

Допустимый уровень содержания неизбежных вредных примесей, в частности, примесей железа и кремния, во многих литейных сплавах выше, чем в деформируемых.

Отрицательное влияние примесей выражается прежде всего в снижении пластичности, но поскольку отливки из литейных сплавов не подвергаются пластической деформации, то требования к пластичности для литейных сплавов менее жесткие, чем для деформируемых.

В новых высокопрочных литейных сплавах на основе системы Al-Cu и в сплавах повышенной коррозионной стойкости на основе системы Al-Mg допустимое содержание примесей железа и кремния с целью улучшения комплекса свойств резко снижено, особенно для сплавов чистых (ч) и повышенной чистоты (пч), и в некоторых сплавах до более низкого уровня, чем в деформируемых.

**Сплавы на основе системы Al-Si (силумины).** Сплавы на основе Al-Si, или силумины (см. табл. 1.4), относятся к числу наиболее распространенных литейных алюминиевых сплавов.

Силумины подразделяют на двойные (или простые), легированные только кремнием, и специальные, в которых, помимо кремния, содержатся в небольшом количестве другие легирующие компоненты (Mg, Cu, Mn, Ni). Силумины относятся к числу эвтектических или доэвтектических сплавов.

Двойные (простые) силумины относятся к числу термически неупрочняемых сплавов, обладающих невысокими прочностными характеристиками.

Единственный способ несколько повысить их прочность и пластичность – измельчение эвтектических кри-

сталлов кремния, которое может быть достигнуто двумя путями:

1) увеличением скорости охлаждения при кристаллизации;

2) введением в сплавы малых добавок (сотые доли процента) щелочных металлов (натрия, стронция).

Первый путь дает хорошие результаты, но находит ограниченное применение – для тонкостенных деталей, которые могут быть отлиты в металлический кокиль или методом литья под давлением.

Второй путь – модифицирование структуры силуминов малыми добавками – более универсален.

Средний химический состав простого и некоторых специальных силуминов представлен в табл. 1.14.

Таблица 1.14

**Средний химический состав силуминов**

| Сплав            | Содержание компонентов, % |      |      |      |      |                 | Примеси, % Fe, не более |                     |
|------------------|---------------------------|------|------|------|------|-----------------|-------------------------|---------------------|
|                  | Si                        | Mg   | Cu   | Mn   | Ni   | другие          | литье в землю           | литье под давлением |
|                  |                           |      |      |      |      |                 |                         |                     |
| AK12(АЛ2)        | 11,5                      | –    | –    | –    | –    | –               | 0,7                     | 1,5                 |
| AK9ч (АЛ4)       | 9,25                      | 0,24 | –    | 0,35 | –    | –               | 0,6                     | 1,0                 |
| AK7ч (АЛ9)       | 7,0                       | 0,3  | –    | –    | –    | –               | –"                      | 1,5                 |
| AK5M(АЛ5)        | 5,0                       | 0,47 | 1,25 | –    | –    | –               | –"                      | –"                  |
| AK8л (АЛ34)      | 7,5                       | 0,45 | –    | –    | –    | 0,2Ti<br>0,27Be | –"                      | –"                  |
| AK12M2MgH (АЛ25) | 11,5                      | 1,05 | 2,25 | 0,45 | 1,05 | 0,12Ti          | 1,1                     | –"                  |
| AK21M2,5–H2,5    | 21,0                      | 0,35 | 2,6  | 0,3  | 2,5  | 0,2Ti<br>0,3Cr  | –"                      | –"                  |

Специальные силумины, содержащие магний и медь, подвергают закалке и последующему искусственному старению. Упрочнение специальных силуминов при термической обработке обеспечивает их значительно более высокую прочность, особенно предел текучести, при пониженной пластичности по сравнению с простым силумином.

Для сплава AK9ч применяют следующий режим упрочняющей термообработки: закалка от 535 ± 5 °С, выдержка 2–6 ч, охлаждение в горячей воде (50–100 °С), старение при 175 °С, 15 ч. Этот режим термообработки ха-



рактен для всех специальных силуминов, если требуется получить максимальные прочностные характеристики. В зависимости от требований, которые предъявляют к свойствам готовых изделий, применяют также иные режимы старения.

Типичные механические свойства наиболее широко применяемых силуминов, полученные на отдельно отлитых образцах, после оптимальной термообработки приведены в табл. 1.15. Здесь же приведены свойства образцов, отлитых в земляную форму. При литье таких образцов в металлические формы (кокили) или на специальных машинах под давлением механические свойства улучшаются: значения  $\sigma_0$  и  $\sigma_{0,2}$  увеличиваются на 20–30 МПа, повышается также и относительное удлинение.

Таблица 1.15

**Типичные механические свойства силуминов  
(отдельно отлитые образцы)**

| Сплав            | Способ литья и термообработка                                         | $\sigma_0$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_{-1}$ , МПа |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|---------------------|
| AK12(АЛ2)        | Литье в землю после модифицирования                                   | 180              | 80                   | 7            | 42                  |
| AK9ч (АЛ4)       | Литье в землю после модифицирования, закалка и искусственное старение | 260              | 200                  | 4            | –                   |
| AK7ч (АЛ9)       | Литье в землю, закалка и искусственное старение                       | 200              | 110                  | 6            | 40                  |
| AK5М (АЛ5)       | Литье в землю, закалка и искусственное старение                       | 220              | 180                  | 1            | –                   |
| AK8Л (АЛ34)      |                                                                       | 330              | 280                  | 3            | –                   |
| AK12M2MгH (АЛ25) | Литье в кокиль, старение без закалки                                  | 200              | –                    | –            | –                   |
| AK21–M2,5H2,5    | Литье в кокиль, отжиг                                                 | 170              | –                    | –            | –                   |

Силумины отличаются малой плотностью, так как в их состав входит кремний – более легкий элемент, чем алюминий. Так, плотность эвтектического силумина АК12 составляет 2,66 г/см<sup>3</sup>. Сплавы системы Al–Si характеризуются высокой коррозионной стойкостью, причем добавки марганца и магния дополнительно повышают ее, медь же резко снижает коррозионную стойкость. Так, у сплава АК5М, содержащего 1,0–1,5% Cu, коррозионная стойкость ниже, чем у других силуминов.

Высокие литейные свойства силуминов определяют их хорошую свариваемость плавлением.

Как видно из табл. 1.15, термически не упрочняемый эвтектический силумин АК12 имеет довольно низкие прочностные характеристики, но высокую пластичность. Важное преимущество этого сплава – малый интервал кристаллизации (близкий к нулю), поэтому в отливках не образуется усадочной пористости. Сплав рекомендуется для изготовления герметичных деталей.

Более прочным силумином является сплав АК9ч, упрочняемый термообработкой. При некотором снижении содержания кремния в сплаве АК9ч по сравнению с АК12 достигается благоприятное сочетание литейных свойств: относительно малая усадочная пористость и значительно меньшая (чем у АК12) концентрированная усадочная раковина, что позволяет применить сплав АК9ч для наиболее ответственных крупногабаритных деталей, например, картеров двигателей внутреннего сгорания.

Сплав АК7ч, который не подвергают ни модифицированию перед литьем, ни искусственному старению (отливки только закаливают), довольно широко применяют благодаря сочетанию удовлетворительной прочности, высокой пластичности и хороших литейных свойств.

Высокопрочный сплав АК5М не относится к жаропрочным литейным алюминиевым сплавам, но среди силуминов он наиболее прочный при повышенных температурах.

Сплав АК8А, относящийся к системе Al–Si–Mg, превосходит по прочности сплавы АК9ч и АК7ч, имеет хорошие литейные свойства и отличается высокой герметичностью. Эти свойства обеспечиваются более высоким содержанием магния и дополнительным легированием титаном и бериллием (см. табл. 1.15). Сплав АК8А предназначен для литья сложных по конфигурации корпусных деталей, работающих под большим внутренним давлением.

Высоколегированные заэвтектические силумины АК12М2МгН и АК21–М2,5Н2,5 относятся к группе поршневых сплавов (применяются только для отливки поршней двигателей внутреннего сгорания). Имея невысокую проч-

ность, они предназначены для работы при повышенных температурах (250–270 °С), отличаются высокой жаропрочностью, износостойкостью и низким коэффициентом термического расширения.

**Сплавы на основе системы Al–Cu.** Сплавы АЛ7, АМ5, АМ4, 5Кд, АЛ33, в которых содержится от 4 до 6,2% Cu, относятся к термически упрочняемым. Высокая прочность после термической обработки, а также высокая жаропрочность (это особенно относится к сплавам АМ5, АЛ33) являются главными преимуществами этих сплавов. Но сплавы типа АЛ7 имеют, в отличие от силуминов, довольно широкий температурный интервал кристаллизации (90–100 °С при неравновесных условиях кристаллизации), что обуславливает значительно худшие литейные свойства этих сплавов по сравнению с силуминами: меньшую жидкотекучесть, большую склонность к образованию трещин при литье и к усадочной пористости.

Для получения максимальной прочности отливки из всех сплавов подвергают закалке и последующему искусственному старению.

Сплавы на основе системы Al–Cu закалывают с  $545 \pm 3$  °С (выдержка 5–9 ч) в горячей воде и подвергают старению при  $175 + 5$  °С в течение 3–5 ч. Поскольку температура нагрева под закалку очень высока, а в сплаве могут быть неравновесные эвтектики, плавящиеся при более низкой температуре, то нагрев проводят ступенчато (нагрев до 530 °С, выдержка, дальнейший нагрев).

Химический состав и механические свойства сплавов системы Al–Cu приведены в табл. 1.16 (первые четыре сплава – высокопрочные, два последних – жаропрочные). Высокопрочные сплавы расположены в табл. 1.16 в хронологическом порядке: сплав АЛ7 – самый ранний, АМ5 разработан позднее, сплавы АМ4,5Кд и ВАЛ14 еще позже. Все сплавы содержат практически одинаковое количество меди.

Таблица 1.16

**Состав и механические свойства высокопрочных  
и жаропрочных литейных сплавов на основе системы Al–Cu**

| Сплав   | Компоненты, % |           |           |           |           |                                | Примеси, % |       | Механические свойства отливок в землю при 20 °С* |              |
|---------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|------------|-------|--------------------------------------------------|--------------|
|         | Cu            | Mn        | Ti        | Zr        | Cd        | другие                         | Fe         | Si    | $\sigma_b$ , МПа                                 | $\delta$ , % |
| АЛ7     | 4,0–5,0       | –         | –         | –         | –         | –                              | <1,0       | <1,2  | 240                                              | 4            |
| АМ5     | 4,5–5,3       | 0,6–1,0   | 0,15–0,35 | –         | –         | –                              | <0,2       | <0,3  | 350                                              | 6            |
| АМ4,5Кд | 4,5–5,1       | 0,35–0,8  | 0,15–0,35 | –         | 0,07–0,25 | –                              | <0,15      | <0,20 | 420                                              | 7            |
| ВАЛ14   | 4,5–5,0       | 0,50–0,90 | 0,15–0,35 | 0,05–0,25 | 0,04–0,12 | –                              | <0,15      | <0,20 | 460                                              | 10           |
| АЛ33    | 5,5–6,2       | 0,6–1,0   | –         | 0,05–0,20 | –         | (0,8–1,2) Ni<br>(0,15–0,30) Ce | <0,30      | <0,30 | 280/160**                                        | 2            |
| ВАЛ18   | 4,9           | 0,6–1,0   | 0,20–0,35 | 0,05–0,35 | –         | (0,6–1,0) Ni                   | <0,50      | <0,30 | 300/125**                                        | 2            |

\* После закалки и искусственного старения.

\*\* В числителе – при комнатной температуре; в знаменателе – при 350 °С.

Высокая жаропрочность сплавов АЛ33 и ВАЛ18 достигается в основном за счет дополнительного легирования (например, по сравнению со сплавом АМ5) никелем и церием, что приводит к уменьшению эффекта термической обработки, поэтому сплав АЛ33 менее прочен, но более жаропрочен, чем сплав АМ5.

Сплав АЛ33 относится к числу наиболее жаропрочных алюминиевых сплавов.

Сплавы АМ5, АМ4,5Кд, ВАЛ14 используются для изготовления высоконагруженных деталей, работающих при комнатной и повышенных температурах (250–300 °С).

