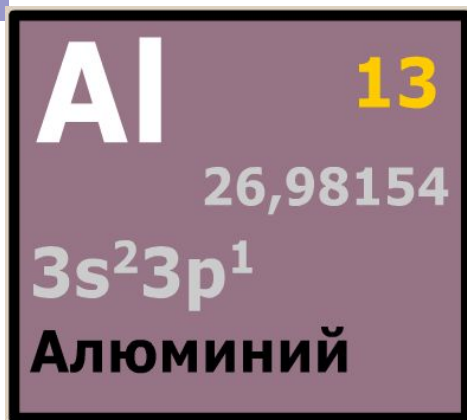




Материаловедение

«Алюминиевые сплавы»



Алюминий – металл серебристо-белого цвета, имеет ГЦК решетку, полиморфных превращений не имеет. Плотность – $2,7 \text{ г/см}^3$, $T_{\text{пл.}} = 660 \text{ }^\circ\text{C}$. Характеризуется высокой электро- и теплопроводностью, высокой пластичностью и малой прочностью. Механические свойства: $\sigma_{\text{в}} = 60 \dots 80 \text{ МПа}$, $\delta = 40 \dots 50 \%$, $E = 70 \text{ ГПа}$, где $\sigma_{\text{в}}$ -предельные напряжения, δ -относительное удлинение, E –модуль упругой деформации. Алюминий обладает хорошей коррозионной стойкостью из-за плотной оксидной пленки Al_2O_3 .

Первичный Al выпускается трех сортов: особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995...А95) и технической чистоты (А85...А0). Например, алюминий марки А995 содержит не менее 99,995 % Al, марки А6 – 99,6 % Al, марки А0 – 99,0 % Al.

Технический Al выпускается в виде листов, проволоки, прутков, труб, которые применяются в отожженном (М), полунагартованном (Н2) или нагартованном (Н), горячекатаном (ГК) состояниях. Механические свойства в состоянии М составляют $\sigma_{\text{в}} = 60 \text{ МПа}$, $\delta = 20 \dots 28 \%$, в состоянии Н – $\sigma_{\text{в}} = 130 \dots 145 \text{ МПа}$, $\delta = 3 \dots 5 \%$ и в состоянии ГК – $\sigma_{\text{в}} = 70 \text{ МПа}$, $\delta = 15 \%$.

Нахождение в природе

Алюминий входит в состав около 250 различных минералов. Самыми распространенными являются полевые шпаты, нефелины, бокситы, глины, в состав которых входит оксид алюминия, являющиеся алюмосиликатами.

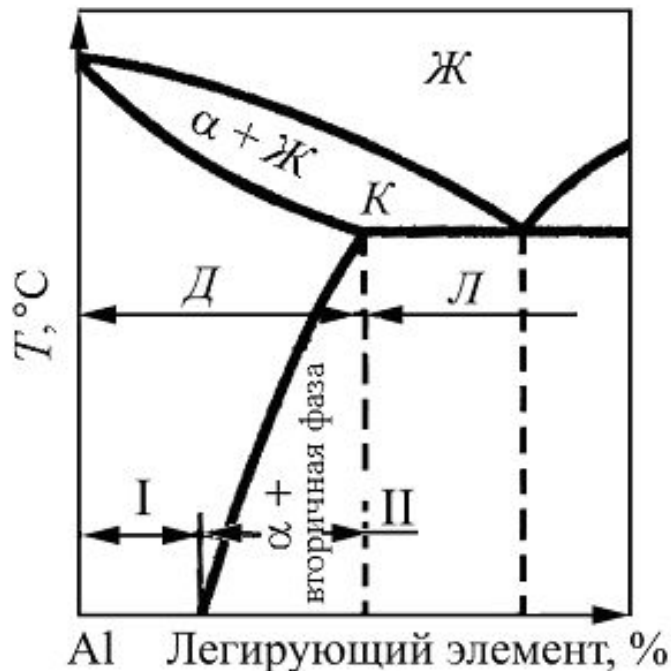


Классификация алюминиевых сплавов

Основные легирующие элементы: Cu, Zn, Mg, Mn, Zr.

По способу производства алюминиевые сплавы делятся на : *деформируемые, литейные* и *порошковые*.

По способности к упрочнению термической обработкой алюминиевые сплавы подразделяются на *неупрочняемые термообработкой* и *упрочняемые термообработкой*.



