

## Алюминий и его сплавы

Алюминий – светло-серебристый металл, имеющий кристаллическую решетку гранцентрированного куба с периодом 4,0413 Å.

Не испытывает полиморфных превращений.

Алюминий – легкий металл, его удельный вес 2,703 г/см<sup>3</sup> при 20 °С.

В связи с этим алюминий является основой сплавов для легких конструкций, например в авиационной технике.

Алюминий обладает высокой электропроводностью (65% от меди), поэтому алюминий в большом объеме используется в качестве проводниковых материалов в электротехнике.

Чистый алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью в связи с образованием на его поверхности стойкой и плотной окисной пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Это свойство сохраняется и во многих сплавах, содержащих алюминий в виде легирующих элементов.

Примеси, присутствующие в алюминии, понижают его пластичность, электро- и теплопроводность, снижают защитное действие пленки. В технически чистом алюминии в качестве примесей могут находиться, в основном, Fe и Si.

Железо очень мало растворимо в алюминии, и уже при тысячных долях процента при низких температурах появляется новая фаза FeAl<sub>3</sub>.

Эта фаза, как считают в последнее время, является одной из виновниц высокой устойчивости и наследственности литой структуры алюминия и его сплавов, когда дендритное строение можно наблюдать даже после очень больших степеней пластической деформации (50-90%) и последующего рекристаллизационного отжига.

Железо уменьшает электропроводность и химическую стойкость чистого алюминия.

Кремний в алюминии вместе примесями железа образует эвтектику из твердого раствора на основе алюминия и кристаллов  $\text{FeSiAl}_5$ , которая имеет форму китайских иероглифов.

Для нейтрализации вредного влияния железа сплавы легируют марганцем, за счет чего в сплавах формируется соединение  $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ , которое первично кристаллизуется из расплава в виде компактных ограниченных кристаллов, что способствует повышению пластичности, если эти кристаллы достаточно мелкие.

Хром также вводят в силумины для нейтрализации отрицательного влияния железа.

При небольших содержаниях кремния, (до 0,4%) он находится в твердом растворе.

Отжигом можно перевести в твердый раствор до 1,3% Si.

Кремний является менее вредной примесью в алюминии, чем железо, хотя также как и железо, уменьшает пластичность, электропроводность, коррозионную стойкость сплавов.

В больших количествах кремний применяется в сплавах на основе алюминия, как легирующий элемент.

Алюминий и алюминиевые сплавы производят по ГОСТ 11069-74 - Алюминий первичный, [ГОСТ 1583-93](#) - Сплавы алюминиевые литейные, [ГОСТ 4784-74](#) - Алюминий и сплавы алюминиевые, деформируемые.

Литейные алюминиевые сплавы по ГОСТ 1583-93 маркируют буквами и цифрами с указанием среднего химического состава по основным легирующим элементам.

В действующем ГОСТе указана и старая система маркировки – условное обозначение марок, содержащее буквы АЛ.

Все литейные алюминиевые сплавы, указанные в ГОСТ 1583-93, в зависимости от химического состава подразделяют на пять групп:

I группа – сплавы на основе системы Al-Si. В нее входят сплавы марок АК12, АК13, АК9, АК9с, АК9ч, АК9пч, АК8л, АК7, АК7ч, АК7пч, АК10Су.

II группа – сплавы на основе системы Al-Si-Cu. В нее входят сплавы марок АК5М, АК5Мч, АК5М2, АК5М7, АК6М2, АК8М, АК5М4, АК8М3, АК8М3ч, АК9М2, АК12М2, АК12ММгН, АК12М2МгН, АК21М2,5Н2,5.

III группа – сплавы на основе системы Al-Cu. В нее входят сплавы марок АМ5, АМ4,5Кл.

IV группа – сплавы на основе системы Al-Mg. В нее входят сплавы марок АМг4К1,5М, АМг5К, АМг5Мц, АМг6л, АМг6лч, АМг10, АМг10ч, АМг11, АМг7.

V группа – сплавы на основе системы алюминий – прочие компоненты. В нее входят сплавы марок АК7Ц9, АК9Ц6, АЦ4Мг.

Термическую обработку литейных алюминиевых сплавов проводят по режимам: Т1 - искусственное старение без предварительного нагрева под закалку, Т2 - отжиг, Т4 - закалка, Т5 - неполное искусственное старение, Т6 - полное искусственное старение, Т7 - стабилизирующее старение.