Сплав АЛ33 предназначен для работы при повышенных температурах.

**Сплавы на основе системы Al–Mg.** Литейные алюминиевые сплавы на основе системы Al–Mg отличаются такими же характерными особенностями, как и деформируемые сплавы, – при высокой прочности ( $\sigma_b$ ) они имеют высокие пластичность и стойкость.

Основной легирующий компонент во всех сплавах этой группы (АМг5К, АМг5Мц, АМг6л, АМг10) – магний

(см. табл. 1.4). Сплавы АМг5К и АМг5Мц обычно применяют в литом состоянии без всякой термообработки.

Кремний введен в состав сплава АМг5К для улучшения литейных свойств.

Сплавы системы Al–Mg характеризуются довольно плохими литейными свойствами. Сплав АМг6л может применяться в литом и закаленном состояниях.

Сплав АМг10 с 9,5–10,5% Mg подвергают только закалке, которую проводят с  $430 + 5$  °С (выдержка 12–20 ч) в масле. Охлаждения в масле вполне достаточно для получения пересыщенного твердого раствора магния в алюминии, вместе с тем оно положительно (по сравнению с охлаждением в воде) влияет на коррозионную стойкость.

После закалки сплавы с высоким содержанием магния типа АМг10 естественно стареют, причем процесс идет длительное время – механические свойства изменяются в течение многих лет. Это явление отрицательное, поскольку относительно небольшой прирост прочностных характеристик сопровождается резким снижением пластичности. Уменьшая допустимое содержание примесей железа и кремния в Al–Mg-сплавах (и особенно в сплаве АМг10ч), а также вводя дополнительные добавки циркония и титана, преследуют цель повысить исходную пластичность сплава и улучшают коррозионную стойкость. Основное назначение бериллия, как и в других алюминиевых сплавах с высоким содержанием магния, – уменьшение окисляемости сплавов, особенно в жидком состоянии.

Никакие другие литейные алюминиевые сплавы не имеют такого сочетания высокой прочности и высокой пластичности, как сплавы системы Al–Mg (табл. 1.17).

Таблица 1.17

**Типичные механические свойства сплавов системы Al–Mg (отдельно отлитые образцы)**

| Сплав  | Способ литья и обработка          | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_1$ , МПа |
|--------|-----------------------------------|------------------|----------------------|--------------|------------------|
| АМг5К  | Литье в землю, без термообработки | 170              | 100                  | 3            | 45               |
| АМг5Мц | То же                             | 210              | 120                  | 4            | –                |
| АМг6л  | –                                 | 200              | 120                  | 4            | –                |
| АМг10  | То же, закалка                    | 375              | 200                  | 22           | 60               |

Характеристики пластичности сплава АМг10 выше, чем у многих деформируемых сплавов, а предел текучести значительно ниже временного сопротивления.

Однако широкое применение этих сплавов в технике затрудняется рядом их существенных недостатков. Широкий интервал кристаллизации (100–120 °С), высокое газосодержание и сильная окисляемость определяют плохие литейные свойства. Алюминиево-магниевые сплавы склонны к образованию горячих трещин при литье, хотя и в меньшей степени, чем сплавы на основе системы Al–Cu. По жидкотекучести алюминиево-магниевые сплавы уступают силуминам, но превосходят алюминиево-медные сплавы. Высокое газосодержание в алюминиево-магниевых сплавах приводит к сильно развитой газовой пористости в отливках. Большая окисляемость сплавов в расплавленном состоянии, а также взаимодействие с азотом воздуха приводят к образованию неметаллических включений, которые замешиваются в расплав и попадают в отливку.

При плавке и литье сплавов системы Al–Mg необходимо защищать расплав от взаимодействия с воздухом специальными флюсами, а также подвергать его тщательной дегазации и рафинированию.

Отличаясь очень высокой общей коррозионной стойкостью, сплавы системы Al–Mg с большим содержанием магния, в частности АМг10, подвержены коррозии под напряжением или коррозионному растрескиванию.

Сплавы АМг5К и АМг5Мц не склонны к коррозии под напряжением. Сплав типа АМг10 сразу после закалки достаточно устойчив. Но уже низкотемпературные нагревы (при 60–80 °С) приводят к коррозии под напряжением.

В настоящее время из сплавов системы Al–Mg лучшее распространение получили сплавы с 4,5–6,0% Mg – АМг5Мц и др., нечувствительные к образованию газовой пористости и окислению. Однако, несмотря на значительные трудности, сплав АМг10 и его модификации благодаря присущим им очень ценным качествам применяют в промышленности.

### **Сплавы на основе систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu.**

В последние годы получили распространение литейные сплавы системы Al-Zn-Mg. Типичный представитель – сплав АЦ4Мг, включенный в ГОСТ на литейные алюминиевые сплавы. Сплав АЦ4Мг по составу очень близок к деформируемому сплаву 1915 – имеет практически одинаковое содержание цинка, магния и марганца и отличается только малыми добавками других компонентов (в сплаве АЦ4Мг 0,1–0,2% Ti, а в сплаве 1915 – 0,15–0,22% Zr и 0,1–0,2% Cr).

Важной особенностью сплава АЦ4Мг по сравнению с другими литейными алюминиевыми сплавами является его самозакаливаемость, что обеспечивает возможность получать отливки из сплава АЦ4Мг с достаточно высокой прочностью без специальной закалки. Скорость охлаждения отливки после ее кристаллизации в форме (особенно при литье в металлический кокиль) достаточна для последующего упрочнения при естественном или искусственном старении.

Для достижения наиболее высоких прочностных характеристик отливки из сплава АЦ4Мг закалывают с температуры 540–560 °С (охлаждение в кипящей воде или на воздухе) и искусственно старят при 160–170 °С (20–24 ч).

Сплав АЦ4Мг сочетает достаточно высокую прочность с удовлетворительными литейными свойствами (лучшими, чем у сплавов Al-Cu и Al-Mg), высокой общей коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью. Он менее чувствителен к толщине отливок, чем другие литейные сплавы.

К числу недостатков сплава АЦ4Мг относится определенная склонность к коррозии под напряжением. Для уменьшения склонности к коррозии под напряжением, а также улучшения литейных свойств рекомендуется вводить в сплав 0,8–1,2% Fe.

### **Специальные алюминиевые сплавы**

К группе специальных алюминиевых сплавов отнесены сплавы, изделия из которых не могут быть получены традиционными технологическими приемами (литьем слитка с последующей его обработкой давлением или фа-

сонным литьем). Для обеспечения необходимого состава, структуры и свойств этих сплавов применяют особые, специальные технологические процессы – порошковую или гранульную металлургию.

Специальные алюминиевые сплавы содержат в качестве легирующих компонентов либо  $Al_2O_3$ , либо в большом количестве очень малорастворимые или практически нерастворимые в твердом алюминии металлы: хром, цирконий, железо, никель и т.д.

**Сплавы на основе системы Al– $Al_2O_3$  и другие алюминиевые сплавы, спеченные из порошков.** Спеченный алюминиевый порошок или спеченная алюминиевая пудра (САП) представляет собой материал, который получают прессованием и последующим спеканием алюминиевого порошка, состоящего из чешуек толщиной 1 мкм. Такой алюминиевый порошок называют *пудрой*.

Механические свойства САП значительно отличаются от механических свойств литого или деформированного технического алюминия. Если механические свойства деформированного технического алюминия имеют следующие значения:  $\sigma_s = 60\text{--}90$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 20\text{--}30$  МПа;  $\delta = 20\text{--}40\%$ , то у САП  $\sigma_s = 250\text{--}400$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 200\text{--}300$  МПа;  $\delta = 5\text{--}8\%$ .

Большое различие в механических свойствах САП и обычного алюминия является результатом того, что в САП содержится значительное количество оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Каждая частичка пудры, из которой получен САП, покрыта тонким слоем оксида алюминия. Чем тоньше пудра, тем больше суммарная поверхность частиц и тем больше в САП оксида алюминия.

Механические свойства САП значительно прочнее деформированного алюминия. Однако многие деформируемые сплавы при нормальной температуре прочнее САП. Таким образом, для применения при нормальной температуре САП не представляет большого интереса. Основное преимущество его перед прочими алюминиевыми сплавами – высокая жаропрочность. САП сохраняет высокую прочность при температурах выше  $350\text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. при таких температурах, при которых теплопрочные алюминиевые сплавы (Д16, Д19, Д20, АК4–1) разупрочняются.



САП отличается относительно высокой прочностью даже при температуре 500 °С, при которой временное сопротивление САП колеблется от 60 до 100 МПа в зависимости от содержания оксида алюминия.

Технология изготовления полуфабрикатов из САП включает следующие операции:

- 1) получение алюминиевой пудры;
- 2) холодное брикетирование пудры;
- 3) вакуумная дегазация брикетов;
- 4) горячая подпрессовка или спекание нагретых брикетов под давлением;
- 5) получение из брикетов полуфабрикатов горячей (и последующей холодной) деформацией.

Получение пудры – самая ответственная операция. От качества пудры (величины и формы частиц) зависят свойства готовых изделий.

Пудру обычно получают пульверизацией (разбрызгиванием) жидкого алюминия с последующим размолом полученного порошка в шаровых мельницах.

При холодном брикетировании пудру засыпают в контейнер вертикального или горизонтального пресса, закрытый глухой матрицей и сжимают под давлением 300–750 МПа. Плотность брикетов достигает 2,1–2,2 г/см<sup>3</sup> (плотность пудры 0,8–1,2 г/см<sup>3</sup>).

Полученные брикеты подвергают вакуумной дегазации – отжигу при температуре 600–650 °С в течение 6–10 ч в вакуумных печах с остаточным давлением 1,33–0,133 Па. Вакуумная дегазация обеспечивает уменьшение содержания водорода до 1–2 см<sup>3</sup>/100 г металла.

Спекание брикетов под давлением или горячую подпрессовку проводят следующим образом: брикеты нагревают в печи до 450–500 °С, загружают в контейнер, нагретый до 400–450 °С, и подпрессовывают под давлением 400–600 МПа, выдержка под давлением 3–5 мин. После вакуумной дегазации плотность спеченного брикета возрастает до 2,6–2,7 г/см<sup>3</sup>, т.е. почти до нормальной плотности литого алюминия.

Из спеченных брикетов можно получить горячим прессованием прутки, профили и другие полуфабрикаты.

САП представляет собой смесь алюминия с мельчайшими чешуйками оксида алюминия. Такая структура обуславливает особые свойства этого материала.

Основной фактор, влияющий на механические свойства САП, – содержание оксида алюминия. Наиболее резкий рост прочностных характеристик (и снижение пластичности) наблюдается при повышении содержания оксида алюминия до 7%. Дальнейшее увеличение содержания оксида алюминия сопровождается менее интенсивным ростом прочности и снижением пластичности (рис. 1.4).

Состав и типичные механические свойства разработанных в СССР сплавов системы Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приведены в табл. 1.18.

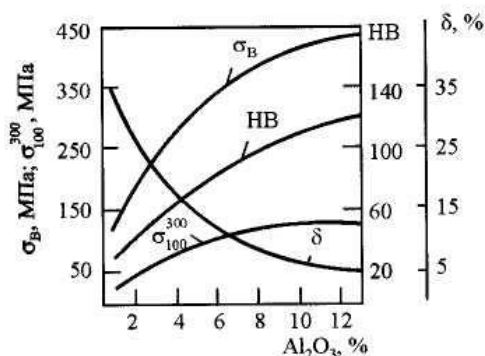


Рис. 1.4. Зависимость механических свойств САП от содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Таблица 1.18

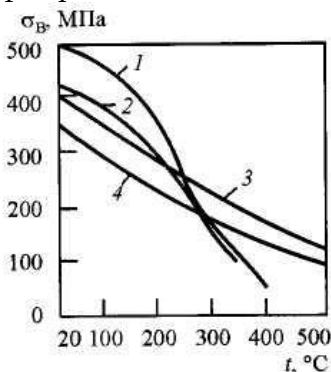
**Состав и типичные механические свойства прессованных прутков из сплава типа САП**

| Сплав | Компоненты (основа – Al, %)    |       |                      | 20 °С                  |      |                      | 500 °С                 |      |                        |
|-------|--------------------------------|-------|----------------------|------------------------|------|----------------------|------------------------|------|------------------------|
|       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe    | σ <sub>B</sub> , МПа | σ <sub>0,2</sub> , МПа | δ, % | σ <sub>B</sub> , МПа | σ <sub>0,2</sub> , МПа | δ, % | σ <sub>100</sub> , МПа |
| САП-1 | 6–9                            | <0,25 | 300                  | 200                    | 8    | 80                   | –                      | 2    | 45                     |
| САП-2 | 9,1–13,0                       | <0,20 | 330                  | 230                    | 4    | 90                   | 80                     | 1    | 50                     |
| САП-3 | 13,1–18,0                      | <0,20 | 400                  | 340                    | 3    | 120                  | –                      | 1    | 55                     |

На рис. 1.5 показана зависимость временного сопротивления прессованных полуфабрикатов из САП-1, САП-2

и сплавов ВД17 и Д20 (для сравнения) от температуры испытания.

