



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

«МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Кафедра «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИЛОВЕДЕНИЯ»

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЕГКИХ
МЕТАЛЛОВ:
СПЛАВЫ АЛЮМИНИЯ**

И.И. Чернов

МОСКВА-2016 г.

ЛЕГКИЕ МЕТАЛЛЫ

К **легким металлам** относят металлы с малой плотностью ($\rho < 3 \cdot 10^3$ кг/м³). Если не рассматривать щелочноземельные металлы, обладающие низким уровнем механических свойств (удельных прочности σ_B/ρ и жесткости E/ρ), то это **Al, Mg и Be**. У **Ti** более высокая плотность ($\rho = 4,5 \cdot 10^3$ кг/м³), но его часто относят к группе легких металлов.

Прочность, удельная прочность и удельная жесткость высокопрочной стали и легких материалов

| Материал | Основа | σ_B , МПа | σ_B/ρ | E/ρ |
|----------------|--------|------------------|----------------------|----------|
| | | | 10 ³ , км | |
| 03X18H18K9M5T | Fe | 2000 | 27 | 2,6 |
| B96 | Al | 700 | 23 | 2,4 |
| MA10 | Mg | 430 | 21 | 2,3 |
| Be технический | Be | 680 | 37 | 16,1 |
| BT15 | Ti | 1500 | 30 | 2,6 |

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Чистый **Al** имеет **ГЦК** решетку, высокие значения теплопроводности, электропроводности и скрытой теплоты плавления.

$$T_{\text{пл}} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Al коррозионно-стоек на воздухе вследствие образования плотной оксидной пленки Al_2O_3 .

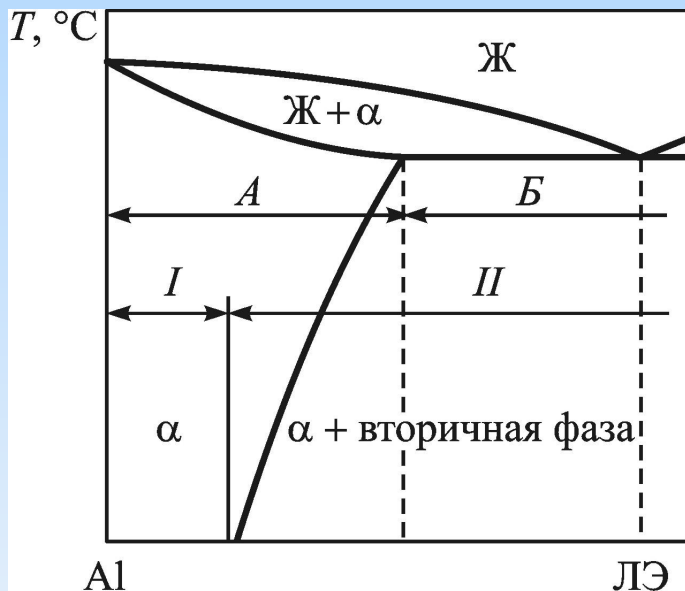
Al проявляет необычность свойств в металлических сплавах: почти со всеми металлами он образует сплавы с весьма ограниченной растворимостью и большим числом интерметаллидных фаз несмотря на то, что у ряда металлов размеры атомов отличаются от размера атома **Al** менее чем на 15%, а **Ni** и **Cu** имеют, кроме того, и изоморфные с **Al** кристаллические решетки. Это в соответствии **с правилом Юм-Розери** могло бы благоприятствовать образованию твердых растворов.

Al не образует непрерывных рядов твердых растворов **ни с одним из элементов**.

В **Al** растворимостью более 10% обладают **Li, Mg, Zn, Ag**
более 1% – **Si, Cu, Ga, Ge**

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Сплавы Al классифицируют по технологии изготовления (деформируемые, литейные, спеченные), способности к термической обработке (упрочняемые и неупрочняемые) и свойствам:



Классификация технических алюминиевых сплавов:

- деформируемые (область А)
- литейные (область В)
- неупрочняемые т/о (I)
- упрочняемые т/о (II)

(ЛЭ – легирующий элемент)

Схема создания сплавов алюминия типична (как и для всех сплавов):

выбор *основы сплава*, *основных и вспомогательных* легирующих элементов, *модификаторов*, определение и *контроль примесей*.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Основные легирующие элементы:

$$\alpha \geq 1; \quad k_r \geq 0,05$$

(**Zn**, **Ag**, **Mg**, **Li**, **Ga**, **Ge**, **Cu** и **Si**, наиболее дешевые **Mg**, **Zn**, **Cu** и **Si**).

Вспомогательные легирующие элементы:

$$0,01 < \alpha < 1; \quad k_r \geq 0,05$$

(27 элементов, некоторые дорогие или очень дорогие. Доступные **Mn** и **Ca**, упрочняющие **Al**; **Be** – повышающий сопротивление окислению; **In** и **Cd** – повышающие надежность изделий; **Sc** – стабилизирующий механические свойства).

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Модификаторы инокуляторы Ti, Zr, Cr, Mo,
лимитаторы B, Sb, Bi, Ba, Na;

наиболее распространенные модификаторы **Ti** и **Zr**.

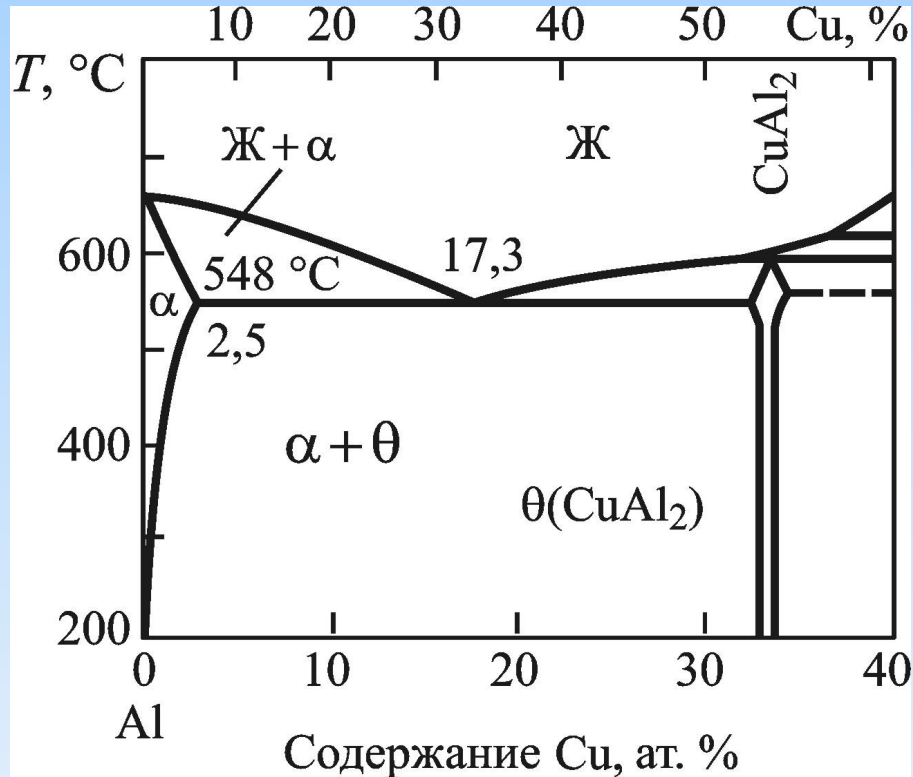
Вредные примеси:

$\alpha > 0,001$; $k_r < 0,05$ (Co, As, Sn, O₂, H₂, N₂)

Важнейшими в техническом отношении являются сплавы
на основе систем:

Al-Cu, Al-Mg, Al-Si, Al-Fe, Al-Ni, Al-Mn

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия



Система Al-Cu.