Искусственному старению преимущественно подвергают сплавы на основе системы Al-Si.

Обработка по режиму Т1 возможна в тех случаях, когда при ускоренном охлаждении отливки по окончании ее затвердевания, например при литье тонкостенных деталей в кокиль, образуется пересыщенный твердый раствор.

Такая обработка экономически эффективна, но упрочнение при старении невелико, так как из-за дендритной ликвации сердцевина дендритных ячеек имеет низкую концентрацию легирующих элементов.

Обработке по режиму T1 наиболее целесообразно подвергать детали, полученные литьем под давлением.

Такие детали, как правило, нельзя закаливать из-за того, что при нагреве под закалку на их поверхности образуются вспучивания в результате расширения газа, захваченного при литье под давлением.

Отжиг отливок (режим T2) проводят, в основном, для сплавов I группы.

Этот вид термообработки применяют для уменьшения литейных напряжений.

Температура такого отжига около 300°C, выдержка 2...4 ч.

Закалке без последующего искусственного старения (режим T4) подвергают сплавы на основе системы Al-Mg.

Термическую обработку по режиму T4 применяют в тех случаях, когда необходима повышенная пластичность при прочности меньшей, чем после искусственного старения, или же повышенная стойкость против коррозии.

Обработка по режиму T6 включает закалку и полное искусственное старение для достижения максимального упрочнения.

Обработка по режиму T5 состоит из закалки и неполного искусственного старения при температуре более низкой, чем при обработке по режиму T6.

Цель такой обработки - обеспечить повышенную пластичность (по сравнению с обработкой T6).

Термическая обработка по режимам T5 и T6 проводится в основном для сплавов системы Al-Si.

Режим T7 - это закалка и стабилизирующее старение (перестаривание), проводимое при температуре более высокой, чем по режиму T6 для стабилизации свойств и размеров деталей первых трех групп литейных алюминиевых сплавов.

Время выдержки при нагреве под закалку разных сплавов колеблется от 2 до 16 ч.

Отливки закаливают в холодной воде.

Для уменьшения закалочных напряжений воду подогревают до 80...100°C.

Кремний является одним из основных легирующих элементов в литейных алюминиевых сплавах (силуминах).

**Силумины** обычно содержат от 5 до 14% Si, т.е. на несколько процентов больше или меньше эвтектической концентрации.

Эти сплавы обычно имеют грубую игольчатую эвтектику, состоящую из ( $\alpha + \text{Si}$ ), и первичные кристаллы.

Типичным силумином является сплав АЛ2 (АК12) с содержанием 10-13% Si.

В литом состоянии он состоит в основном из эвтектики и некоторого количества избыточных кристаллов кремния.

Механические свойства такого сплава очень низки:  $\sigma_{\text{в}} = 120 - 160$  МПа при относительном удлинении  $\delta < 1\%$  (таблица 1).

Однако эти сплавы обладают очень важными свойствами, которые с трудом удастся достичь в других более прочных сплавах: высокой жидкотекучестью, свариваемостью.

Они имеют малую усадку при литье, в связи с чем становится низкой их склонность к образованию усадочных трещин.

**Силумины**, вследствие малого различия по растворимости кремния при высокой и низкой температуре, практически не упрочняются термической обработкой, поэтому важнейшим методом улучшения его механических свойств является модифицирование.

Модифицирование осуществляется обработкой жидкого силумина небольшими количествами металлического натрия или солями натрия.

При модифицировании происходит значительное измельчение частичек эвтектической смеси, что связывают со способностью натрия обволакивать образовавшиеся зародыши кремния и тормозить их рост.

Кроме того, в процессе модифицирования отмечено некоторое переохлаждение, соответствующее протеканию эвтектического превращения, а эвтектическая концентрация сдвигается вправо.

Таким образом, заэвтектические сплавы, лежащие несколько правее эвтектической точки, после модифицирования оказываются доэвтектическими.

Структура сплава после модифицирования оказывается состоящей из избыточных кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора и очень дисперсной, практически точечной эвтектики.