Отрицательная особенность САП – снижение пластичности с повышением температуры. Если относительное удлинение обычных деформируемых алюминиевых сплавов с повышением температуры испытания резко растет, то относительное удлинение, например, САП–2, снижается с повышением температуры от 4% при 20 °С до 1% при 500 °С. По характеристикам длительной прочности при повышенных температурах САП значительно превосходит обычные жаропрочные алюминиевые сплавы.



**Рис. 1.5. Зависимость предела прочности ( $\sigma_B$ ) сплавов ВД17 (1), Д20 (2), САП–2 (3) и САП–1 (4) от температуры испытания**

Электропроводность и теплопроводность САП понижаются с ростом содержания оксида алюминия, при 10–13%  $Al_2O_3$  значения этих величин составляют 70–75% от соответствующих значений для мягкого технического алюминия. Коэффициент термического расширения при температурах от 20 до 500 °С несколько ниже, чем у технического алюминия.

По технологическим свойствам САП значительно отличается от большинства деформируемых алюминиевых сплавов. Вследствие низкой пластичности САП холодная деформация его затруднена. Так, все операции штамповки листов из САП (гибка, отбортовка, глубокая вытяжка и т.д.) проводят при 420–470 °С, тогда как для обычных деформируемых алюминиевых сплавов эти операции не требуют нагрева.

Листы из САП можно клепать заклепками, изготовленными также из САП, но с пониженным содержанием оксида алюминия. Можно применять заклепки из САП с таким же содержанием оксида алюминия, как в листах, но тогда клепку следует проводить при повышенных температурах.

Листы САП-1, плакированные другими алюминиевыми сплавами, удовлетворительно свариваются контактной сваркой. Сварка плавлением вызывает значительные трудности. САП рекомендуется для изготовления деталей, работающих при температурах 300–500 °С.

Спеченные алюминиевые сплавы, содержащие другие (помимо  $Al_2O_3$ ) легирующие компоненты, пока не нашли широкого применения, хотя уже получены перспективные сплавы с особыми физическими свойствами (с малым коэффициентом термического расширения): САС-1 (25–30% Si, 5–7% Ni) и САС-2 (25–30% Si, 5–7% Fe), которые отличаются очень низким коэффициентом термического расширения.

**Гранулируемые алюминиевые сплавы с высоким содержанием легирующих компонентов, нерастворимых или малорастворимых в алюминии.** *Гранулами* называют литые частицы, диаметр которых колеблется в пределах от десятых долей до нескольких миллиметров. Из гранул можно изготавливать прессованные полуфабрикаты и листы любых алюминиевых сплавов, по свойствам, не уступающим прокатанным из слитка. При определенных условиях такая технология имеет некоторые преимущества – не требуется сложного литейного оборудования, мощных прокатных станков, металлорежущих станков для обработки слитков.

При литье гранул центробежным методом капли жидкого металла охлаждаются в воде. Высокие скорости охлаждения при литье открывают новые возможности легирования алюминиевых сплавов компонентами нерастворимыми или малорастворимыми в твердом алюминии. Например, предельная равновесная растворимость марганца в алюминии 1,4%, а при охлаждении алюминиево-марганцевых сплавов из жидкого состояния со скоростью 10 °С/с образуются твердые растворы, содержащие до 5% Mn.

Наиболее перспективны для выбора новых композиций гранулируемых сплавов следующие группы:

1. Сплавы алюминия, легированные Mn, Cr, Zr, Ti и некоторыми другими переходными металлами. Такие сплавы подобны термически упрочняемым.

Высокая стабильность структуры сплава при нагревах определяет его повышенную жаропрочность, по длительной прочности при температурах выше 300 °С этот сплав уступает только САП-1.

2. Сплавы, легированные практически нерастворимыми в алюминии тугоплавкими элементами (Fe, Ni, Co). Такие сплавы также отличаются высокой прочностью. В частности, перспективны сплавы Al-Fe с 8–11% Fe.

3. Высоколегированные сплавы алюминия с легкоплавкими, практически не растворимыми в алюминии, резко отличающимися от алюминия по плотности компонентами (Sn, Pb, Cd). Метод гранулирования позволяет получить в этих сплавах структуру с равномерным распределением мелких включений свинца, олова и т.д., что важно, например, для подшипниковых материалов.

4. Термически упрочняемые сплавы на основе систем Al-Zn-Mg-Cu (типа В95, В96Ц), Al-Cu-Mg (типа Д16) с повышенным содержанием переходных металлов (Mn, Cr, Zr, Ni, Co и др.). Как показывают исследования, на сплавах этого типа можно получить наиболее высокие значения прочности ( $\sigma_s$  до 800 МПа) при удовлетворительной коррозионной стойкости.

### **Области применения алюминиевых сплавов**

Высокая электропроводность алюминия обуславливает широкое его применение для массивных проводников электрического тока (линии передач, шины распределительных устройств), т.е. там, где наиболее ощутимы его преимущества по сравнению с другими материалами. Так, алюминиевые оболочки кабелей обладают меньшей плотностью и большей прочностью, чем свинцовые. Для этих целей расходуют большое количество алюминия. В промышленно развитых странах примерно 15% всего произведенного алюминия расходуется на электротехнические нужды.

Алюминиевые сплавы широко используют в строительстве и транспортном машиностроении и являются доминирующим конструкционным материалом в авиации. Их применяют для изготовления силовых элементов самолета: обшивок, шпангоутов, лонжеронов, нервюр, а также топливных и масляных баков.

Алюминиевые сплавы широко используют в конструкциях ракет и искусственных спутников Земли. Такие сплавы служили основным конструкционным материалом корпусов ракет «Восток» и «Восход», на которых советские космонавты открыли эпоху космических полетов.

Алюминиевые сплавы, все более широко применяемые в судостроении, имеют существенное преимущество перед сталями. Алюминиевые корпуса не обрастают ракушками, что резко ухудшает обтекаемость корабля и снижает скорость его движения. На очистку стального корпуса от ракушек тратится очень много времени и средств. Поэтому, хотя первоначальная стоимость алюминиевого корпуса дороже стального, в эксплуатации он дешевле и первоначальные избыточные затраты быстро окупаются.

Алюминий и некоторые его сплавы не теряют пластичность при криогенных температурах, поэтому из них изготавливают резервуары для хранения криогенных жидкостей, например, жидкого метана ( $t = -161\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Из чистого алюминия делают теплообменники для сжижения гелия, который, как известно, переходит в жидкое состояние при 4 К.

Алюминий и его сплавы применяют в промышленных и бытовых холодильниках. Хорошо известно применение алюминия в пищевой промышленности. Тонкую алюминиевую фольгу толщиной 0,009 мм применяют для упаковки различного вида продуктов. Из алюминиевой ленты толщиной 0,2–0,3 мм изготавливают консервные банки.

Большинство атомных реакторов сейчас работает на тепловых нейтронах. Для конструктивных элементов таких реакторов нужны металлы, слабо поглощающие нейтроны. Алюминий, относящийся к их числу, обладает хорошей коррозионной стойкостью в горячей воде и перегретом паре, т.е. в тех средах, которые часто применяют в качестве теплоносителя в реакторах.

## *Практическая работа №2.*

# **КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

**Медь** – один из первых элементов, с которыми впервые познакомился человек. Это обусловлено тем, что медь чаще, чем другие металлы, встречается в природе в виде самородков, иногда весьма больших размеров.

Значение меди и ее сплавов в деятельности человека было столь велико, что это нашло отражение в названии целых эпох развития человечества (медный век, бронзовый век).

По электропроводности медь занимает второе место после серебра и поэтому является одним из важнейших материалов для проводников. По теплопроводности медь уступает только серебру и ее широко используют в различного рода теплообменниках. Сплавы меди отличаются достаточной коррозионной стойкостью, высокими технологическими свойствами, они имеют приятный цвет, хорошо полируются до сильного блеска.

Меди в земной коре сравнительно немного (0,01%). Мировое производство меди в 1953 г. составляло 2,7 млн. т., в 1960 г. – 3,8 млн. т., в 1979 г. – около 7 млн. т., в 1988 г. – 7 млн. т., в 1995 г. – 9,3 млн. т.

Медь и ее сплавы хорошо обрабатываются давлением в холодном и горячем состояниях. При обработке давлением суммарные обжатия могут достигать 90% и выше.

Из меди и ее сплавов производят все виды полуфабрикатов, получаемых обработкой давлением: плиты, листы, ленты, поковки, штамповки, трубы, профили, проволоку. Медь и ее сплавы хорошо свариваются всеми видами сварки и легко поддаются пайке. При обработке меди и ее сплавов резанием особых затруднений не возникает.

К недостаткам меди следует отнести ее сравнительно высокую плотность, а также склонность к окислению при повышенных температурах, коррозионному растрескиванию и водородной болезни.

## Свойства меди

Медь относится к подгруппе IV периодической системы Д.И. Менделеева. Ее порядковый номер 29, атомная масса – 63,546, плавится при температуре 1083 °С и кипит при 2560 °С. В меди не обнаружено полиморфных превращений, во всем интервале температур ниже точки плавления она имеет гранцентрированную кубическую (ГЦК) решетку, период которой при 20 °С равен 0,36148 нм. Медь относится к тяжелым металлам, ее плотность при 20 °С – 8,89 г/см<sup>3</sup>.

Физические свойства меди приведены в табл. 1.1. Удельная теплоемкость меди примерно такая же, как у железа. Модули упругости меди больше, чем у алюминия и магния.

Медь – диамагнитный металл с очень небольшой удельной магнитной восприимчивостью. Электропроводность меди почти такая же, как и самого электропроводного металла – серебра. Примеси, содержащиеся в меди, снижают ее электропроводность (рис. 2.1). Наиболее сильно повышают электрическое сопротивление меди P, As, Al, Fe, Sb, Si. Кислород в небольших количествах повышает электропроводность меди, поскольку он способствует удалению при плавке окисляющихся примесей из расплава.

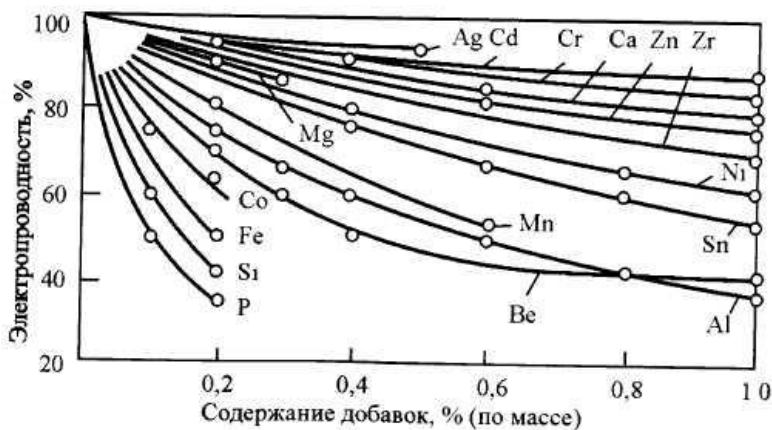


Рис. 2.1. Влияние примесей и легирующих элементов на электропроводность меди



Чистейшая медь обладает небольшой прочностью и высокой пластичностью. Временное сопротивление разрыву чистой меди составляет примерно 200 МПа, предел текучести 40–80 МПа; поперечное сужение 80–95%, относительное удлинение 35%.