Наиболее распространены деформируемыми сплавами являются сплавы типа *дюралюминов*.

Упрочняющая фаза $\theta\text{-CuAl}_2$ (тетрагональная).
 $T_{\text{раб}} \leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ (max). Но в большинстве случаев $\leq 180\text{--}200 \text{ }^\circ\text{C}$

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Система Al–Cu–Mg. Дальнейшее повышение прочности сплавов типа дюралюминов достигается применением тройной системы Al–Cu–Mg путем легирования 3–5 % Cu 0,5–2 % Mg.

В зависимости от соотношения Cu и Mg образуются интерметаллидные соединения:

- CuAl_2 ,
- CuAl_2Mg (**S**-фаза),
- CuAl_6Mg_4 (**T**-фаза).

Наибольший эффект упрочнения достигается при **максимальном количестве S-фазы.**

S-фаза благотворно влияет и на жаропрочность.

В дюралюминах Fe вредная примесь – связывает часть Cu в Cu_2FeAl (**N**-фаза), почти нерастворимую в Al и, таким образом, способствует уменьшению количества упрочняющих фаз CuAl_2 и CuAl_2Mg .

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Химический состав и механические свойства типичных марок дюралюмина при 20 °С (Д1, Д16, В95 – листы, АК8 – поковка; Д, В, АК – обозначение дюралюминов, высокопрочных и ковочных алюминиевых сплавов соответственно)

| Сплав | Содержание элементов, мас. % | | | | | | Механические свойства | | |
|-------|------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| | Cu | Mg | Mn | Si | Fe | Другие | $\sigma_{B,2}$ МПа | $\sigma_{0,2}$ МПа | δ , % |
| Д1* | 3,8– 4,8 | 0,4– 0,8 | 0,4– 0,8 | 0,7 | $\leq 0,7$ | – | 400 | 240 | 20 |
| Д16* | 3,8– 4,9 | 1,2– 1,8 | 0,3– 0,9 | $\leq 0,5$ | $\leq 0,5$ | – | 440 | 330 | 18 |
| В95** | 1,4– 2,0 | 1,8– 2,8 | 0,2– 0,6 | $\leq 0,5$ | $\leq 0,5$ | 0,01– 0,25Cr; 5–7Zn | 540 | 470 | 10 |
| АК8** | 3,9– 4,8 | 0,4– 0,8 | 0,4– 1,0 | 0,6– 1,2 | 0,7 | – | 480 | 380 | 9 |

* Закалка от 490–505 °С и естественное старение не менее 4 сут.

** Закалка от 490–500 °С и искусственное старение при 190 °С 10 ч.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Термическая обработка сплавов:

нагрев до температуры α -твердого раствора (480–510 °С), выдержка и быстрое охлаждение (*закалка*) → фиксируется пересыщенный твердый раствор Си и Mg в Al + *старение*:

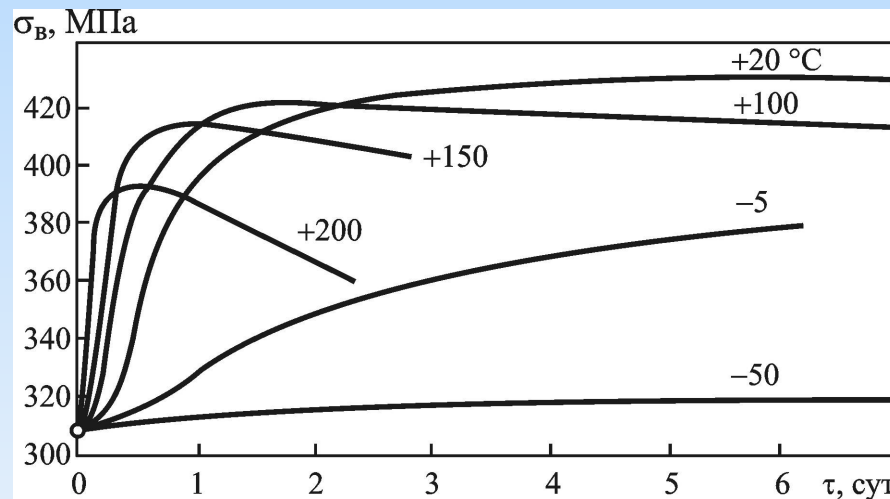
□ *естественное старение* при нормальной (комнатной) температуре в течение 2–3 сут, заканчивается образованием **зон Гинье–Престона** (Г-П) с $d = 10$ нм и $t = 0,5–1,0$ нм;

□ *искусственное старение* – при 120–180 °С, подвергают лишь детали, используемые для работы при повышенных температурах (до 200 °С).

Увеличение $T_{\text{стар}}$ приводит к росту зон Г-П до $d_{\text{max}} = 300$ нм и $t = 0,5–10$ нм.