Таблица 1 - Механические свойства силуминов

Марка сплава	Способ литья	Вид термической обработки	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
			не менее		
АК12(АЛ2)	ЗМ, ВМ, КМ	-	147	4,0	50,0
	К	-	157	2,0	50,0
	Д	-	157	1,0	50,0
	ЗМ, ВМ, КМ	T2	137	4,0	50,0
	К	T2	147	3,0	50,0
	Д	T2	147	2,0	50,0
АК13(АК13)	Д	-	176	1,5	60,0
АК9ч(АЛ4)	З, В, К, Д	-	147	2,0	50,0
	К, Д, ПД	-	147	2,0	50,0
	КМ, ЗМ	T1	196	1,5	60,0
	ЗМ, ВМ	T6	225	3,0	70,0
	К, КМ	T6	235	3,0	70,0
	З	T6	225	2,0	70,0
АК5М(АЛ5)	З, В, К	T1	157	0,5	65,0
	З, В	T5	196	0,5	70,0
	К	T5	216	0,5	70,0
	З, В	T6	225	0,5	70,0
	З, В, К	T7	176	1,0	65,0
	К	T6	235	1,0	70,0
АК8МЗч (ВАЛ8)	К, ПД	T4	343	5,0	90,0
	К, ПД	T5	392	4,0	110
	Д	-	294	2,0	75,0
	Д	T5	343	2,0	90,0
	Д	T2	215	1,5	60,0
	З	T5	345	1,0	90,0
	В	T5	345	2,0	90,0
	З	T7	270	1,0	80,0
	К	T7	295	2,5	85,0
АК12М2МгН (АЛ30)	К	T1	196	0,5	90,0
	К	T6	216	0,7	100,0

Механические свойства после модифицирования АЛ2 (АК12) составляют:  $\sigma_B = 170 - 220$  МПа, при  $\delta = 3 - 12\%$ .

Обладая высокими литейными свойствами, силумины являются основным исходным материалом для создания технологичных и, в то же время, высокопрочных литейных алюминиевых сплавов, которые могут подвергаться упрочняющей термической обработке.

При создании таких сплавов используют дополнительное легирование силуминов с целью образования в структуре силумина новых фаз, способных приводить к упрочнению при термической обработке.

В качестве таких элементов применяют Mg, Cu и Mn.

На основе такого легирования в настоящее время созданы и используются литейные алюминиевые сплавы: АЛ4 (9% Si, 0,25% Mg и около 0,4% Mn) и АЛ5 (5% Si, 1,2 Cu и 0,5% Mg).

Прочность этих сплавов после закалки и старения оказывается выше 200-230 МПа при удлинении  $\delta \geq 2-3\%$ .

Эффект упрочнения сплавов при закалке и старении объясняется образованием при старении зон Гинье - Престона и промежуточных фаз сложного состава, отличающихся по составу и кристаллической решетке от равновесной, например  $Mg_2Si$ , и когерентных с твердым раствором своими кристаллическими решетками.

К литейным сплавам относятся также **медистые сплавы АЛ-19 и ВАЛ10** содержащие 4-5% Cu и 9-11% Cu (таблица 2).

Эти сплавы в связи с более высокой температурой солидуса по сравнению с силуминами, являются более жаропрочными сплавами.

Литейными высокопрочными алюминиевыми сплавами являются **сплавы системы Al-Mg (АЛ-23, АЛ-27)**.

Эти сплавы содержат 6-13% Mg.



Прочность этих сплавов в закаленном и состаренном состоянии может достигать значений 300-450 МПа при  $\delta = 10-25\%$ .

К преимуществам этих сплавов относятся: высокая коррозионная стойкость в атмосферных условиях и при действии морской воды.

Таблица 2 - Механические свойства некоторых литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Способ литья	Вид термической обработки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа
			не менее		
АМ5 (АЛ19)	З, В, К	T4	294	8,0	70,0
	З, В, К	T5	333	4,0	90,0
	З	T7	314	2,0	80,0
АМ4,5Кд (ВАЛ10)	З, В	T4	294	10,0	70,0
	К	T4	314	12,0	80,0
	З, В	T5	392	7,0	90,0
	К	T5	431	8,0	100,0
	З, В	T6	421	4,0	110,0
	К	T6	490	4,0	120,0
	З	T7	323	5,0	90,0
АМг6л (АЛ23)	З, В	-	186	4,0	60,0
	К, Д	-	216	6,0	60,0
	З, К, В	T4	225	6,0	60,0
АМг7 (АЛ29)	Д	-	206	3,0	60,0
АМг10 (АЛ27)	З, К, Д	T4	314	12,0	75,0
АК7Ц9 (АЛ11)	З, В	-	196	2,0	80,0
	К	-	206	1,0	80,0
	Д	-	176	1,0	60,0
	З, В, К	T2	216	2,0	80,0
АК9Ц6 (АК9Ц6р)	З	-	147	0,8	70,0
	К, Д	-	167	0,8	80,0
АЦ4Мг (АЛ24)	З, В	-	216	2,0	60,0
	З, В	T5	265	2,0	70,0