Химическая активность меди сравнительно невелика. Она растворяется в минеральных кислотах, в частности, в азотной и горячей концентрированной серной. В отсутствие кислорода и других окислителей разбавленные соляная и серная кислота на медь не действуют.

При обычной температуре сухой воздух и вода по-прежнему не действуют на медь, и она сохраняет свой розовато-красный цвет. Во влажном воздухе медь тускнеет из-за образования на ее поверхности темно-красного оксида  $\text{Cu}_2\text{O}$ . В присутствии во влажной атмосфере  $\text{CO}_2$  образуется зеленый налет основного карбоната  $\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ .

При температурах 800–900 °С при 10 мин. нагреве кислород проникает в медь на глубину до 1,6 мм.

### Техническая медь

Основные примеси в меди – висмут, сурьма, свинец, сера и кислород. В зависимости от чистоты медь подразделяют на несколько сортов: М00к, М0к, М1к, М00б, М00, М0, М0б, М1р, М1, М1р, М2, М2р, М3, М3р (к – катодная медь, б – бескислородная медь, р – раскисленная медь). Наименьшее содержание примесей в меди марки М00б (99,99% Cu) и наибольшее – в М3 (99,50% Cu).

В меди марок М1, М2, М3 содержание кислорода составляет 0,05–0,08%. Раскисленная медь отличается от обычных марок пониженным содержанием кислорода (не более 0,01%), хотя его и больше, чем в бескислородной меди (менее 0,001% O).

Временное сопротивление разрыву меди разных марок составляет 200–250 МПа, предел текучести 40–65 МПа, относительное удлинение 40–60%. Предел выносливости при базе  $3 \cdot 10^8$  циклов составляет 70–100 МПа, т.е. 30–40% от временного сопротивления разрыву.

С повышением температуры прочностные свойства меди уменьшаются (рис. 2.2). Относительное удлинение и

поперечное сужение остаются неизменными до 200 °С, при более высоких температурах резко уменьшаются и лишь при нагреве выше 600 °С вновь начинают увеличиваться. Этот провал пластичности обусловлен примесями.

В результате пластической деформации медь нагартовывается, и при достаточно высокой степени деформации ее временное сопротивление разрыву достигает 400–450 МПа при одновременном падении относительного удлинения до 2–4% (рис. 2.2).

Рекристаллизация сильно деформированной технической меди начинается при 200–230 °С, что соответствует 0,35–0,37 от ее температуры плавления по абсолютной шкале.

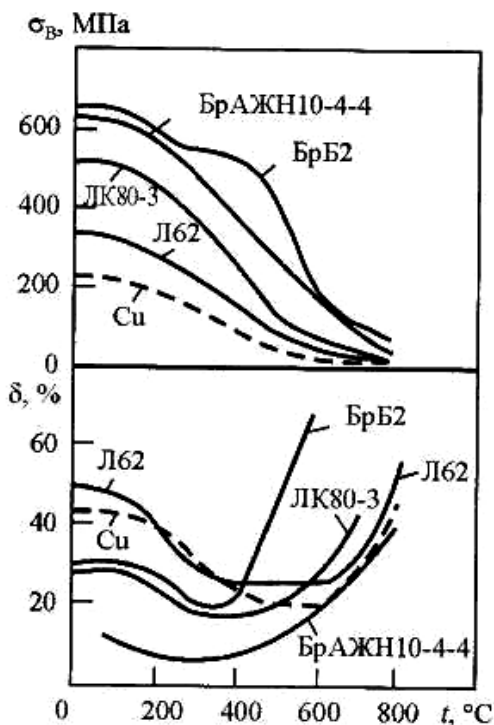


Рис. 2.2. Влияние температуры испытаний на механические свойства меди и ее сплавов

## Классификация сплавов на основе меди

Наиболее распространенные легирующие элементы в меди – цинк, алюминий, олово, железо, кремний, марганец, бериллий, никель. Они повышают прочностные свойства меди (рис. 2.3); наиболее сильное упрочняющее действие оказывают кремний и алюминий (при содержаниях более 3% (по массе)). Пластичность меди повышается при легировании алюминием, кремнием, железом до определенных их концентраций, а затем резко снижается. Цинк и марганец мало влияют на пластичность меди, а олово занимает промежуточное положение между этими двумя группами легирующих элементов.

Медные сплавы подразделяются на деформируемые и литейные, а также термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Однако более широко известно исторически сложившееся деление медных сплавов на латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы.

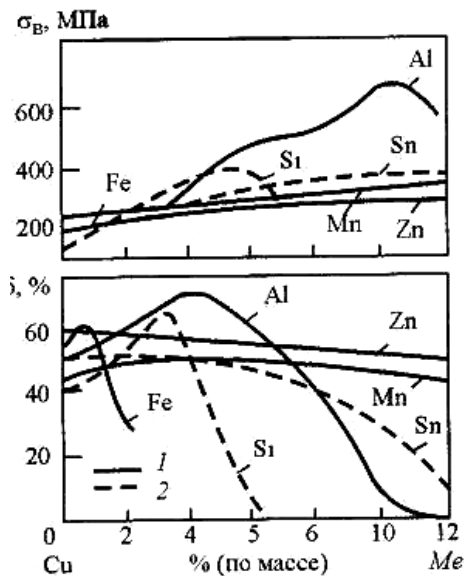


Рис. 2.3. Влияние легирующих элементов на механические свойства меди в деформированном, отожженном (1) и литом (2) состояниях

**Латунями** называют сплавы меди, в которых главным легирующим элементом является цинк. Их маркируют буквой «Л» и числами, характеризующими среднее содержание легирующих элементов. Так, латунь Л80 содержит 80% Cu и 20% Zn. Если латунь легирована, кроме цинка, другими элементами, то после буквы «Л» ставят условное обозначение этих элементов: С – свинец, О – олово, Ж – железо, А – алюминий, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель. Цифры после букв указывают среднее содержание каждого легирующего элемента в латуни, кроме цинка. Содержание цинка определяется по разности до 100%. Так, в латуни ЛАН-59-3-2 содержится 59% Cu, 3% Al, 2% Ni и 36% Zn. В марке литейной латуни указывают не содержание меди, а содержание цинка, причем содержание легирующих элементов указывают не в конце марки, а после буквы, обозначающей элемент.

**Бронзами** ранее называли сплавы меди с оловом. Позднее появились сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами, которые тоже называли бронзами. В настоящее время бронзами называют все сплавы меди, кроме латуней и медно-никелевых сплавов. По основным легирующим элементам их подразделяют на оловянные, алюминиевые, бериллиевые, свинцовые, кремнистые и т.д.

Бронзы маркируют буквами «Бр», а затем указывают основные легирующие элементы и их содержание в сплаве, так же как для латуней. Цинк в бронзах маркируют буквой «Ц», фосфор – «Ф», бериллий – «Б», хром – «Х». Так, деформируемая бронза БрАЖМц-10-3-1,5 легирована 10% Al, 3% Fe и 1,5% Mn; остальное – медь. Если составы литейной и деформируемой бронз перекрываются, то в конце марки литейной латуни стоит буква «Л», например БрА9ЖЗЛ.

## **Латуни**

Из медных сплавов латуни получили наиболее широкое распространение благодаря сочетанию высоких механических и технологических свойств.

С увеличением содержания цинка прочность латуни возрастает (рис. 2.4). Поперечное сужение снижается, от-

носительное удлинение достигает максимального значения при 30–32% Zn, а затем резко уменьшается. Временное сопротивление разрыву возрастает до 47–50% Zn, но затем резко снижается.

По структуре сплавы системы Cu–Zn разделяют на  $\alpha$ -, ( $\alpha+\beta$ )- и  $\beta$ -латуни.

Латуни со структурой  $\alpha$ -фазы пластичны, имеют высокую технологичность и легко поддаются горячей и холодной обработке давлением. В температурном интервале 300–700 °С  $\alpha$ -латуни, как и медь, обнаруживают провал пластичности, и этого интервала температур при обработке давлением следует избегать (см. рис. 2.2). Пластичность  $\beta$ -латуней при комнатной температуре очень мала, при содержании около 50% Zn и более они не поддаются холодной обработке давлением. Поэтому в промышленном масштабе применяют лишь  $\alpha$ - и ( $\alpha+\beta$ )-латуни. Однако  $\beta$ -латуни представляют интерес как основа сплавов с памятью формы и материалов с высоким пределом упругости («сверхупругостью»).

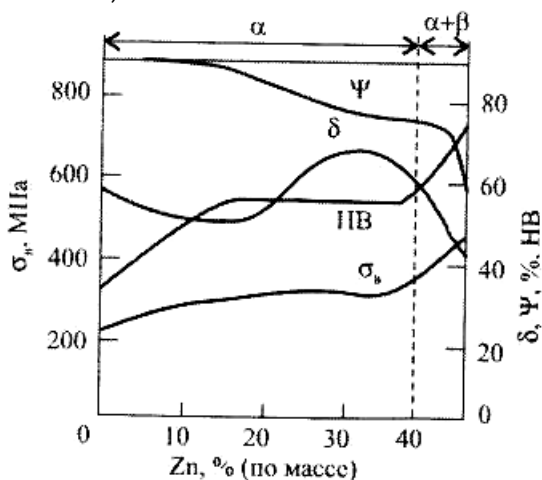


Рис. 2.4. Влияние цинка на механические свойства меди

Наиболее широко применяют двойные латуни марок Л90, Л68, Л63 (табл. 2.1). Латунь Л90 называют *томпаком*; она обладает высокой стойкостью против коррозии и имеет красивый золотистый цвет, в связи с чем ее применяют

для изготовления знаков отличия и фурнитуры. Латунь Л68 называют *патронной*, из нее изготавливают изделия холодной штамповкой и глубокой вытяжкой, в частности, гильзы патронов. Латунь Л63 называют *торговой*, так как она среди всех латуней занимает первое место по объему производства.

Холодная деформация приводит к существенному повышению прочности латуней при одновременном очень резком снижении пластичности (см. рис. 2.2). Отжиг нагартованной латуни при температурах выше 400 °С снимает наклеп.

Таблица 2.1

**Механические свойства отожженных деформируемых латуней**

| Марка латуни           | Структура        | Механические свойства |              |
|------------------------|------------------|-----------------------|--------------|
|                        |                  | $\sigma_s$ , МПа      | $\delta$ , % |
| Л96                    | $\alpha$         | 216–255               | 45–55        |
| Л90                    | $\alpha$         | 230–340               | > 36         |
| Л80                    | $\alpha$         | 260–370               | > 40         |
| Л68                    | $\alpha$         | 290–390               | > 42         |
| Л63                    | $\alpha$         | 290–400               | > 38         |
| Л60                    | $\alpha + \beta$ | 360–410               | 40–50        |
| ЛА77–2                 | $\alpha$         | 340–440               | 42–52        |
| ЛАН59–3–2              | $\alpha + \beta$ | 440–540               | 40–50        |
| ЛАНКМц75–2–2,5–0,5–0,5 | $\alpha$         | 530                   | 48           |
| ЛК80–3                 | $\alpha + \beta$ | 275–335               | 53–60        |
| ЛН65–5                 | $\alpha$         | 370–440               | 45–65        |
| ЛМц58–2                | $\alpha + p$     | 380–490               | > 30         |
| ЛЖМц59–1–1             | $\alpha + \beta$ | 450                   | 50           |
| ЛМцА57–3–1             | $\alpha + \beta$ | 550                   | 35           |
| ЛО90–1                 | $\alpha$         | 245–304               | 42–50        |
| ЛО70–1                 | $\alpha$         | 314–370               | 55–65        |
| ЛО62–1                 | $\alpha$         | 400                   | 40           |
| ЛС74–3                 | $\alpha$         | 295–390               | 40–55        |
| ЛС64–2                 | $\alpha$         | 310–375               | 55–65        |
| ЛС63–3                 | $\alpha$         | 350                   | 42           |
| ЛС60–1                 | $\alpha + \beta$ | 340–390               | 45–55        |
| ЛС59–1                 | $\alpha + \beta$ | 340–490               | 45           |

Отрицательное свойство латуней заключается в их склонности к самопроизвольному коррозионному растрескиванию, которое происходит во влажной атмосфере при сохранении в сплаве после деформации остаточных напряжений. Развитию растрескивания способствует присутствие в атмосфере следов аммиака, аммонийных солей, сернистых газов. Это явление называют еще сезонной болезнью, так как оно чаще всего происходит весной и осенью, когда влажность воздуха повышена.