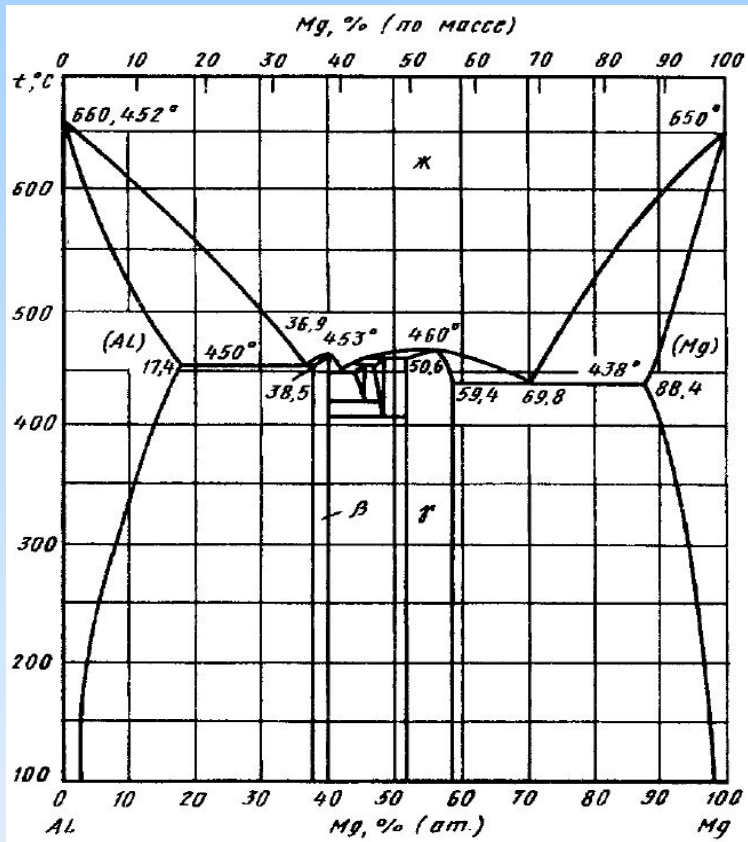
Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

При $T_{\text{стар}} = 150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ концентрация Си в зонах Г-П по мере увеличения времени достигает стехиометрического соотношения CuAl_2 , образуется *когерентная* промежуточная *метастабильная фаза θ'* с собственной кристаллической решеткой \rightarrow **max** упрочнения.



С увеличением $t_{\text{стар}}$ при $T_{\text{стар}} = 150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ или увеличение $T_{\text{стар}}$ при $t = \text{const}$ промежуточная фаза θ' \rightarrow стабильную фазу $\theta\text{-CuAl}_2$ \rightarrow разрыв когерентной связи коагуляция частиц \rightarrow разупрочнение сплава, особенно интенсивно при $T > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия



Система Al-Mg. Деформируемые сплавы содержат до 7,5 % Mg.

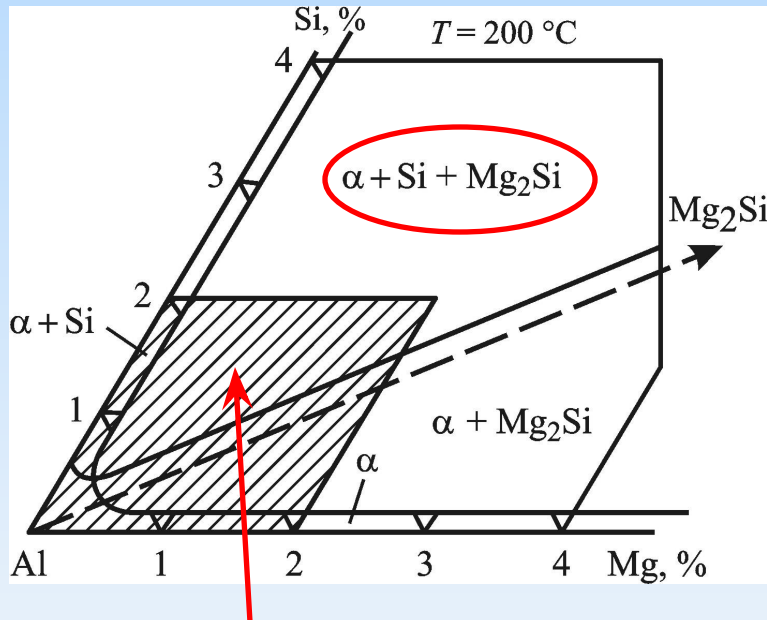
При >1,4 % Mg сплавы имеют структуру $\alpha + \text{Al}_3\text{Mg}_2$, но эффект упрочнения при т/о незначителен: низкая $T_{\text{пл}}$ эвтектики (449 °C), что на >200 °C ниже $T_{\text{пл}}$ Al.

Дополнительное легирование Cr (~ 0,5 %) и Ti (~ 0,1 %) несколько улучшает прочностные свойства.

Система Al-Mg перспективна созданию **свариваемых сплавов**, но при 0,5–0,7 % Mg резко повышается **склонность к трещинообразованию** вследствие появления эвтектической составляющей в условиях неравновесной кристаллизации при сварке.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Система Al–Mg–Si. В сплавах Al–Mg–Si кремний увеличивает прочность вследствие образования упрочняющей фазы Mg_2Si . Концентрации Mg и Si подбирают так, чтобы обеспечить максимальное количество упрочняющей фазы. **При избытке Si** существует трехфазная область Al+Si+ Mg_2Si .



Заштрихованная область – сплавы, исследованные как свариваемые

Имеются данные, что **при избытке Mg** образуется трехфазная область Al+ Mg_2Si - Mg_5Al_8 .

К недостаткам сплавов Al–Mg–Si:

- склонность к росту зерна, которую можно уменьшить введением **Mn** или **Cr**;
- быстрое разупрочнение при повышении температуры;
- низкая коррозионная стойкость в воде.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Система Al–Mg–Sc. Малые количества скандия (десятые доли процента) существенно (в 1,5–2 раза) *повышают прочность* при сохранении достаточно высокой *пластичности*.

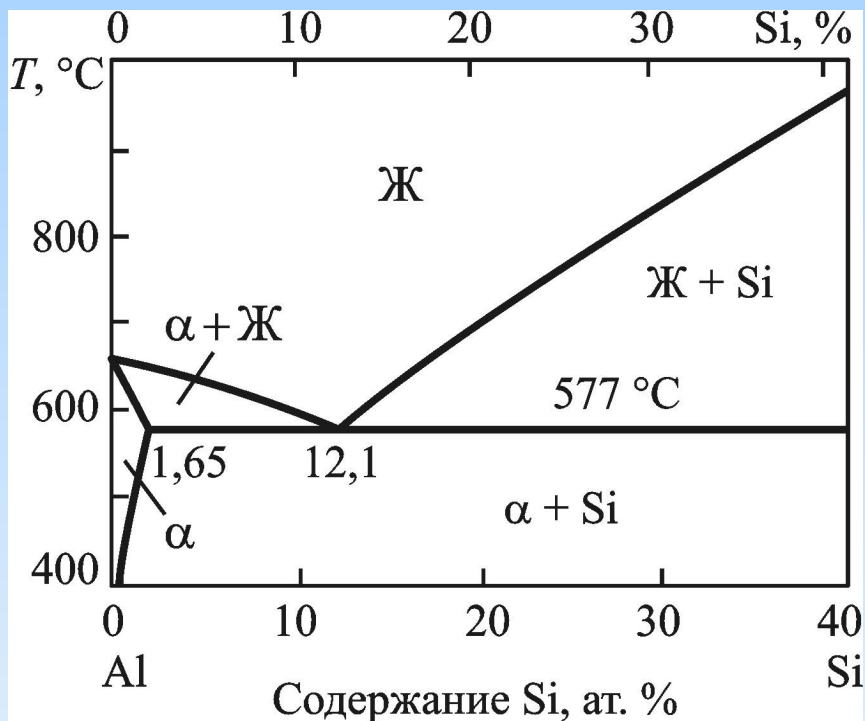
«Скандиевый эффект» повышения прочности реализуется не только твердорастворным механизмом, характерным для сплавов Al–Mg, но в композициях Al–Mg–Sc действуют и другие механизмы упрочнения:

- **дисперсионное упрочнение** за счет интерметаллидов Al_3Sc , $Al_x(Sc, Zr)_{1-x}$, выделяющихся при распаде твердого раствора скандия в алюминии;
- **измельчение зеренной структуры** слитка;
- **структурное упрочнение** деформированного полуфабриката путем образования полигонизованной структуры с размером субзерен тем меньшим, чем выше степень деформации при обработке давлением.