Однако эти сплавы имеют следующие недостатки: повышенная склонность к окислению в жидком состоянии; повышенная чувствительность к примесям Fe, в результате образования нерастворимых соединений Al, Mg с Fe происходит значительное снижение пластичности; повышенная склонность сплавов к хрупкому разрушению при длительном действии внутренних или внешних напряжений на твердый раствор сплава; большая склонность к резкому снижению прочностных характеристик при совместном действии нагрузок и температуры; большая склонность к понижению механических свойств по мере увеличения сечения стенок деталей.

**Деформируемые алюминиевые сплавы (ГОСТ 4784-74)** подразделяются на термически не упрочняемые и термически упрочняемые.

В зависимости от назначения и требований в отношении механических, коррозионных, технологических, физических и других свойств деформируемые сплавы разделяют на сплавы высокой, средней и малой прочности, жаропрочные, криогенные, ковочные, заклепочные, свариваемые, со специальными физическими свойствами, декоративные.

Все применяемые в промышленности сплавы можно также разделить по системам, в которых основные легирующие элементы будут определять типичные для данной системы физические и химические свойства.

Среди термически упрочняемых деформируемых сплавов необходимо выделить следующие основные группы:

- а) Двойные сплавы Al-Cu.
- б) Дуралюмины (на основе Al-Cu-Mg-Mn).
- в) Жаропрочные сплавы (на основе Al-Cu-Mg-Ni).
- г) Высокопрочные сплавы (типа В95 на основе Al-Zn-Mg-Cu-Mn).

К термически не упрочняемым относятся сплавы **Al-Mg** (с небольшим соединением магнием (до 5-6%) (АМг-3, АМг6, АМг5В и т.д.) и марганца (АМц).

Эти сплавы с точки зрения металлографии не представляют большого интереса.

Их структура после пластической деформации и последующего отжига при температуре  $\approx 320-370^{\circ}\text{C}$  для снятия напряжений имеют структуру однофазного (в некоторых случаях несколько пересыщенного) твердого раствора, не выделяющего вторичной фазы.

Эти сплавы обладают высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и пониженной прочностью.

Используется для изготовления деталей глубокой вытяжкой.

В сплаве АМц основным легирующим элементом является марганец.

Марганец имеет довольно высокую растворимость в алюминии при эвтектической температуре  $658^{\circ}\text{C}$  (которая составляет 1,4%Mn), которая резко уменьшается в интервале  $550-450^{\circ}\text{C}$ .

Несмотря на переменную растворимость марганца в алюминии, сплавы термообработкой не упрочняются.

Нагревом до  $640-650^{\circ}\text{C}$  и быстрым охлаждением можно получить пересыщенный твердый раствор марганца в алюминии, который распадается при последующих нагревах.

Однако даже начальные стадии распада твердого раствора не сопровождаются заметным повышением прочности.

Марганец сильно повышает температуру рекристаллизации алюминия, поэтому сплавы отжигают при более высоких температурах, чем алюминий.

Марганец имеет малую скорость диффузии в алюминии, что приводит к образованию аномально пересыщенных твердых растворов и сильно выраженной внутридендритной ликвации.

Марганец, из-за малой скорости диффузии, приводит к получению крупного рекристаллизованного зерна, размер которого можно уменьшить дополнительным легированием титаном.

**Сплавы системы Al-Mn** не являются двойными, примеси железа и кремния, неизбежные в алюминии, делают его многокомпонентным.

Эти примеси сильно уменьшают растворимость марганца в алюминии.

Железо связывается с марганцем с образованием грубых первичных кристаллов тройной фазы  $Al_6(MnFe)$ , которые резко ухудшают литейные и механические свойства сплавов, затрудняют их обработку давлением.

При наличии кремния в сплавах образуется тройная фаза  $T(Al_{10}Mn_2Si)$ , кристаллизующаяся в виде мелких кристаллов кубической формы.