Растрескивание происходит из-за предпочтительной коррозии латуней по границам зерен в зоне неравномерного распределения напряжений. Это явление усиливается с увеличением содержания цинка и развивается особенно интенсивно при содержаниях его более 30%. Для устранения склонности к растрескиванию достаточно отжечь деформированные полуфабрикаты при температурах ниже температуры рекристаллизации. При таком отжиге эффективно снимаются остаточные напряжения и сохраняется высокая прочность, обусловленная нагартовкой.

Для улучшения свойств латуни дополнительно легируют алюминием, марганцем, железом, никелем, оловом, свинцом, кремнием, которые вводят в небольших количествах (1–2%, в редких случаях до 4%).

Комплексное легирование специальных латуней позволяет получить более высокие, по сравнению с двойными сплавами системы Cu–Zn, механические свойства и лучшую коррозионную и кавитационную стойкость. Вместе с тем удается сохранить достаточно хорошую обрабатываемость давлением при высоких температурах и несколько меньшую при низких.

Временное сопротивление разрыву латуней наиболее эффективно повышают алюминий и олово и в меньшей степени марганец. Введение свинца приводит к снижению прочности латуней. Относительное удлинение латуней увеличивается при введении железа и небольших количеств марганца (до 2–3%), остальные элементы уменьшают относительное удлинение латуней.

Железо практически нерастворимо в латунях и присутствует в них в свободном виде.

Алюминий, марганец, олово и никель повышают коррозионную стойкость латуней; вместе с тем никель уменьшает склонность латуней к коррозионному растрескиванию. Благоприятное действие этих элементов на коррозионную стойкость связано с образованием на поверхности латуней плотной оксидной защитной пленки.

В промышленном масштабе применяют *деформируемые* и *литейные латуни*. Латуни разделяют на *простые*, *легированные только цинком*, и *специальные*, которые помимо цинка содержат один или несколько элементов, отличных от цинка. Специальные латуни называют по основному дополнительному элементу: *алюминиевые*, *кремниевые*, *марганцевые*, *никелевые*, *оловянные*, *свинцовые*. Механические свойства некоторых деформируемых латуней приведены в табл. 2.1.

Все простые латуни, кроме Л59, имеют структуру, представленную  $\alpha$ -фазой, и обладают высокими технологическими свойствами, что позволяет изготавливать из них разнообразные изделия, требующие больших степеней деформации при их изготовлении: гильзы, патроны, радиаторные трубы, проволока, ленты. Латунь Л59 с  $(\alpha+\beta)$ -структурой менее технологична.

Специальные латуни отличаются от простых одним или несколькими специфическими свойствами.

Алюминиевые латуни характеризуются высокими прочностными свойствами, что обусловлено сильным упрочняющим действием алюминия (см. рис. 2.3). В эти латуни помимо цинка и алюминия вводят также никель, марганец, железо, кремний, что обеспечивает дополнительное их упрочнение. Наибольшее распространение получили богатые медью  $\alpha$ -латуни, содержащие до 4% Al (ЛА85-0,5, ЛА77-2), которые вследствие однофазной структуры хорошо обрабатываются давлением.

Для никелевой латуни ЛН65-5 характерны высокие технологические свойства, она отлично обрабатывается в горячем и холодном состоянии. Марганцевая латунь ЛЖМц59-1-1 обладает высокой прочностью и повышенной вязкостью вследствие мелкозернистой структуры, обусловленной легированием сплава железом. Оловянные ла-



туни отличаются высокой коррозионной стойкостью в морской воде, поэтому их называют морскими латунями. Алюминиевая  $\alpha$ -латунь ЛАМц77-2-0,05 благодаря микролегированию мышьяком хорошо сопротивляется обесцинкованию в морской воде.

Свинцовые латуни хорошо обрабатываются резанием. Эти латуни – наилучший материал для деталей, вытачиваемых на станках-автоматах. В отличие от  $\alpha$ -латуней свинец в  $(\alpha+\beta)$ -латунях не является вредной примесью. Он делает стружку ломкой, что облегчает обрабатываемость резанием. В то же время свинец повышает антифрикционные свойства.

Латунь ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 – это единственный дисперсионно-твердеющий сплав на основе системы Cu-Zn. Дисперсионное упрочнение обеспечивают соединения на основе кремния, никеля и марганца, обладающие в меди переменной растворимостью. В закаленном состоянии эта латунь отличается высокой пластичностью, а после старения приобретает высокую прочность. Еще более высокие прочностные и упругие свойства достигаются при старении этой латуни после деформации в закаленном состоянии.

Основной вид термической обработки латуней – отжиг, который проводят для смягчения материала перед дальнейшей обработкой давлением, получения в готовых полуфабрикатах нужных свойств, а также для устранения склонности к сезонному растрескиванию. Однофазные  $\alpha$ -латуни подвергают отжигу первого рода, основанному на рекристаллизационных процессах. Температура рекристаллизации  $\alpha$ -латуней выше, чем у меди, поскольку все легирующие элементы ее повышают. В промышленных условиях отжиг латуней проводят при 600–700 °С.

Литейные латуни широко применяют в современной технике, что объясняется следующими характеристиками:

1) латуни обладают небольшой склонностью к газонасыщению благодаря самозащитному действию паров цинка с достаточно высокой упругостью; это обеспечивает получение плотного литья;

2) латуни не склонны к ликвационным явлениям, так как линии ликвидус и солидус очень близки;

3) благодаря малому интервалу кристаллизации латуни обладают хорошей жидкотекучестью и небольшой усадочной рассеянной пористостью;

4) специальные литейные латуни отличаются высокими механическими свойствами;

5) поверхность специальных латуней после обработки резанием, шлифовки и полировки приобретает красивый цвет и блеск;

6) многие литейные латуни обладают высокими антифрикционными свойствами.

Литейные латуни имеют следующие недостатки:

- при плавке теряются большие количества цинка из-за большой его летучести, для устранения этого недостатка приходится применять защитные покрытия;

- при кристаллизации в отливках образуются крупные усадочные раковины, для выведения которых приходится применять большие прибыли и переводить довольно много металла в отходы;

- литейные латуни с большим количеством  $\alpha$ -фазы склонны к сезонному саморастрескиванию при наличии остаточных напряжений; для устранения этого недостатка отливки нужно отжигать при низких температурах.

Литейные латуни (табл. 2.2) маркируют так же, как деформируемые. Если их составы одинаковы, то при применении латуни для фасонного литья к марке добавляют букву «Л».

Таблица 2.2

**Механические и литейные свойства специальных литейных латуней**

| Марка латуни | Механические свойства при литье в кокиль |              |                         | Литейные свойства  |                    |
|--------------|------------------------------------------|--------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
|              | $\sigma_s$ , МПа                         | $\delta$ , % | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> | жидкотекучесть, см | линейная усадка, % |
| ЛЦ30А3       | 390                                      | 15           | –                       | –                  | –                  |
| ЛЦ23А6Ж3Мц2  | 705                                      | 7            | –                       | –                  | –                  |
| ЛЦ16К4       | 340                                      | 15           | 1,2                     | 80                 | 1,7                |
| ЛЦ38Мц2С2    | 340                                      | 10           | 0,7                     | –                  | 1,8                |
| ЛЦ40Мц3Ж     | 490                                      | 10           | –                       | 60                 | 1,6                |
| ЛЦ40С        | 215                                      | 20           | 0,26                    | 51                 | 2,2                |
| Л40Мц1,5     | 390                                      | 20           | –                       | –                  | –                  |
| ЛЦ40Мц3А     | 440                                      | 15           | –                       | –                  | –                  |

В литейных латунях допускается больше примесей, чем в деформируемых.

Наиболее прочной литейной латунью является ЛЦ23А6ЖЗМц2 с кажущимся содержанием цинка 46,5% (табл. 2.3).

Таблица 2.3

**Химический состав и механические свойства некоторых марок латуней**

| Марка латуни                               | Содержание, % |                                                      | Назначение                                                               |
|--------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
|                                            | Cu            | легирующие элементы                                  |                                                                          |
| <i>Деформируемые латуни (ГОСТ15527–70)</i> |               |                                                      |                                                                          |
| Л90 (томпак)                               | 88–91         | –                                                    | Ленты, листы, трубы, художественные изделия, мембраны, змеевики          |
| Л80                                        | 79–81         | –                                                    | Ленты, проволока, трубы конденсаторов, теплообменников                   |
| Л63                                        | 62–65         | –                                                    | Ленты, проволока, прутки, трубы деталей радиаторов, патрубков, прокладки |
| ЛС59–1                                     | 57–60         | 0,8–1,9 Pb                                           | Полосы, прутки, втулки, краны, тройники, прокладки                       |
| ЛЖМц59–1–1                                 | 57–60         | 0,6–1,2 Fe<br>0,1–0,4 Al<br>0,3–0,7 Sn<br>0,5–0,8 Mn | Проволока, трубы                                                         |
| ЛАЖ60–1–1                                  | 58–61         | 0,75–1,5 Al<br>0,75–1,5 Fe<br>0,1–0,6 Mn             | Трубы, прутки, свариваемые элементы аппаратуры                           |
| <i>Литейные латуни (ГОСТ 17711–93)</i>     |               |                                                      |                                                                          |
| ЛЦ16К4                                     | 78–81         | 3,0–4,5 Si                                           | Арматура, детали приборов                                                |
| ЛЦ40МцЗЖ                                   | 53–58         | 3,0–4,0 Mn<br>0,5–1,5 Fe                             | Детали ответственного назначения, гребные винты и их лопасти             |
| ЛЦ23А6ЖЗМц2                                | 64–68         | 4,0–7,0 Al<br>2,0–4,0 Fe<br>1,5–3,0 Mn               | Гайки нажимных винтов, червячные винты                                   |

## Бронзы

**Оловянные бронзы.** Применяют с древнейших времен, и они хорошо освоены промышленностью. Предельная растворимость олова в меди соответствует 15,8% Sn.

В сплавах Cu–Sn развивается значительная внутридендритная ликвация. Бронзы отличаются невысокой жидкотекучестью из-за большого интервала кристаллизации. По этой же причине в бронзе не образуется концен-

трированная усадочная раковина, а возникает рассеянная мелкая пористость. Линейная усадка у оловянных бронз очень невелика и составляет 0,8% при литье в песчаную форму и 1,4% при литье в кокиль. Указанные свойства бронз облегчают получение отливок, от которых не требуется высокой герметичности.

Бронзы с литой структурой обладают невысокой пластичностью, высокой стойкостью против истирания, поэтому оловянные бронзы являются отличным антифрикционным материалом.

Пластичность бронз начинает резко снижаться при содержании более 8% олова (рис. 2.5). Временное сопротивление разрыву бронз повышается с увеличением содержания олова до 24%, но при больших концентрациях резко снижается, сплавы становятся хрупкими.

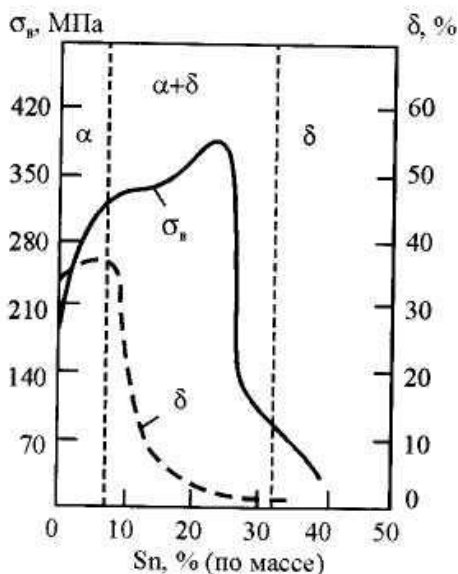
Оловянные бронзы по коррозионной стойкости в морской воде превосходят медь и медноцинковые сплавы.

В оловянные бронзы часто вводят фосфор, который раскисляет медь и уменьшает содержание водорода в расплаве, повышает прочностные свойства, улучшает жидкотекучесть бронз и позволяет получать отливки сложной формы с тонкими стенками, в частности, качественное художественное литье.