Интерметаллид Al_3Sc имеет ГЦК решетку, незначительно (на 1,4 %) превышающую параметр решетки Al → при т/о или технологических нагревах **вторичные** частицы Al_3Sc *сохраняют когерентную* связь с матрицей → поэтому при кристаллизации сплавов **первичные** частицы Al_3Sc проявляют модифицирующее действие, вызывая измельчение литого зерна → формирование мелкокристаллической бездендритной структуры слитка → формирование мелкой равномерной сетчатой дислокационной структуры → высокая термическая стабильность за счет закрепления дислокационных субграниц.

Дополнительные эффекты Sc: вследствие повышения $T_{рекр}$ добавки Sc улучшают свариваемость за счет измельчения зерна в сварном шве (как в литом металле) и уменьшения зоны термического влияния → снижается склонность к образованию горячих трещин при сварке.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия



Система Al-Si.

При легировании Al кремнием образуются *эвтектические сплавы*

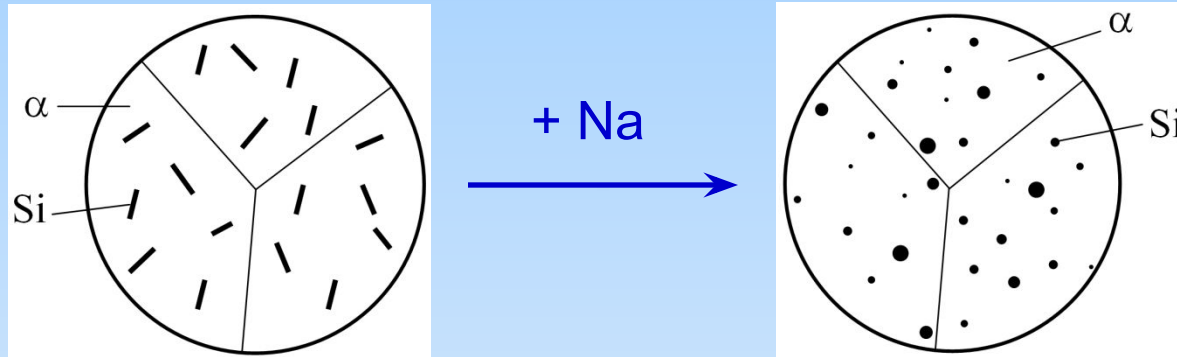
Максимальная растворимость Si в Al при температуре эвтектики 1,65 ат. %.

При нормальной температуре его растворимость ничтожна и в структуре обычно присутствуют хрупкие, игольчатой формы выделения, состоящие из практически чистого кремния.

T/o оказывает слабое упрочняющее влияние на сплавы Al-Si и не применяется.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Система Al-Si.



Игольчатая форма выделений Si – низкие механические свойства:
 $\sigma_B \approx 100\text{--}140$ МПа и $\delta \approx 1\text{--}3$ %.

↓
Модифицирование (введение Na (около 2–3 % от массы сплава) или хлористых или фтористых солей Na (например, $2/3\text{NaF} + 1/2\text{NaCl}$) в количестве ~ 1% от массы сплава.

↓
Дисперсные округлые частицы Si – возрастают как **прочностные свойства** так и **относительное удлинение**:

$\sigma_B \approx 180\text{--}200$ Мпа и $\delta \approx 5\text{--}10$ %.

Сплавы Al-Si приобрели большое промышленное значение как **литейные сплавы** и получили название **силуминов**. Содержание Si в них соответствует эвтектическому составу (11–13 %).

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Система Al-Zn. Al и Zn не образуют соединений. Имеется широкая область твердых растворов на основе Al. Максимальная растворимость Zn (до 70 %) при эвтектической температуре 443 °С. Zn – один из основных легирующих элементов (как Cu, Mg). Сплавы Al-Zn термообрабатываются, но эффект упрочнения невелик.

Двойные сплавы Al-Zn при малых добавках Zn (< 10 %) не применяются. Совместное введение в алюминий Zn, Cu, Mg позволило создать группу высокопрочных конструкционных сплавов, нашедших широкое применение.

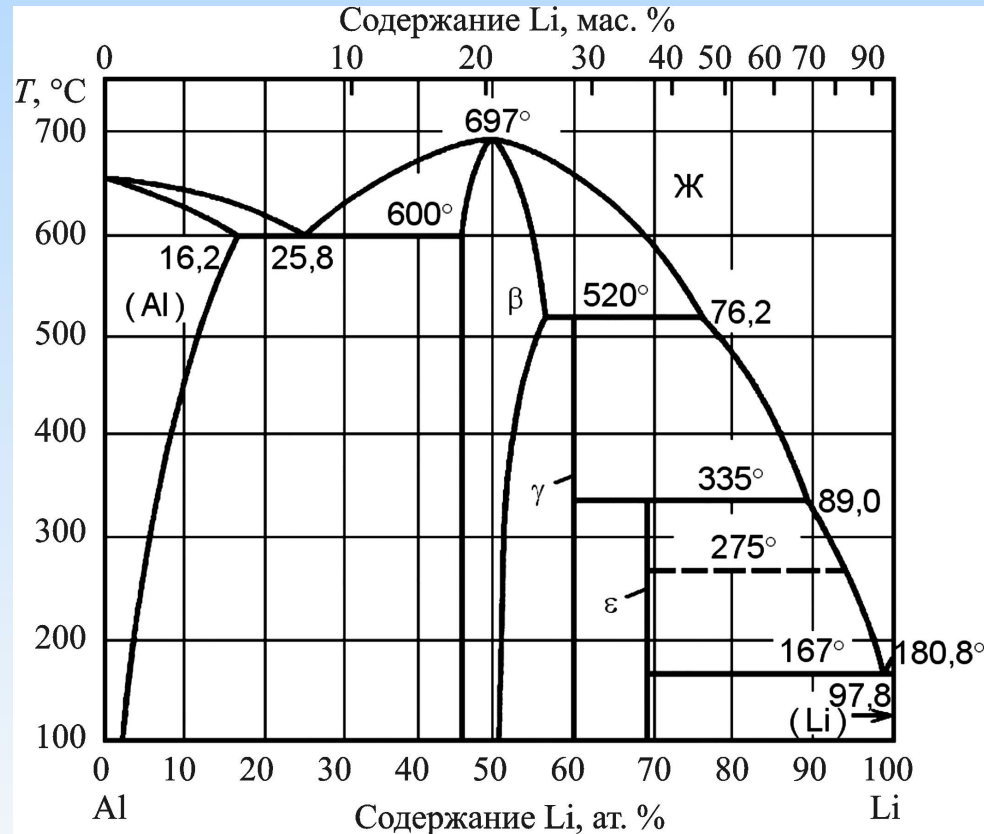
На системе Al-Zn открыто явление сверхпластичности, что дало возможность разработать ряд сверхпластичных сплавов Al-Zn.