С увеличением содержания железа и кремния повышается пластичность (таблица 3), и уменьшается размер зерна.

Таблица 3 -Типичные механические свойства термически неупрочняемых сплавов

Марка сплава	Состояние	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ ,%	НВ, МПа
АМц	отожженное	130	50	23	300
	полунагартованное	160	130	10	400
АМг2М	отжиг	200	100	23	450
АМг2П	неполный отжиг	250	200	10	600
АМг6М	отжиг	340	170	20	700
АМг6Н	нагартованное	390	300	10	-

Полуфабрикаты из сплавов системы Al-Mg (АМг1, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5, АМг6) имеют относительно небольшие прочностные характеристики, но высокую пластичность, а также отличаются высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью аргонодуговым способом.

Основные компоненты сплавов этой системы – магний и марганец.

В виде небольших добавок используют титан, цирконий, хром, кремний, бериллий.

Растворимость магния в алюминии довольно высока и составляет 17,4%Mg при 450°C и около 1,4%Mg при комнатной температуре.

Увеличение содержания магния приводит к повышению предела прочности и текучести.

Относительное удлинение снижается с увеличением содержания магния до 4%, а затем медленно повышается.

Присутствие магния до 4,5% сохраняет высокую коррозионную стойкость сплавов после любых нагревов.

Присадки марганца и хрома повышают прочностные характеристики основного материала и сварных соединений, а также увеличивается сопротивляемость материала к образованию горячих трещин при сварке и коррозионному разрушению под напряжением.

Титан и цирконий измельчают литую структуру сплава, способствуя образованию более плотного сварного шва.

Бериллий предохраняет сплавы от окисления их в процессе плавки, литья, сварки, а также при технологических нагревах под прокатку, штамповку, прессование и др.

Кремний в количествах от 0,2 до 2% снижает механические свойства, в особенности относительное удлинение, а также уменьшает коррозионную стойкость сплава.

Кремний снижает пластичность при прокатке.

Примеси железа и кремния отрицательно действуют на свойства сплавов, поэтому желательно, чтобы их содержание не превышало 0,5-0,6%.

Двойные сплавы Al-Cu в практике не нашли широкого применения по причине сравнительно низкой прочности.

Однако рассмотрение этих сплавов является необходимым, поскольку на них впервые были обнаружены эффекты упрочнения при старении после закалки.

После отжига структура большинства промышленных сплавов представляет собой сравнительно равноосные зерна  $\alpha$ -твердого раствора с выделением избыточных фаз по границам зерен.

Природа этих избыточных фаз зависит от химического состава сплавов.

В двойных Al-Cu – сплавах избыточной фазой является  $\Theta$ -фаза (соединение  $\text{CuAl}_2$ ).

В сплавах системы **Al-Mg-Si**, избыточной фазой является  $\text{Mg}_2\text{Si}$ .

Высокую прочность и пластичность термически упрочняемые алюминиевые сплавы приобретают в результате закалки и последующего естественного или искусственного старения.

Прочность сплавов после закалки и старения увеличивается по мере усложнения состава упрочняющей фазы.

Выделение только  $\Theta$  фазы в сплавах Al-Cu приводит к сравнительно небольшому упрочнению.

В результате закалки и старения в двойных Al-Cu сплавах удается получить  $\sigma_b \approx 300\text{-}350$  МПа.

В дуралюмине Д1, где наряду с  $\Theta$  фазой, упрочняющей является и S фаза, предел прочности повышается до 420-440 МПа.

В дуралюмине Д16, где основной упрочняющей фазой является S фаза, а роль  $\Theta$ -фазы невелика, упрочнение достигает значений  $\sigma_b > 450$  МПа.

Выделение упрочняющей T-фазы в высокопрочных алюминиевых сплавах типа В95 приводит к повышению  $\sigma_b$  до 600 МПа при  $\delta > 12\%$ .

**Сплавы системы Al-Cu-Mg (дуралюмины)** относятся к группе термически упрочняемых деформируемых сплавов.

Они отличаются высокой прочностью в сочетании с высокой пластичностью, имеют повышенную жаропрочность, поэтому они применяются для работы при повышенных температурах.

Дуралюмины склонны к образованию кристаллизационных трещин и поэтому относятся к категории несваривающихся плавлением сплавов, а также имеют пониженную коррозионную стойкость.