В зависимости от уровня прочности, технологических свойств и назначения алюминиевые сплавы разделяют на сплавы *высокой, средней и пониженной прочности; ковочные, заклепочные, свариваемые; коррозионностойкие, жаропрочные, криогенные, со специальными физическими свойствами* (например, пониженной плотности) и др.

Маркировка алюминиевых сплавов

Для отечественных алюминиевых сплавов используются *буквенно-цифровая* и *цифровая* системы обозначений. Буквы могут обозначать Al и основной легирующий компонент – AlMn (Al – Mn), AlMg1 (Al – Mg), AlMg2 (Al – Mg), назначение сплава (АК6, АК4–1 – алюминий ковочный), название сплава (АВ – авиаль, Д16 – дуралюминий), могут быть связаны с названием института, разработавшего сплав (ВАД1, ВАД23 – ВИАМ, алюминиевый, деформируемый) и т.д.

Цифровая маркировка. Первая цифра обозначает основу сплава. Al – «1». Вторая цифра обозначает основной легирующий компонент. «0» – спеченные алюминиевые сплавы (САС). «1» – сплавы на основе системы Al–Cu–Mg; «2» – сплавы на основе системы Al–Cu; «3» – сплавы на основе системы Al–Mg–Si; «4» – сплавы на основе системы Al–Li, а также сплавы, легированные малорастворимыми компонентами, (марганец, хром, цирконий); «5» – сплавы системы Al–Mg (магналии); «9» – сплавы на основе систем Al–Zn–Mg или Al–Zn–Mg–Cu обозначаются цифрой. Цифры «6», «7» и «8» – резервные.

Последние две цифры в цифровом обозначении алюминиевого сплава – порядковый номер. Последняя цифра несет дополнительную информацию: сплавы, оканчивающиеся на *нечетную цифру* – *деформируемые*, на *четную* – *литейные*.

Если сплав опытный, то перед маркой ставят цифру «0» (01570, 01970) и маркировка становится пятизначной.

Цифровая маркировка деформируемых алюминиевых сплавов

Марка	Группа сплавов, основная система легирования
1000–1018	Технический алюминий
1019, 1029 и т.д.	Порошковые сплавы
1020–1025	Пеноалюминий
1100–1190	Al – Cu – Mg, Al – Cu – Mg – Fe – Ni
1200–1290	Al – Cu – Mn, Al – Cu – Li – Mn – Cd
1300–1390	Al – Mg – Si, Al – Mg – Si – Cu
1319, 1329 и т.д.	Al – Si, порошковые сплавы САС
1400–1419	Al – Mn, Al – Be – Mg
1420–1490	Al – Li
1500–1590	Al – Mg
1900–1990	Al – Zn – Mg, Al – Zn – Mg – Cu

Деформируемые алюминиевые сплавы

Нетермоупрочняемые сплавы. К этим сплавам относятся сплавы алюминия с марганцем или магнием. Структура этих сплавов после медленного охлаждения состоит только из α -твердого раствора марганца или магния в алюминии. Никаких структурных изменений в этих сплавах при нагревании и охлаждении не происходит, поэтому применение термической обработки с целью повышения прочности невозможно. **Упрочнение** этих сплавов возможно только **за счет холодной пластической деформации**, т.е. наклепа (нагартовки).

Эти сплавы легко обрабатываются давлением, хорошо свариваются и имеют высокую коррозионную стойкость. Имеют сравнительно невысокую прочность и твердость, хорошую пластичность. Их применяют для изготовления изделий, испытывающих небольшие нагрузки.

Марка	Химический состав, %			Механические свойства		
	Al	Mn	Mg	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АМц	осн.	1,0...1,6	–	130(170)	50(130)	23(10)
АМг2	осн.	0,2...0,6	1,8...2,8	200(250)	100(200)	23(10)
АМг3	осн.	0,3...0,6	3,2...3,8	220	110	20
АМг5	осн.	0,3...0,6	4,8...5,8	300	150	20
АМг6	осн.	0,5...0,8	5,8...6,8	340(400)	170(300)	18(10)

Термоупрочняемые сплавы. Сплавы: *дуралюмины, высокопрочные, ковочные и жаропрочные алюминиевые сплавы.*

Дуралюмины. Дуралюминами называют сплавы на основе Al и Cu, которые содержат также Mg и Mn, а в качестве примесей – Fe и Si. Наибольшее практическое применение имеют марки дуралюмина Д1 и Д16.

Для упрочнения дуралюминов проводят закалку и старение. Закалка состоит в нагреве сплавов до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или почти полностью растворяются в алюминии (выше линии сольвус) и в быстром охлаждении. После такой обработки фиксируется пересыщенный α -твердый раствор.