Система Al-Fe. Легирование железом приводит к появлению новой фазы – $FeAl_3$ с ромбической кристаллической решеткой. Растворимость Fe в твердом Al мала (0,05% при температуре эвтектики), поэтому даже малые примеси Fe приводят к появлению *гетерогенной структуры*. Алюминий и интерметаллид $FeAl_3$ образуют эвтектику с температурой плавления 655 °С, близкой к температуре плавления Al. Практически полное отсутствие растворимости Fe в твердом Al исключает возможность т/о.

Система Al-Ni. Легирование *никелем* широко используется для повышения коррозионной стойкости и жаропрочности алюминиевых сплавов. Предельная растворимость Ni в твердом Al сравнима с растворимостью Fe: при температуре эвтектики (640 °С) – около 0,05 %, поэтому уже при малом содержании Ni в структуре появляется $NiAl_3$. Интерметаллид $NiAl_3$ имеет ромбическую кристаллическую решетку и образуется по перитектической реакции при 854 °С. Влияние Ni на свойства Al аналогично влиянию Fe. Легирование никелем, как и легирование Fe, исключает применение т/о.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Система Al-Li. Литий очень легкий элемент и на основе системы Al-Li можно получить легкие сплавы с *высокой удельной прочностью*. На ДСС Al-Li со стороны Al присутствует интерметаллидная фаза β -AlLi, имеющая кубическую решетку.



Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Для повышения прочности, технологичности и эксплуатационных характеристик в эту систему добавляют дополнительные легирующие элементы (например, первый сплав с литием ВД23 имеет систему элементов **Al-Li-Cu-Mn-Cd**).

В 1965 году разработан самый легкий сплав 1420 системы Al-Mg-Li

[(1,9–2,3)%Li, (5–6)%Mg, $\leq 0,3\%$ Fe, (0,1–0,3)%Si, $\leq 0,3\%$ Mn, $\leq 0,1\%$ Ti, (0,09–0,15)%Zr, $\leq 0,005\%$ Na)], обладающий высокой **коррозионной стойкостью**, хорошей **технологичностью**, **повышенным модулем упругости** и достаточной **прочностью**.

Влияние легирования на структуру и механические свойства алюминия

Более поздняя модификация – сплав 1421, содержит **Sc** и имеет на 20–25 % большой предел текучести. На базе системы Al–Li–Cu в результате дополнительного легирования **Zr** и **Sc** создан свариваемый сплав 1460.

Алюминий-литиевые сплавы – крупное достижение советских материаловедов, работающих в аэрокосмической отрасли !!!

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

Металлокерамические алюминиевые материалы.

Важно, чтобы упрочняющая фаза сохраняла бы высокую степень дисперсности до температуры, близкой к температуре плавления матрицы.

Это возможно в металлокерамических композициях, состоящих из *металлического Al* и дисперсных частиц *оксида алюминия Al_2O_3* . Они именуют *спеченными алюминиевыми порошками (САП)*.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

Металлокерамические алюминиевые материалы.

Детали или полуфабрикаты из САП изготавливают методами порошковой металлургии. Размеры частиц порошка Al могут колебаться от 0,1 до 10 мкм.

Теплофизические свойства САП высокие: теплопроводность САП с 13 % Al_2O_3 лишь на 15 % ниже теплопроводности чистого Al.

Вместе с тем, по прочностным свойствам САП *существенно превосходят* алюминий.

При комнатной температуре эти свойства приближаются к деформируемым алюминиевым сплавам, а при повышенной температуре превосходят их.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

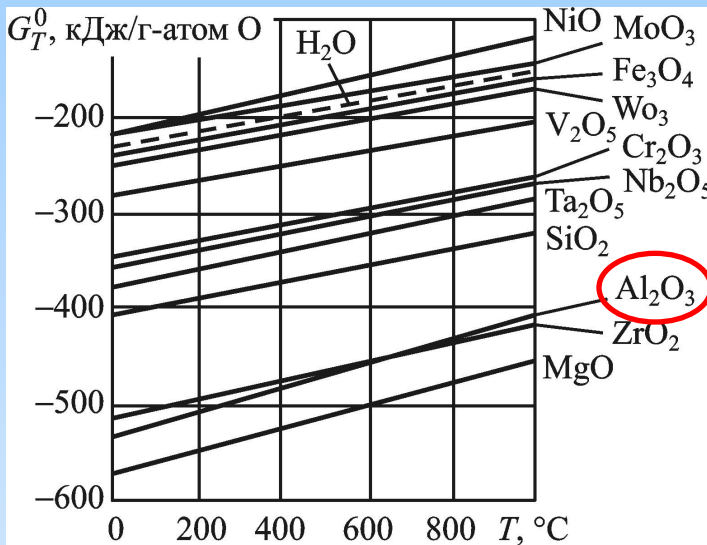
Металлокерамические алюминиевые материалы.

С увеличением концентрации Al_2O_3 прочность САП увеличивается, а пластичность резко падает, поэтому объемное содержание оксида **не превышает 13–14 %**.