Фосфор в бронзах с небольшим количеством олова повышает сопротивление износу, однако ухудшает технологическую пластичность бронз, поэтому в деформируемые сплавы вводят не более 0,5% P.

Оловянные бронзы легируют цинком в больших количествах, но в пределах растворимости. При таких содержаниях цинк благоприятно влияет на свойства оловянных бронз:

- снижает склонность бронз к ликвации и повышает жидкотекучесть, поскольку он уменьшает температурный интервал кристаллизации сплавов;
- способствует получению более плотного литья;
- раскисляет расплав и уменьшает содержание в нем водорода;
- улучшает прочностные свойства бронз.



**Рис. 2.5. Влияние олова на механические свойства литейных сплавов системы Cu–Sn**

Никель повышает прочностные свойства и улучшает пластичность и деформируемость бронз, повышает их коррозионную стойкость, плотность, уменьшает ликвацию. Бронзы с никелем термически упрочняются закалкой и старением. Свинец повышает жидкотекучесть и плотность бронз, их антифрикционные свойства.

По назначению оловянные бронзы можно разделить на несколько групп (табл. 2.4).

*Первая группа* – литейные стандартные бронзы, предназначенные для получения разных деталей машин методами фасонного литья. К этим бронзам, помимо высоких литейных свойств, предъявляются следующие требования:

- хорошая обрабатываемость резанием;
- высокая плотность отливок;
- достаточная коррозионная стойкость;
- высокие механические свойства.

Таблица 2.4

**Механические свойства оловянных бронз**

| Группа                                           | Бронза       | Механические свойства |              |
|--------------------------------------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|                                                  |              | $\sigma_b$ , МПа      | $\delta$ , % |
| Литейные стандартные                             | БрО3Ц12С5    | 210                   | 5            |
|                                                  | БрО5Ц5С5     | 170                   | 4            |
|                                                  | БрО4Ц4С17    | 150                   | 12           |
|                                                  | БрО4Ц7С5     | 180                   | 4            |
|                                                  | БрО3Ц7С5Н1   | 210                   | 5            |
| Литейные нестандартные ответственного назначения | БрО10Ф1      | 250                   | 3            |
|                                                  | БрО10Ц2      | 230                   | 10           |
|                                                  | БрО8Ц4       | 200                   | 10           |
|                                                  | БрО6Ц6С3     | 180                   | 4            |
|                                                  | БрО10С10     | 200                   | 6            |
|                                                  | БрО5С25      | 140                   | 6            |
| Деформируемые                                    | БрОФ8–0,3    | 400                   | 55           |
|                                                  | БрОФ6,5–0,4  | 300                   | 60           |
|                                                  | БрОФ6,5–0,15 | 300                   | 38           |
|                                                  | БрОФ4–0,25   | 300                   | 40           |
|                                                  | БрОЦ4–3      | 300                   | 38           |
|                                                  | БрОЦС4–4–2,5 | 320                   | 35           |

*Вторая группа* – литейные нестандартные бронзы ответственного назначения, обладающие высокими антифрикционными свойствами и хорошим сопротивлением истиранию. Эти сплавы применяют для изготовления подшипников скольжения и других деталей, работающих в условиях трения. Наибольшей прочностью в сочетании с высокими антифрикционными свойствами обладает бронза БрО10Ф1, что обусловлено высоким содержанием олова и легированием фосфором.

*Третья группа* – деформируемые бронзы, они отличаются от литейных более высокой прочностью, вязкостью, пластичностью, сопротивлением усталости. Основные легирующие элементы в деформируемых бронзах – олово, фосфор, цинк и свинец, причем олова в них меньше, чем в литейных бронзах. Деформируемые бронзы можно разделить на сплавы, легированные оловом и фосфором (БрОФ6,5–0,4; БрОФ6,5–0,15; БрОФ4–0,25), и сплавы, не содержащие фосфора (БрОЦ4–3 и БрОЦС4–4–2,5). Из этих бронз наилучшая обрабатываемость давлением у бронзы БрОЦ4–3. Бронза БрОЦС4–4–2,5, содержащая сви-

нец, совсем не обрабатывается давлением в горячем состоянии из-за присутствия в ней легкоплавкой эвтектики. Эта бронза предназначена для изготовления деталей, работающих в условиях трения, и поэтому легирована свинцом.

БХ1, БХ2, БХ3 – сплавы художественного литья. Для изготовления художественных изделий бронза – наиболее подходящий материал. Она достаточно жидкотекуча, хорошо заполняет самые сложные формы, обладает очень небольшой усадкой при затвердевании и поэтому хорошо передает форму изделия. Эти бронзы отличаются красивым цветом, сохраняющимся благодаря их высокой коррозионной стойкости достаточно долгое время. На поверхности бронз под воздействием естественной среды образуется патина – тончайшая оксидная пленка различных цветовых оттенков, от зеленого до темно-коричневого. Патина придает бронзовым скульптурам и декоративным изделиям красивую ровную окраску.

Основные виды термической обработки бронз – гомогенизация и промежуточный отжиг. Основная цель этих операций – облегчение обработки давлением. Гомогенизацию проводят при 700–750 °С с последующим быстрым охлаждением. Для снятия остаточных напряжений в отливках достаточно 1 ч отжига при 250 °С. Промежуточный отжиг при холодной обработке давлением проводят при температурах 550–700 °С.

**Алюминиевые бронзы.** По распространенности в промышленности занимают одно из первых мест среди медных сплавов. В меди растворяется довольно большое количество алюминия, с увеличением содержания алюминия прочностные свойства сплавов повышаются (см. рис. 2.3).

Оптимальными механическими свойствами обладают сплавы, содержащие 5–8% Al. Наряду с повышенной прочностью они сохраняют высокую пластичность.

Алюминиевые бронзы по сравнению с оловянными имеют следующие преимущества:

- меньшую склонность к дендритной ликвации;
- большую плотность отливок;
- лучшую жидкотекучесть;

- более высокую прочность и жаропрочность;
- более высокую коррозионную и противокавитационную стойкость;

- меньшую склонность к хладноломкости.

Алюминиевые бронзы не дают искр при ударе.

Недостатки алюминиевых бронз:

- значительная усадка при кристаллизации;
- склонность к образованию крупных столбчатых кристаллов;

- сильное окисление в расплавленном состоянии, при котором образуются оксиды алюминия, приводящие к шиферному излому в деформированных полуфабрикатах;

- вспенивание расплава при заливке в форму;

- трудность пайки твердыми и мягкими припоями;

- недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

Для устранения этих недостатков алюминиевые бронзы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом.

*Железо* повышает прочностные свойства алюминиевых бронз при некотором снижении их пластичности, препятствует развитию хрупкости.

*Марганец* растворяется в алюминиевых бронзах в больших количествах (до 10%). Повышает прочность бронз, их пластичность, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства, способность к холодной обработке давлением. Двойные сплавы меди с алюминием не обрабатываются давлением в холодном состоянии, если содержание алюминия превышает 7%.

*Никель* сильно уменьшает растворимость алюминия в меди при понижении температуры. Поэтому медные сплавы, одновременно легированные алюминием и никелем, существенно упрочняются при термической обработке, состоящей из закалки и старения. Никель улучшает механические свойства и коррозионную стойкость алюминиевых бронз, повышает температуру их рекристаллизации и жаропрочные свойства. Сплавы меди, легированные алюминием и никелем, хорошо обрабатываются давлением, имеют высо-



кие антифрикционные свойства и не склонны к хладноломкости.

Небольшие содержания титана увеличивают плотность отливок и их прочность. Благоприятное влияние титана на свойства бронз обусловлено его действием как дегазатора, уменьшающего газонасыщенность расплава, и модификатора, измельчающего зерно.

Цинк заметно снижает антифрикционные и технологические свойства алюминиевых бронз и поэтому является нежелательной примесью.

Механические свойства некоторых алюминиевых бронз приведены в табл. 2.5 и 2.6. Одни из них применяют только как литейные (БрАМц10–2; БрАЖН11–6–6; БрАЖС7–1,5–1,5), другие – только как деформируемые (БрА5, БрА7). Большую группу бронз (БрАМц9–2; БрАЖ9–4; БрАЖМц10–3–1,5; БрАЖН10–4–4) используют и как деформируемые, и как литейные сплавы. Если бронзы третьей группы применяют как литейные, то к их марке добавляют букву «Л».

Таблица 2.5

**Типичные механические свойства деформируемых безоловянных бронз и медноникелевых сплавов (отожженное состояние)**

| Название сплавов     | Марка          | Механические свойства |              |                         |
|----------------------|----------------|-----------------------|--------------|-------------------------|
|                      |                | $\sigma_v$ , МПа      | $\delta$ , % | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
| Алюминиевые бронзы   | БрА5           | 380                   | 65           | 1,1                     |
|                      | БрА7           | 420                   | 70           | –                       |
|                      | БрАМц9–2       | 420                   | 25           | –                       |
|                      | БрАЖ9–4        | 550                   | 40           | –                       |
|                      | БрАЖМц10–3–1,5 | 600                   | 20           | 0,6                     |
|                      | БрАЖН10–4–4    | 650                   | 35           | 0,42                    |
| Кремнистые бронзы    | БрКМц3–1       | 400                   | 60           | 1,5                     |
|                      | БрКН1–3        | 350                   | 30           | –                       |
| Марганцевая бронза   | БрМц5          | 300                   | 40           | –                       |
| Мельхиор             | МНЖМц30–1–1    | 400                   | 25           | –                       |
| Мельхиор             | МН19           | 400                   | 35           | –                       |
| Нейзильбер           | МНЦ15–20       | 415                   | 40           | –                       |
| Нейзильбер свинцовый | МНЦС–16–29–1,8 | 400                   | 40           | –                       |
| Куниаль А            | МНА13–3        | 380                   | 13           | 0,5                     |
| Куниаль Б            | МНА6–1,5       | 360                   | 28           | 1,2                     |

Таблица 2.6

**Механические свойства литейных безоловянных  
бронз (литье в кокиль)**

| Марка сплава    | $\sigma_b$ , МПа | $\delta$ , % |
|-----------------|------------------|--------------|
| БрА9Мц2Л        | 390              | 20           |
| БрА10Мц2Л       | 490              | 12           |
| БрА9Ж3Л         | 490              | 12           |
| БрА10Ж3Мц2      | 490              | 12           |
| БрА11Ж6Н6       | 590              | 2            |
| БрА10Ж4Н4Л      | 590              | 6            |
| БрА9Ж4Н4Мц1     | 590              | 12           |
| БрА7Мц15Ж3Н2Ц2* | 610              | 18           |
| БрС30           | 60               | 4            |
| БрС60Н2,5       | 30               | 5            |

\* Литье в песчаную форму.

Деформируемые и литейные бронзы одной марки различаются по содержанию примесей. В литейных сплавах допускается большее их содержание.

Наиболее пластичная и наименее прочная бронза – БрА5. Она легко деформируется при всех видах обработки давлением. Меньшей, но достаточно высокой обрабатываемостью давлением отличаются бронзы БрА7 и БрАМц9–2, предназначенные для получения прутков, листов и лент. Остальные бронзы (БрАЖ9–4; БрАЖМц10–3–1,5; БрАЖН10–4–4) деформируются только в горячем состоянии, антифрикционные свойства и прочность этих бронз выше, чем у вышеперечисленных сплавов.

Из всех медно-алюминиевых сплавов наибольшим временным сопротивлением разрыву обладает бронза БрАЖ10–4–4, которую применяют и как деформируемую, и как литейную. Она жаропрочна и сохраняет удовлетворительную прочность до 400–500 °С. При температурах до 250–400 °С у бронзы БрАЖН10–4–4 наименьшая ползучесть по сравнению с другими алюминиевыми бронзами.

Большинство алюминиевых бронз относятся к термически неупрочняемым сплавам. Исключение составляет

бронза БрАЖН10–4–4, которая эффективно упрочняется закалкой с 980 °С с последующим старением при 400 °С, 2 ч.

**Бериллиевые бронзы.** Сплавы меди с бериллием отличаются уникальным благоприятным сочетанием в них высоких прочностных и упругих свойств, высокой электро- и теплопроводностью, высоким сопротивлением к разрушению и коррозионной стойкостью. В закаленном состоянии бериллиевые бронзы отличаются высокой пластичностью и технологичностью, достаточной для холодной обработки давлением.