Классическим дуралюмином является сплав Д1.

Сплав Д16 считается дуралюмином повышенной прочности.

Сплавы Д19, ВАД1 и ВД17 являются дуралюминами повышенной жаропрочности, а Д18, В65 с пониженным содержанием легирующих компонентов являются сплавами повышенной пластичности (таблица 4).

В сплавах типа дуралюмин, (на основе системы Al-Cu-Mg) избыточными фазами являются  $\Theta$ -фаза ( $\text{CuAl}_2$ ) и S-фаза ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ).

В данной системе возможно выделение T-фазы ( $\text{CuMg}_4\text{Al}_6$ ), однако содержание меди и магния в промышленных сплавах Al таково, что T-фаза не выделяется.

Помимо меди и магния, в дуралюминах всегда содержится марганец и небольшое количество примесей.

Марганец находится в дуралюминах в виде дисперсных частиц фазы T ( $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$ ), которые положительно влияют на их свойства: повышается температура рекристаллизации, измельчается структура холоднодеформированного материала, повышаются прочностные свойства при комнатной температуре, а также значительно увеличивается жаропрочность.

Кремний (до 0,05%) в сплавах с содержанием магния до 1%, повышает прочностные характеристики при искусственном старении; при более высоком содержании магния (1,5%) прочность понижается.

Кроме того, кремний увеличивает склонность к трещинообразованию при литье и сварке.

Железо понижает пластичность и способствует растрескиванию полуфабрикатов при деформации.



Небольшое количество железа (0,2-0,25%) в присутствии кремния не оказывает отрицательного влияния на механические свойства сплавов, значительно уменьшает склонность к трещинообразованию при литье и сварке.

Таблица 4 - Типичные механические свойства термически упрочняемых сплавов после закалки и старения

Сплав	Полуфабрикаты	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Д1	Листы	400	240	20
	Прессованные прутки и профили	480	320	14
Д16	Листы, плиты	440	330	18
	Прессованные прутки и профили	530	400	11
Д19	Листы	425	310	18
АК4-1	Профиль прессованный	420	350	12
После естественного старения				
АВ	Листы	240	160	20
	Прессованные профили	260	200	15
АД31	Прессованные профили	170	90	22
АД33		250	180	14
АД35		270	200	12
После искусственного старения				
АВ	Листы	330	250	14
	Прессованные профили	380	300	12
АД31	Прессованные профили	240	190	12
АД33		340	280	11
АД35		360	290	11
АК6	Долевое направление испытаний	400	290	12
	Поперечное	370	280	10
	Высотное	360	250	8
АК8	Долевое направление испытаний	480	380	9
	Поперечное	410	300	7
	Высотное	380	280	4
В95	Листы, плиты	540	470	10
	Прессованные профили	600	560	8
В96Ц	Штамповки, трубы	670	640	7
В93	Штамповки	500	470	8

Никель уменьшает пластичность и прочность, улучшает твердость и прочность при повышенных температурах и понижает коэффициент линейного расширения.

Цинк для дуралюминов является вредной примесью, так как увеличивает склонность к трещинообразованию при литье и сварке.

Бериллий в количестве порядка 0,005% предохраняет сплавы от окисления при литье и сварке.

Литий сильно повышает скорость окисления расплавленного алюминия, увеличивает прочность при повышенных температурах, понижает плотность и увеличивает модуль упругости.

Титан применяется для измельчения зерна литого металла, а также значительно уменьшает склонность к трещинообразованию. Небольшое количество бора (0,005-0,01%) измельчает зерно алюминия и его сплавов.

Эффект модифицирования увеличивается в присутствии небольших количеств титана.

**Сплавы системы Al-Cu-Mg** с добавками железа и никеля (АК2, АК4, АК4-1) по назначению относятся к группе жаропрочных материалов.

По своему химическому и фазовому составу они весьма близки к сплавам типа дуралюмин.

Основными упрочняющими фазами при термической обработке этих сплавов, также как и у дуралюминов, служат фазы S и  $\theta$ .

Отличие заключается в том, что вместо марганца в качестве легирующих элементов в значительных количествах содержится железо, никель и кремний.

Сплавы менее легированы по меди.

При добавке железа к сплаву - прочностные свойства резко снижаются, железо образует с медью нерастворимое интерметаллическое соединение  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ , снижающее концентрацию меди в твердом растворе, тем самым уменьшая эффект упрочнения.