В отличие от *дисперсионного* упрочнения, достигаемого термической обработкой, при *дисперсном* упрочнении фаза Al_2O_3 имеет значительные преимущества:

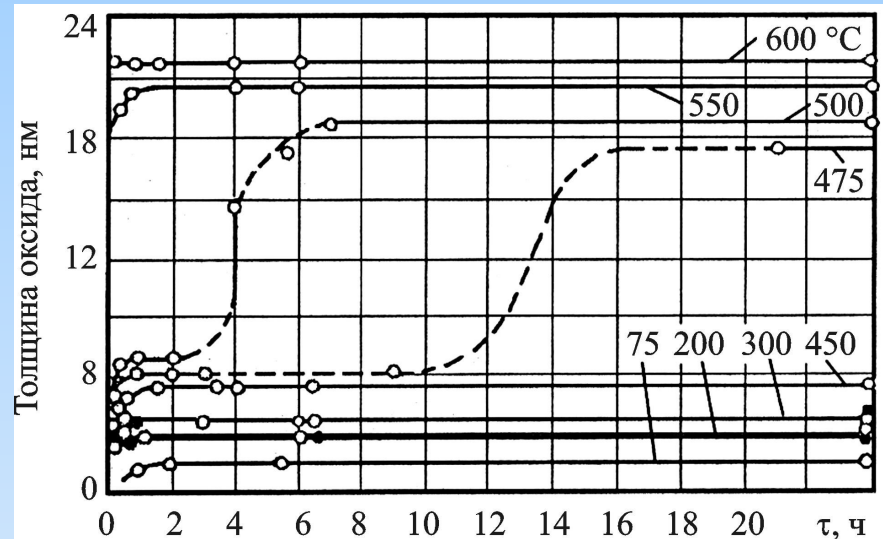
- при повышении температуры не происходит укрупнения частиц, поэтому микроструктура сплавов САП стабильна почти плавления алюминиевой матрицы; поэтому при $T \leq 400$ °С прочность в САП выше прочности обычных сплавов;
- у САП практически отсутствует рост зерен при высокой температуре, поскольку частицы Al_2O_3 служат **барьерами**, препятствующими рекристаллизационным процессам;
- высокая стабильность структуры при повышенной температуре.

Влияние легирования на коррозионную стойкость алюминия



Al имеет большое сродство к кислороду

На Al образуется тонкая плотная пленка Al_2O_3 , поэтому Al имеет высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях при нормальной температуре. В отсутствие влаги толщина пленки составляет от 2 до 3 нм. Присутствие паров воды благоприятствует росту пленки оксида, который может продолжаться месяцы и годы.



Структура оксидной пленки сложна:

- пленка, прилегающая к металлу, имеет **аморфное** строение;

- верхний слой – **байерит** $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, моноклинная гидроксиль;

- при $T > 100^\circ\text{C}$ образуется **бёмит** $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, имеющий ромбическую структуру.

Бёмит получается и при окислении **байерита** в водяных парах. Температура, при которой скорость коррозии Al резко возрастает, соответствует температуре, при которой вместо **байерита** продукт коррозии **бёмит**.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

При низкой температуре Al коррозионно-стоек в воде из-за способности к **пассивации**, объясняемой торможением анодного растворения металла вследствие образования на поверхности защитных слоев (оксидных, адсорбционных), что связано с тем, что коррозия Al протекает преимущественно с **кислородной деполяризацией**, когда чистый Al (99,9998 %) весьма стоек.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

Если примеси, присутствующие в Al (Cu, Fe, Si и др.), обладают *низким перенапряжением разряда водорода*, то они облегчают катодные процессы и смещают стационарный потенциал Al в положительную сторону.

В результате Al *быстро корродирует* и, кроме общей коррозии, возникают местные поражения металла. Кроме того, имеет место нарушение сплошности защитной пленки вследствие выхода на поверхность вторичных фаз – FeAl_3 , CuAl_2 , Si.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

Коррозия Al в воде при $T > 100$ °C возрастает.

В деаэрированной среде коррозия Al идет с **водородной деполяризацией** и стационарный потенциал отвечает области активного растворения.

С повышением температуры может изменяться и характер коррозии. Кроме общей коррозии интенсивно протекает **местная** и **межкристаллитная коррозия**.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

На коррозионное поведение Al оказывает влияние среда. Наиболее важным является концентрация ионов водорода, определяемая показателем pH: с наименьшей скоростью Al корродирует в **нейтральных** и **слабокислых** средах.

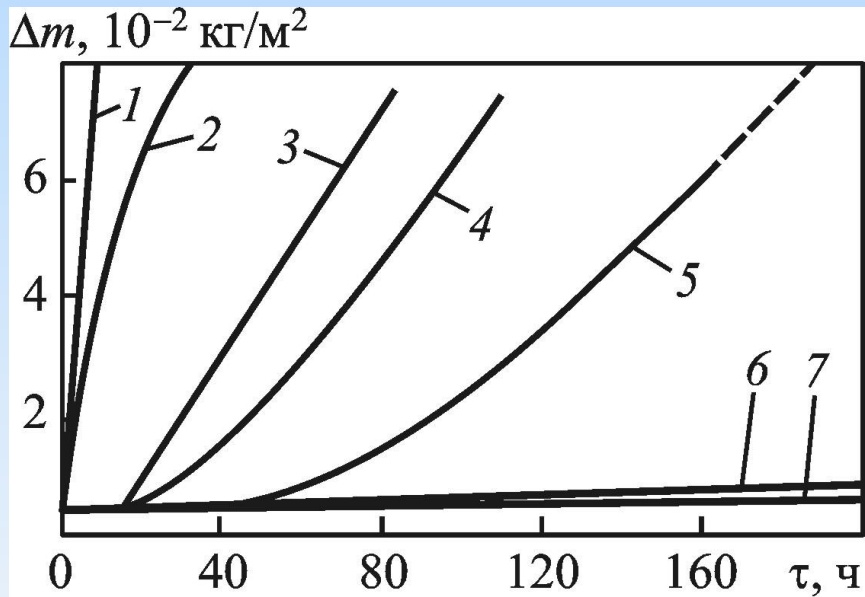
Оптимальный pH зависит от температуры:

- при 125–200 °С pH = 4,5–5,5;
- при 200–300 °С pH = 3–3,5.

С повышением pH до 8,5 скорость коррозии возрастает, изменяется и ее характер: общая коррозия осложняется появлением язв.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

Легированием небольшими количествами ряда элементов удастся снизить скорость коррозии в сотни и тысячи раз:



Изменение массы алюминиевых сплавов в деионизованной воде при 300 °C:

- 1 – Al + 0,5 % Fe;
- 2 – Al + 0,5 % Ni;
- 3 – Al + 2 % Cu;
- 4 – Al + 2 % Fe;
- 5 – Al + 1 % Fe;
- 6 – Al + 1 % Ni;
- 7 – Al + 2 % Ni

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

Положительное влияние легирования на коррозионную стойкость алюминиевых сплавов в воде при повышенных температурах может осуществляться тремя основными путями:

- 1) *уменьшением степени термодинамической неустойчивости*, главным образом путем создания при помощи легирования прочных защитных пленок;
- 2) *торможением катодных процессов*;
- 3) *торможением анодных процессов*.