Оптимальными свойствами обладают сплавы, содержащие 2–2,5% Ве (рис. 2.6). При дальнейшем увеличении содержания бериллия прочность сплавов повышается мало, а пластичность становится чрезмерно слабой.

Бериллиевые бронзы дополнительно легируют никелем и титаном. Никель повышает жаропрочность, титан обеспечивает дополнительное упрочнение.

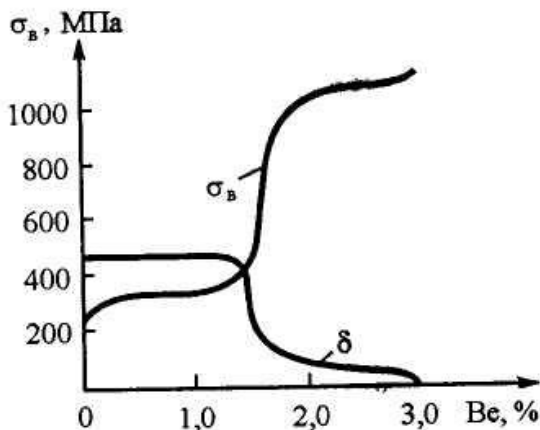


Рис. 2.6. Влияние бериллия на свойства сплавов Cu–Ве на механические свойства бронз

Наибольшее распространение получили бронзы БрБ2, БрБНТ1,7 и БрБНТ1,9 (табл. 2.7). После упрочняющей термической обработки они характеризуются высокими прочностными и пружинящими свойствами, а также удовлетворительным сопротивлением ползучести и хорошей коррозионной стойкостью. Они обладают отличной изно-

состойкостью, сохраняют высокую электро- и теплопроводность. Эти сплавы не склонны к хладноломкости и могут работать в интервале температур от  $-200$  до  $+250$  °С.

Указанные свойства обусловили применение бериллиевых бронз в ответственных назначениях, где требуется сочетание ряда уникальных свойств. Широкому применению бериллиевых бронз препятствует высокая стоимость и дефицитность бериллия, а также его токсичность.

Таблица 2.7

**Механические свойства бериллиевых бронз**

| Марка бронзы | Закалка          |              | Закалка и старение по оптимальному режиму |                      |              |
|--------------|------------------|--------------|-------------------------------------------|----------------------|--------------|
|              | $\sigma_b$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_b$ , МПа,                         | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| БрБНТ1,9     | 400–500          | 38–45        | 1150–1250                                 | 700                  | 4–6          |
| БрБ2         | 400–500          | 38–40        | 1150–1250                                 | 600                  | 4–6          |
| БрБ2,5       | 400–500          | –            | –                                         | 650                  | –            |
| БрБНТ1,7     | 300–400          | 45–50        | 1000–1100                                 | 400                  | 5–7          |

**Кремнистые бронзы.** Кремний растворяется в меди в довольно больших количествах, но в кремнистые бронзы вводят не более 3% Si. При увеличении содержания кремния до 3,5% повышается не только временное сопротивление разрыву меди, но и относительное удлинение.

При введении в сплавы меди, содержащей до 3% Si и менее 1,5% Mn, происходит упрочнение.

Кремнистые бронзы отличаются высокими пружинящими и антифрикционными свойствами, хорошей коррозионной стойкостью. Они отлично обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Эти сплавы хорошо свариваются с бронзой и сталью, легко паяются мягкими и твердыми припоями. Кремнистые бронзы не дают искр при ударе; обладают довольно высокой жидкотекучестью. Недостатком этих сплавов является большая склонность к поглощению газов.

В промышленном масштабе применяют бронзы БрКМц3–1 и БрКН1–3). Бронза БрКМц3–1 отличается высокими технологическими, механическими, пружинящими и коррозионными свойствами. Эту бронзу применяют как деформируемую. Бронза БрКН1–3 термически упрочняется; после закалки при 850 °С временное сопротивление

разрыву составляет около 350 МПа при относительном удлинении 30%, а после старения при 450 °С в течение 1 ч – 700 МПа при относительном удлинении 8%.

**Марганцевые бронзы.** Марганец раскисляет сплавы во время плавки, снижает температуры ликвидус и солидус, что облегчает процессы деформирования, улучшает литейные характеристики, обеспечивает улучшение свариваемости.

Марганец существенно повышает прочность меди при сохранении высокой пластичности, а также ее коррозионную стойкость, улучшает жаропрочные свойства. Марганцевые бронзы хорошо обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Наибольшее промышленное распространение получила бронза БрМц5, которая отличается повышенной коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

На основе системы Cu–Mn разработаны сплавы с большим внутренним трением, которые называют *сплавами высокого демпфирования*. Они обладают большой способностью гасить колебания, возникающие в деталях машин и конструкций при их эксплуатации. Применение этих сплавов приводит к снижению вибраций деталей, уменьшению шума, снижает опасность разрушения изделий из-за резонансных явлений.

**Свинцовые бронзы.** Обладают наилучшими антифрикционными свойствами по сравнению с другими сплавами на основе меди и поэтому наиболее широко применяются для изготовления подшипников скольжения. К подшипниковым материалам предъявляются следующие требования:

- хорошая начальная прирабатываемость;
- небольшой коэффициент трения;
- способность работать при достаточно высоких нагрузках, скоростях вращения и температурах без выдавливания, размягчения и выкрашивания;
- способность образовывать самосмазывающие или легко притирающиеся коллоидные продукты истирания;
- высокая теплопроводность, достаточная для интенсивного отвода тепла от зоны трения;

- высокая ударная вязкость в случае работы при ударных нагрузках.

Идеальная структура антифрикционного сплава – пластичная основа, в которую вкраплены твердые зерна. Твердые кристаллы обуславливают малый коэффициент трения, небольшой износ и воспринимают нагрузку, а пластичная основа обеспечивает хорошую прирабатываемость и смягчение ударов. Наиболее благоприятны условия работы подшипников скольжения при мелкозернистой однородной структуре.

По сравнению с оловянными подшипниковыми бронзами теплопроводность свинцовых бронз в четыре раза больше, благодаря чему они хорошо отводят тепло, возникающее при трении. Прочность и твердость свинцовых бронз невысока, поэтому их наплавляют на стальные трубы или ленты.

**Медно-никелевые сплавы.** Сплавы меди с никелем имеют большое значение в технике, так как они отличаются хорошими механическими свойствами, высокой коррозионной стойкостью и уникальными электрическими и термоэлектрическими свойствами, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии.

Медь образует с никелем непрерывные твердые растворы (рис. 2.7). Никель существенно упрочняет медь, причем максимальной прочностью обладают сплавы эквимолярного состава. Сплавы этого же состава имеют в 30 раз большее электрическое сопротивление, в десятки раз меньшую теплопроводность и практически нулевой температурный коэффициент электросопротивления.

Медно-никелевые сплавы разделяют на две группы: коррозионностойкие и электротехнические. К *коррозионностойким сплавам* относятся мельхиор, нейзильбер, куньяль.

**Мельхиорами** называют двойные и более сложные сплавы на основе меди, основным легирующим элементом которых является никель. Мельхиоры хорошо обрабатываются давлением в горячем и в холодном состоянии. Дополнительное легирование железом и марганцем сплавов меди с никелем обеспечивает высокую коррозионную

стойкость в пресной и морской воде и паре. Наиболее распространены мельхиоры МНЖМц3-1-1 и МН19 (см. табл. 2.5).

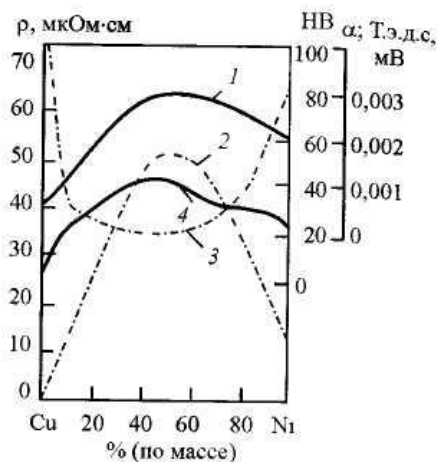


Рис. 2.7. Свойства сплавов системы Cu–Ni: 1 – твердость; 2 – электросопротивление; 3 – температурный коэффициент электросопротивления; 4 – термоэлектродвижущая сила (Т.Э.Д.С)

**Нейзильберы** принадлежат к тройной системе Cu–Ni–Zn и содержат 5–35% Ni и 13–45% Zn. По сравнению с мельхиорами они характеризуются более высокой прочностью из-за дополнительного легирования цинком. Легко поддаются горячей и холодной обработке давлением. Нейзильберы отличаются красивым серебристым цветом, не окисляются на воздухе и устойчивы в растворах солей и органических кислот. Некоторые сплавы этого типа для улучшения обрабатываемости резанием легируют свинцом. Из нейзильберов наиболее широко применяют МНЦ15–20. Из свинцового нейзильбера МНЦС16–29–1,8 изготавливают лишь детали часовых механизмов.

**Куниалими** называют сплавы тройной системы Cu–Ni–Al. Никель и алюминий при высоких температурах растворяются в меди в больших количествах, но с понижением температуры растворимость резко уменьшается. По этой причине сплавы системы Cu–Ni–Al эффективно упрочняются закалкой и старением. Сплавы под закалку

нагревают до 900–1000 °С, затем подвергают старению при 500–600 °С.

В промышленности применяют куниаль А (МНА13–3) и куниаль В (МНА6–1,5) (см. табл. 2.5). Они отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, удовлетворительно обрабатываются давлением в горячем состоянии. Куниали не склонны к хладноломкости. При понижении температуры растет не только прочность, но и пластичность этих сплавов. Так, при комнатной температуре у куниаля В в состаренном состоянии временное сопротивление разрыву составляет 638 МПа, поперечное сужение 50%, а при температуре –180 °С эти характеристики равны 700 МПа и 67% соответственно.

**Специальные медные сплавы.** Благодаря высокой электропроводности медь – незаменимый материал в электротехнике. Основной ее недостаток – относительно малую прочность – преодолевают наклепом, легированием, термической и термомеханической обработкой.

Холодной деформацией можно практически удвоить прочностные характеристики меди; электросопротивление при этом возрастает всего на 3%. Однако наклеп можно использовать для упрочнения меди лишь в условиях работы при невысоких температурах, так как выше примерно 200 °С начинается рекристаллизация.

Для применения в рассматриваемых областях медь можно легировать лишь элементами, которые значительно повышают прочность без существенного снижения электропроводности. Из сопоставления данных о влиянии легирующих элементов на прочностные характеристики и электропроводность меди следует, что целесообразно легировать проводниковые сплавы серебром, кадмием, хромом, цирконием и магнием. Так, при введении в медь 1% Zr или Sr твердость повышается в 2,5 раза, а электропроводность уменьшается всего на 20–30%. Наилучшее сочетание прочности и электропроводности достигается при легировании меди не одним, а двумя или тремя элементами, причем содержание этих элементов можно подобрать таким образом, что снижение электропроводности при сов-



местном легировании будет меньше, чем при введении одного компонента в том же количестве, что и в многокомпонентном сплаве.

Для ряда применений, в частности, для электродов контактной сварки, требуются материалы, которые наряду с высокой тепло- и электропроводностью характеризуются достаточной жаропрочностью. Обычные способы повышения жаропрочности в данном случае не применимы. Усложнение состава сплавов, положенное в основу обычных принципов легирования жаропрочных сплавов, неизбежно приводит к резкому падению тепло- и электропроводности.

Повысить жаропрочность при сохранении высокой тепло- и электропроводности можно при соблюдении следующих условий:

- высокая температура линии солидус;
- высокая температура начала рекристаллизации;
- малая растворимость легирующих элементов в твердой меди;
- достаточное количество малорастворимых в меди дисперсных выделений тугоплавких фаз.

Высокие прочностные и жаропрочные свойства обеспечивают не содержащие в меди интерметаллиды, такие как NiBe, Ni<sub>3</sub>Ti, Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>2</sub>Si, Co<sub>2</sub>Si, CoBe. Прирост прочностных свойств сплавов систем Cu-Ni-Si, Cu-Co-Si, Cu-Co-Be, Cu-Ni-Be в результате старения составляет 250–300% по сравнению с закаленным состоянием.