Аналогичным образом влияют добавки никеля, который образует практически нерастворимую тройную с медью фазу  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ .

Однако при одновременном введении железа (до 2,5%) и никеля (1,6%) наблюдается резкое повышение прочностных свойств в закаленном и состаренном состоянии, при этом максимальные значения достигаются при содержании железа 1,6%.

При других концентрациях железа и никеля максимальные значения прочностных свойств, обнаруживаются при соотношении железа и никеля, равном примерно 1:1.

Железо и никель образуют тройное соединение  $\text{FeNiAl}_9$ , которое уменьшает возможность образования нерастворимых соединений  $\text{AlCuFe}$  и  $\text{AlCuNi}$ , что увеличивает концентрацию меди в твердом растворе. С увеличением содержания фазы  $\text{FeNiAl}_9$  в сплаве повышается эффект термической обработки.

Фаза  $\text{FeNiAl}_9$  улучшает обычные характеристики механических свойств и жаропрочность сплава.

**Сплавы системы Al-Mg-Si (АД31, АД33, АД35, АВ)** относятся к группе материалов обладающих повышенной пластичностью.

Эти сплавы широко применяют в качестве конструкционных и декоративных материалов, которые, наряду с хорошей пластичностью, обладают комплексом ценных свойств, включая высокую коррозионную стойкость, технологичность, способность подвергаться цветному анодированию и эмалированию.

Эти сплавы легированы в меньшей степени, чем дуралюмины; суммарное содержание легирующих элементов в этих сплавах колеблется в пределах от 1 до 2%.

Упрочняющей фазой во всех сплавах является  $Mg_2Si$ , поэтому степень упрочнения при старении находится в прямой зависимости от количества этой фазы.

С увеличением содержания кремния до 1,6%, при постоянном содержании магния, предел прочности растет, а затем практически не изменяется или несколько снижается к 2%Si.

С увеличением концентрации магния, при постоянном содержании кремния, предел прочности растет и достигает максимума при 1,2-1,4%, а затем снижается к 2%Mg.

Повышение содержания магния и кремния приводит к измельчению структуры.

С повышением содержания кремния улучшаются литейные свойства и свариваемость сплавов.

Коррозионная стойкость снижается с ростом содержания фазы  $Mg_2Si$  и Si.

**Сплавы системы Al-Mg-Si-Cu (AK6, AK6-1, AK8)** являются авиалами повышенной прочности и относятся к группе ковочных материалов.

Они отличаются от обычных авиалаей повышенным содержанием меди.

Упрочняющими фазами являются фазы  $W(AlCu_4Mg_5Si_4)$ ,  $CuAl_2$ ,  $Mg_2Si$ .

Увеличение содержания меди монотонно повышает предел прочности при комнатной и повышенных температурах, пластичность достигает максимума при концентрации меди 2,2% (см. таблицу 4).

## **Сплавы системы Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu (B95, B96, B96ц, B93)**

относятся к группе высокопрочных сплавов.

Характерным для данного класса сплавов является образование сложной по составу T-фазы.

Выделение ее по границам зерен приводит к снижению их механических свойств (к охрупчиванию сплавов).

Характерная особенность сплавов – высокий предел текучести, близкий по своему значению к пределу прочности материала, и пониженная пластичность (см. таблицу 4).

Сплавы отличаются чувствительностью к надрезам и перекосам, характеризуются пониженной выносливостью при повторно-статических нагрузениях, а также чувствительны к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Уменьшение содержания примесей железа и кремния способствует повышению пластичности, ударной вязкости, статической выносливости, а также резко снижает чувствительность к надрезу образцов при перекосах.

По мере увеличения содержания магния, цинка и меди в сплавах, предел прочности сплавов Al-Zn-Mg в отожженном состоянии непрерывно повышается.

Хром, в этих сплавах, эффективно повышает стойкость сплавов против коррозии под напряжением.

Цирконий при кристаллизации образует с алюминием пересыщенный твердый раствор, который распадается, при последующей обработке слитка, с выделением дисперсных интерметаллидов.

Цирконий более интенсивно, чем другие переходные металлы, повышает температуру рекристаллизации, приводит к сохранению нерекристаллизованной структуры в горячедеформированных изделиях после термообработки и тем самым обуславливает значительное структурное упрочнение.