Влияние легирования на коррозионную стойкость алюминия

Первый путь (уменьшением степени термодинамической неустойчивости) ограничено применим, т.к. из всех компонентов в сплавах способность к образованию защитного слоя присуща основе сплава – алюминию. При $T > 100$ °С применяется **плакирование** – покрытие поверхности сплавов тонкой пленкой чистого Al.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

При введении в Al легирующих элементов появляются интерметаллиды – CuAl_2 , FeAl_3 , NiAl_3 и др., которые в условиях электрохимического процесса коррозии проявляют себя в качестве катодной составляющей.

Уменьшение **катодной активности** сплава достигается уменьшением количества интерметаллидных фаз за счет снижения концентрации легирующих элементов или перевода их в твердый раствор.

Однако для пассивирующихся систем повышение коррозионной стойкости при $T = 200\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ достигается и путем роста катодной эффективности: легирование Fe и Ni (примерно по 1% каждого элемента) **увеличивает скорость катодного процесса** реакции разряда иона водорода и **смещает стационарный потенциал в положительную сторону** – в пассивную область.

Влияние легирования на коррозионную стойкость алюминия

Протекание **анодного процесса** связано с переходом металла из решетки в коррозионную среду в виде ионов, т.е. анодное растворение металла. Однако возможности повышения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов за счет торможения анодных процессов крайне ограничены: упрочняющая фаза должна быть **анодной** по отношению к металлической матрице (**катодной**). Это может быть только сплав, легированный **Mg**, в котором упрочняющая фаза **Mg₁₇Al₁₂** является анодной по отношению к металлической матрице. Коррозионная стойкость этого сплава значительно выше, чем, например, дюралюминия, т.к. отдельные включения анодной составляющей растворяются и поверхность становится электрохимически однородной.

Влияние легирования на коррозионную стойкость алюминия

При наличии в структуре химических соединений возможно развитие *межкристаллитной коррозии (МКК)*. Например, это сплавы типа дюралюминов, легированные Cu и Mg и содержащие в качестве упрочняющих фаз интерметаллиды CuAl_2 и CuAl_2Mg (S-фаза).

Развитие МКК связано с ускоренным разрушением интерметаллидных фаз по границам зерен, вызванным появлением на включениях интерметаллидов частичек Cu в виде губки, которые становятся *локальными катодами* и усиливают растворение как интерметаллидов, так и прилегающих к нему участков твердого раствора Cu в Al.

Развитие МКК может быть ограничено применением т/о и деформации, способствующих разрушению сплошных выделений интерметаллидов по границам зерен.

Движение воды способствует отводу от катодных и анодных участков продуктов реакций и поэтому *всегда ускоряет коррозию*.

Влияние легирования на коррозионную стойкость алюминия

Характер структуры во многом определяет коррозионную стойкость сплавов Al–Ni–Fe.

В сплавах, содержащих примерно равные концентрации Ni и Fe, наблюдается присутствие преимущественно интерметаллида FeNiAl_9 ;

- при большем содержании Ni выделяется и интерметаллид NiAl_3 ;

- преобладание Fe способствует появлению FeAl_3 совместно с FeNiAl_9 .

Необходимым условием приемлемой коррозионной стойкости является наличие в структуре интерметаллида FeNiAl_9 .

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ АЛЮМИНИЯ

Определенное влияние на степень коррозии оказывает *дисперсность интерметаллидных* фаз: более высокую коррозионную стойкость имеют сплавы с высокодисперсными и равномерно распределенными в алюминиевой матрице частицами интерметаллидов. Поэтому положительное значение имеет легирование **Zr** и **Ti** (до 0,15 %), так как при этом происходит измельчение структуры сплавов и сварных швов (проявляется *модифицирующее влияние* Zr и Ti).

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Алюминий и его малолегированные сплавы ввиду низкой прочности применяют для ненагруженных или слабонагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется *легкость, свариваемость, пластичность*.

Из них изготавливают рамы, двери, трубопроводы, фольгу, цистерны для перевозки нефти и нефтепродуктов, посуду и др.

Благодаря *высокой теплопроводности* Al используется для различных теплообменников, в промышленных и бытовых холодильниках.

Высокая *электропроводность* способствует его широкому применению для конденсаторов, проводов, кабелей, шин и др.

В связи с высокой *отражательной способностью* используется для прожекторов, рефлекторов, экранов телевизоров.

Малое *сечение захвата тепловых нейтронов* позволяет использовать малолегированные сплавы Al в качестве конструкционных материалов в активной зоне реакторов на тепловых нейтронах, работающих при относительно низких температурах, например, в качестве матрицы дисперсного топлива и оболочки твэов в исследовательских реакторах.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Сплавы *повышенной прочности* используются для ответственных нагруженных деталей: для силовых элементов конструкции пассажирских и транспортных самолетов.

Химический состав в % материала АМц

| Fe | Si | Mn | Ti | Al | Cu | Mg | Zn | Примесей |
|--------|--------|---------|--------|------------|---------|--------|--------|--------------------------------|
| до 0.7 | до 0.6 | 1 - 1.6 | до 0.2 | 96.35 - 99 | до 0.15 | до 0.2 | до 0.1 | прочие, каждая 0.05; всего 0.1 |

Примечание: Al - основа; процентное содержание Al дано приблизительно

Химический состав в % материала АМг6

| Fe | Si | Mn | Ti | Al | Cu | Be | Mg | Zn | Примесей |
|--------|--------|-----------|------------|--------------|--------|----------------|-----------|--------|--------------------------------|
| до 0.4 | до 0.4 | 0.5 - 0.8 | 0.02 - 0.1 | 91.1 - 93.68 | до 0.1 | 0.0002 - 0.005 | 5.8 - 6.8 | до 0.2 | прочие, каждая 0.05; всего 0.1 |

Примечание: Al - основа; процентное содержание Al дано приблизительно

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

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

Применение сталеалюминиевых конструкций судов потребовало создания и разработки технологии производства биметаллического материала (*переходников*) на основе судостроительных стали и алюминиевого сплава, разработки технологии сварки, обеспечивающей необходимые качество и эксплуатационную прочность соединений судокорпусных конструкций из разнородных материалов.

Из алюминиевых сплавов изготавливают надстройки, рубки, мачты, кожухи дымовых труб, переборки и выгородки и др.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Соединение алюминиевых и стальных элементов может осуществляться клепкой или сваркой через биметаллические переходники. **Но!** Клепанный узел, как показывает практика эксплуатации судов, недостаточно надежен и долговечен. Под действием влаги заклепки активно *корродируют*, нарушается герметичность узла, существенно снижается его прочность, поэтому часто необходим ремонт таких соединений.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Более перспективным способом изготовления конструкций из разнородных материалов (в частности, стали и алюминия) является сварка с применением *биметаллических переходных элементов*. При этом стальная часть конструкции приваривается к стальному слою биметалла, алюминиевая – к слою биметалла из алюминиевого сплава. При таком типе соединения по сравнению с клепаным снижается трудоемкость изготовления разнородных конструкций, улучшаются условия труда при выполнении сборочных работ, повышаются эксплуатационные качества соединений.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

За рубежом наибольшее применение находят переходники из разнородных металлов и сплавов, полученные *сваркой взрывом*, которые представляют собой трехслойную композицию толщиной 35–40 мм следующего состава:

- малоуглеродистая сталь – технически чистый алюминий – алюминиевый сплав (Франция, Польша);
- сталь – титановый сплав – алюминиевый сплав (Япония);
- сталь – алюминиевый сплав – алюминиевый сплав (США) и др.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Зарубежные биметаллические переходники имеют гарантированную прочность сцепления слоев на отрыв и на срез (**70** и **55** МПа соответственно).