Состав и свойства некоторых промышленных бронз высокой электропроводности приведены в табл. 2.8. Как видно из этих данных, в бронзы этой группы вводят обычно не более 1–3% (по массе) легирующих элементов.

Бронзы высокой электропроводности по типу упрочнения разбивают на две группы:

- 1) упрочняемые холодной деформацией (термически неупрочняемые сплавы);
- 2) термически упрочняемые сплавы.

К первой группе принадлежат сплавы систем Cu-Ag, Cu-Cd и Cu-Mg. Бронза BrCr, содержащая 0,07–0,12% Ag, однофазна, так как серебро растворяется в меди в больших количествах. Высокой прочностью и электропровод-

ностью отличается кадмиевая бронза, содержащая 0,9–1,20% Cd. Растворимость кадмия в меди составляет 3% при 549 °С и уменьшается до 0,5% при комнатной температуре.

Кадмиевая бронза характеризуется способностью к искрогашению и поэтому применяется для изготовления контактных проводов электрифицированного транспорта, коллекторных шин, электродов сварочных машин, разрывных контактов и т.п.

Таблица 2.8

**Химический состав и свойства бронз  
высокой электропроводности и прочности**

| Марка   | Химический состав<br>(основа – Cu), % (по массе) | $\sigma_s$ , МПа | $\delta$ , % | Электросопротивление,<br>мкОм·см |
|---------|--------------------------------------------------|------------------|--------------|----------------------------------|
| Медь    | –                                                | 220              | 45           | 1,72                             |
| БрСр    | 0,1 Ag                                           | 440              | 14           | 1,85                             |
| БрКд    | 1,0 Cd                                           | 420              | 17           | 2,28                             |
| БрMg0,3 | 0,3 Mg                                           | 530              | 3            | 2,0                              |
| БрMg0,5 | 0,5 Mg                                           | 540              | –            | 3,0                              |
| БрMg0,8 | 0,8 Mg                                           | 650              | –            | 3,7                              |
| БрХ     | 0,7 Cr                                           | 450              | 19           | 2,03                             |
| БрЦр0,4 | 0,4 Zr                                           | 480              | 17           | 2,08                             |
| БрХЦр   | 0,7 Cr; 0,05 Zr                                  | 500              | 24           | 2,04                             |
| БрНБТ   | 1,5 Ni; 0,3 Be; 0,1 Ti                           | 820              | 5            | 3,97                             |
| БрНХК   | 2,5 (Co+Ni);<br>0,7 Cr; 0,7 Si                   | 800              | 17           | 3,72                             |

Растворимость магния в меди уменьшается от 2,8% при эвтектической температуре (722 °С) до 1,2% при 400 °С. Выделяющаяся при распаде твердого раствора фаза  $Cu_2Mg$  сильно ухудшает деформируемость сплавов при холодной обработке и исключает возможность эффективного наклепа. Поэтому магниевые бронзы содержат до 1,0% Mg (см. табл. 2.8). Магниевую бронзу БрMg0,3 рекомендуют как заменитель кадмиевой бронзы в производстве контактных колец и коллекторных пластин. Бронзы БрMg0,5 и БрMg0,8 применяют для изготовления кабелей и троллейных проводов.

Остальные (см. табл. 2.8) бронзы относят к термически упрочняемым. Хромовые бронзы, содержащие обычно от 0,4 до 1,0% Cr, обладают высокой электропроводностью после закалки и старения. Хром малорастворим в меди:

0,65% Cr при 1072 °С и 0,02% Cr при 400 °С, поэтому после старения структура хромовых бронз представлена почти чистой медью и небольшим количеством выделений хрома. При такой структуре сохраняется высокая электропроводность, составляющая около 80% от электропроводности меди. Хромовые бронзы имеют высокое сопротивление ползучести, хорошо сопротивляются износу. Они широко применяются для изготовления электродов аппаратов контактной сварки и коллекторов электромоторов.

Хорошими свойствами обладают сплавы, легированные 0,10–0,8% циркония. Еще более высоким сочетанием свойств отличаются бронзы, одновременно легированные и хромом, и цирконием. Введение сотых долей процента циркония в сплавы меди с 0,4–1,0% хрома приводит к существенному повышению прочности и жаропрочности. Благодаря высокой тепло- и электропроводности в сочетании с высокой жаропрочностью хромоциркониевая бронза БрХЦр – наиболее распространенный материал для электродов контактной сварки.

К сплавам с интерметаллидным упрочнением относятся бронзы БрНБТ, БрКБ, БрКХКо и БрНКХ. У этих бронз самые высокие прочностные характеристики, но вместе с тем в 1,5–2 раза большее удельное электросопротивление по сравнению с медью, серебряной, кадмиевой и хромциркониевой бронзами. К этой же группе принадлежат сплавы Мц2 и Мц3. Высокая жаропрочность сплава Мц2 обусловлена интерметаллидом Ni<sub>2</sub>Si, а сплава Мц3 – NiBe.

Все дисперсионно-твердеющие бронзы высокой электропроводности применяют в термически упрочненном состоянии. Их закалывают с температур 930–1000 °С (выдержка 2 ч в воде), а затем подвергают старению при 440–500 °С в течение 2–6 ч. В некоторых случаях между закалкой и старением вводят холодную деформацию.

## **Области применения меди и ее сплавов**

Области применения меди очень разнообразны. Чистую медь и малолегированные сплавы с высокой электропроводностью широко используют в электротехнике. Большое количество меди расходуется на провода высоко-

вольтных линий электропередач и воздушных линий связи. Из медных сплавов делают коллекторные шины для электромашин, токоподводящие шины и другие изделия высокой электропроводности.

Высокая теплопроводность меди обусловила ее применение в различного рода теплообменниках, конструкциях печей для дуговой плавки таких активных металлов, как титан, цирконий, тугоплавкие металлы. Из меди делают водоохлаждаемые изложницы, поддоны, кристаллизаторы, которые обеспечивают интенсивный отвод тепла от расплава.

Высокотехнологичные латуни применяют для получения изделий, требующих глубокой вытяжки: гильзы, патроны, стаканы снарядов. Из этих латуней изготавливают радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги, трубы, ленты.

Многие латуни, имеющие красивый золотистый блеск, хорошо воспринимающие эмалировку и золочение, используют для изготовления знаков отличия, фурнитуры и художественных изделий.

Многокомпонентные, или специальные латуни, обладающие достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, применяют в судостроении, электромашиностроении, теплотехнике. Из латуней, легированных свинцом, изготавливают детали, работающие в условиях трения. Их используют в часовом производстве автотракторной промышленности, типографском деле.

Об областях применения оловянных бронз свидетельствуют сами названия: пушечная бронза ( $\text{Cu} + 10\% \text{Sn} + 2\% \text{Zn}$ ), колокольная бронза (22% Sn). Бронзы этого типа до сих пор применяют в машиностроении. С древних времен и до настоящего времени из оловянных бронз отливают художественные изделия (статуи, барельефы, кронштейны, люстры и т.п.).

Оловянные бронзы с фосфором из-за высоких антифрикционных свойств и хорошей коррозионной стойкости применяют также в машиностроении для изготовления подпятников тяжелых кранов и разводных мостов, прокладок подшипников и втулок, гаек ходовых винтов, ше-

стерен, червячных колес и других деталей, работающих на трение. Некоторые бронзы, в частности, легированные фосфором, с высокими упругими свойствами применяют для изготовления круглых и плоских пружин.

Наибольшее распространение получили алюминиевые бронзы, которые используют, прежде всего, как заменители оловянных. Они распространены в морском судостроении, общем машиностроении, авто- и авиастроении. Из высокопрочных алюминиевых бронз изготавливают ответственные детали: шестерни, втулки, седла клапанов, гайки нажимных винтов, подшипники, пружины и пружинящие детали, детали электрооборудования.

Бериллиевую бронзу используют для наиболее ответственных назначений: плоские пружины, мембраны, детали точного приборостроения, пружинящие элементы электронных приборов и устройств, электроды сварочных машин. На менее ответственные пружины идут кремнистые бронзы. Поскольку бериллиевые бронзы не дают искр при ударе, из них делают инструмент для работы во взрывоопасных условиях. Из-за высокой коррозионной стойкости в морской воде бериллиевые бронзы применяют при прокладке кабелей по морскому дну.

Свинцовые бронзы – один из лучших подшипниковых материалов. Из них изготавливают опорные и шатунные подшипники мощных турбин, авиационных моторов, дизелей и других быстроходных машин.

Коррозионностойкие медно-никелевые сплавы, в частности, мельхиоры, и некоторые специальные бронзы применяют в установках для опреснения морской воды, в морском судостроении (конденсаторные трубы), для изготовления медицинских инструментов и деталей точных приборов. Хорошо известны мельхиоровые изделия широкого потребления (ножи, вилки, ложки, подстаканники и т.п.).

Медные сплавы применяют также в химической, нефтехимической, текстильной промышленности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: учебник / Б.Н. Арзамасов, В.И. Маракарова, Г.Г. Мухин. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 648 с. – Текст: непосредственный.
2. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – Москва: Металлургия, 1986. – 646 с. – Текст: непосредственный.
3. Зарапин, Ю.А. Стали и сплавы в металлургическом машиностроении: справочник / Ю.А. Зарапин, В.Д. Попов, Н.А. Чиченов. – Москва: Металлургия, 1980. – 144 с. – Текст: непосредственный.
4. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов: учебник / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – Москва: МИСИС, 2005. – 432 с. – Текст: непосредственный.
5. Корнилович, С.А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие / С.А. Корнилович. – Омск: Омский ГАУ, 2017. – 100 с. // Лань: электронно-библиотечная система: [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/176604>. – Текст: электронный.
6. Кузнецов, В.Г. Технология конструкционных материалов. Ч. 1: учебно-метод. пособие / В.Г. Кузнецов, Р.К. Кузнецов, Ф. А. Гарифуллин. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. – 404 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/79569.html>. – Текст: электронный
7. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 638 с. – Текст: непосредственный.
8. Металловедение и термическая обработка стали: справочник. Т. 3 / под ред. М.Д. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – Москва: Металлургия, 1983. – 215 с. – Текст: непосредственный.
9. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2004. – 788 с. – Текст: непосредственный.

10. Спицын, И.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Раздел «Горячая обработка металлов»: учеб. пособие / И.А. Спицын. – Пенза: ПГАУ, 2020. – 105 с. // Лань: электронно-библиотечная система: [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/170959>. – Текст: электронный.

11. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г. Сорокина. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с. – Текст: непосредственный.

12. Технология конструкционных материалов. Физико-механические основы обработки металлов резанием и металлорежущие станки: учеб. пособие / В.Е. Гордиенко, А.А. Абросимова, В.И. Новиков [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – 84 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/74354.html>. – Текст: электронный

13. Тылкин, М.А. Справочник термиста ремонтной службы / М.А. Тылкин. – Москва: Металлургия, 1981. – 647 с. – Текст: непосредственный.

14. Фраценюк, И.В. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов / И.В. Фраценюк, Л.И. Фраценюк. – Москва: Академкнига, 2004. – 192 с. – Текст: непосредственный.

15. Шопина, Е.В. Материаловедение и технология конструкционных материалов теплотехнологического оборудования: учеб. пособие / Е.В. Шопина, А.А. Стативко. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – 110 с. // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/92263.html>. – Текст: электронный.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Введение</b> .....                                                                                                 | 3  |
| <b>Практическая работа №1.</b><br>Классификация, маркировка, свойства<br>и применение сплавов на основе алюминия..... | 5  |
| <b>Практическая работа №2.</b><br>Классификация, маркировка, свойства<br>и применение сплавов на основе меди.....     | 55 |
| <b>Библиографический список</b> .....                                                                                 | 86 |

Компьютерная верстка Т.В. Телелева

Темплан ФБГОУ ВО «ЗГУ» 2023 г., поз. 60. Подписано в печать 22.02.2023.  
Формат 60x84 1/16. Бум. для копир.-мн.ап. Гарнитура *Bookman Old Style*.  
Печать плоская. Усл.п.л. 5,5. Уч.-изд.л. 5,5. Тираж 30 экз. Заказ 27.

663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: [RIO@norvuz.ru](mailto:RIO@norvuz.ru)

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в отделе ЦИТ ФБГОУ ВО «ЗГУ»