Например, при постройке *эсминца* с применением биметаллических переходных элементов масса корпуса благодаря использованию надстроек из алюминиевых сплавов **была снижена на 100 т.**

Биметаллические узлы для соединения алюминиевых и стальных конструкций широко применяются в военном кораблестроении США, Японии.

С начала 80-х годов прошлого века в российском судостроении ведутся работы по внедрению (*взамен клепки*) сварных соединений надстройки из **алюминиевого сплава со стальным корпусом** через *биметаллические переходники*. Выполненный в последние годы комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ позволил создать судостроительный биметалл на основе низнизолегированной стали 10ХСНД (*D40*) и алюминиево-магниевого сплава 1561.

Прочность сцепления слоев такого биметалла на отрыв и на срез составляют не ниже **100** и **55** МПа соответственно.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Дуралюмины широко применяют в авиации:

- из сплава Д1 изготавливают **лопасти воздушных винтов**;
- из Д16 – шпангоуты, нервюры, тяги управления и др.;
- сплав Д18 – один из основных **заклепочных алюминиевых сплавов**;
- высокопрочный сплав В95 использован в бомбардировщике Ту-16, а затем в первом реактивном пассажирском самолете Ту-104 и других самолетах;
- из сплава В93 системы Al-Zn-Mg-Cu, дополнительно легированного небольшим количеством Fe, изготовлен **силовой каркас** транспортного самолета «Антей»;
- разработанный на базе этого сплава путем введения Zr при оптимизации содержания Fe сплав 1933 использован в самолете «Мрия» для изготовления **крупногабаритных поковок и штамповок**.

Ковочные алюминиевые сплавы используют для средненагруженных деталей сложной формы: большие и малые крыльчатки, фитинги, качалки, крепежные детали;

Сплавы с повышенным содержанием меди (АК8) хуже обрабатываются давлением, но более прочны и применяются для высоконагруженных деталей несложной формы: **подмоторные рамы**, пояса **лонжеронов**, **лопасти винтов** вертолетов и др.

Высокопрочные алюминиевые сплавы применяют для высоконагруженных деталей конструкции, работающих в основном в условиях напряжения сжатия (обшивка, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов).

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Литейные сплавы (АЛ32 и др.) применяют для литья под давлением нагруженных деталей: **блоков цилиндров, головок блоков** и других деталей **автомобильных двигателей**.

Сплавы на базе системы **Al-Li** широко применяются как в *гражданской*, так и *военной авиации* и *ракетной технике*. Сплав ВАД23 использован для стабилизаторов ракет малой дальности, в конструкциях самолета Ту-144.

Сплав 1420 применили в клепаной конструкции фюзеляжа самолета вертикального взлета Як-36, *получив выигрыш в массе 16 %*.

Использование его для сварных герметичных баков и кабин пилота истребителя **МиГ-29** позволило получить *снижение массы на 24 %*.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Сплав 1421 широко используется для **корпусов ракет**, изготовления стрингеров фюзеляжа (клепаные и сварные конструкции) самолета Ан-124.

Сплав 1460 используют для сварных криогенных топливных баков космического и авиационного назначения. Использование этого сплава для изготовления сварных баков диаметром до 4,5 м и высотой до 4 м для жидкого кислорода ракеты «Дельта» для вывода на космическую орбиту спутников мировой системы связи **дало снижение массы на 35 %**.

Алюминий, а также деформируемые и литейные сплавы на его основе часто применяются при изготовлении **композиционных материалов** как жидко-, так и твердофазными методами.

Сплавы алюминия в атомной технике

| Марка | Химический состав, % | | | | | | Оптимальная рабочая температура, °С | Механические свойства | | |
|-----------------------------|----------------------|-------------|---------|--------|---------|---|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| | Mg | Si | Fe | Cu | Ni | Другие | | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % |
| АД-1 | ≤ 0,05 | 0,35 | 0,3 | ≤ 0,05 | – | – | 80-90 (max: 100–130) | 95 | 47 | 38 |
| САВ-1 | 0,45–0,9 | 0,7 –1,2 | 0,2 | 0,012 | 0,03 | 012Mn; 0,012Ti; 0,03Zn; 0,00012B | 100–130 | 290 | 245 | 11 |
| 6061 | 1,0 | 0,6 | – | 0,25 | – | 0,025Cr | 80–90 (max: ≤200) | 315 | 270 | 17,5 |
| Жаропрочные сплавы | | | | | | | | | | |
| X8001 | – | 0,1 –0,3 | 0,5 | – | 1,0 | – | 170–200 | | | |
| X8003 | – | 0,003 | 1,5 | – | 1,5 | – | 170–200 | – | – | – |
| A288 | – | 0,003 | 0,5 | – | 1,0 | – | – | – | – | – |
| 1FA-2 | – | 10,0 | 0,5 | – | 1,0 | – | 230-315 | – | – | – |
| 1FA-3 | 0,8–1,0 | 11–12 | 0,3–0,5 | – | 1,0 | 0,1Ti | – | – | – | – |
| Экспериментальный сплав АПН | – | – | 0,3–0,6 | – | 0,9–1,2 | 0,1Ti; (5–7)Al ₂ O ₃ | 250–300 | – | – | – |

Применение алюминиевых сплавов в ЯЭУ

| Тип ЯЭУ | Узел ЯЭУ | Марка сплава |
|---|--|----------------------------|
| ОАЭС | Элементы активной зоны | САВ-1 |
| А-1 – Чехия | Бак, технологические трубы, крышка | САВ-1 |
| РБМК | Оболочки стержней СУЗ, опорные элементы труб | САВ-1; САП |
| Отечественные исследовательские реакторы: МР, ИРТ, ВВР-С, ВВР-М, МИР и др. | Оболочки твэлов, другие элементы активной зоны | САВ; Al-9Si-1Ni-0,1Ti |
| Исследовательские реакторы за рубежом типа <i>BDRAX</i> , <i>EBWR</i> , <i>SL-1</i> | То же | X8001; X8003 |
| Промышленные реакторы | Элементы активной зоны | АД-1; САВ-1; 6061; 1100 |

Спасибо за внимание!