Пересыщенный α -твердый раствор неустойчив и из него самопроизвольно начинает выделяться избыточная мелкодисперсная интерметаллическая фаза $CuAl_2$, что придает дуралюмину повышенную твердость и прочность. Этот процесс называется *старением*.

Марка	Химический состав, %				Механические свойства		
	Al	Cu	Mg	Mn	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Д1	осн.	3,8...4,8	0,4...0,8	0,4...0,8	490	320	14
Д16	осн.	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	540	400	11

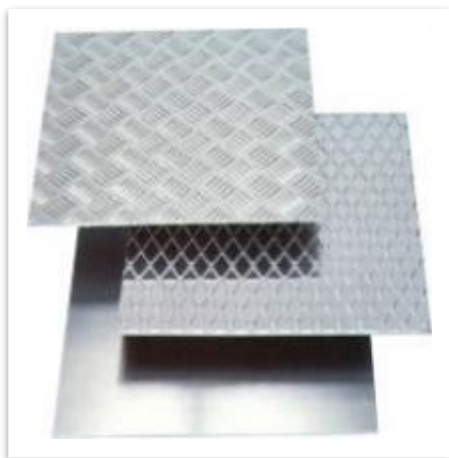
Удельная прочность дуралюмина после закалки и старения близка к удельной прочности легированной стали.

Легкий сплав «дюраль» используется в различных областях

Дюраль или дюралюминий — сплав алюминия, основными легирующими (добавочными) металлами которого являются медь (4,4% массы), магний (1,5%) и марганец (0,5%).



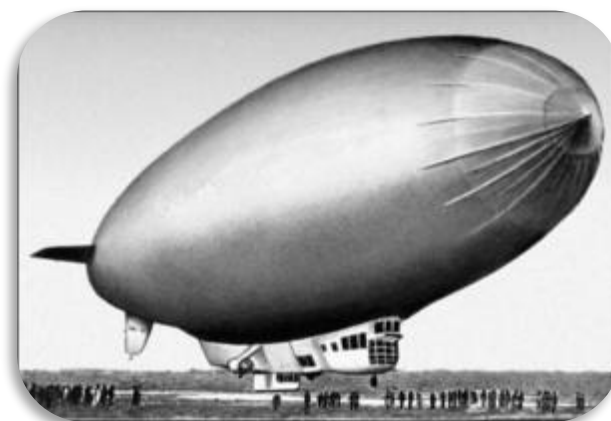
*В авиации
В космической
технике
В электротехнике
В судостроении
В строительстве
В транспорте
В быту*



Первое применение дюралюминия — изготовление каркаса дирижаблей жесткой конструкции.

Один из распространенных теперь сплавов был получен в промышленных масштабах в 1911 году в немецком городе Дюрене.

Новый сплав, названный в честь города дюралюминием, вскоре



Дюраль - долговечный, высокопрочный и легкий, устойчивый к коррозии, деформации и воздействиям внешней среды, эстетичный и простой в обслуживании, поэтому он является одним из самых востребованных сплавов в современной промышленности.

Высокопрочные алюминиевые сплавы. Главными легирующими элементами высокопрочных алюминиевых сплавов являются магний, медь, марганец и цинк. Наибольшее распространение среди высокопрочных алюминиевых сплавов имеет сплав В95 (Al – основа, 1,4...2,0 % Cu; 1,8...2,8 % Mg; 0,2...0,6 % Mn; 5...7 % Zn, 0,1...0,25 % Cr). Механические свойства: $\sigma_B = 560...600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 530...550$ МПа, $\delta = 8$ % (после закалки и старения).


Упрочняющими фазами в этих сплавах являются соединения $MgZn_2$, $Al_2Mg_3Zn_3$, Al_2CuMg . Чем выше содержание цинка и магния, тем выше прочность этих сплавов, но пластичность и коррозионная стойкость уменьшаются. Повысить коррозионную стойкость можно путем добавления в сплав марганца и хрома. С целью повышения прочности эти сплавы подвергают закалке (460...470 °С) и искусственному старению (135...145 °С в течение 16 ч). По сравнению с дуралюминами высокопрочные сплавы обладают большей чувствительностью к концентраторам напряжений, меньшим пределом выносливости и вязкостью разрушения.

Сплавы обладают хорошей пластичностью в горячем состоянии и сравнительно легко деформируются в холодном состоянии после отжига. Их применяют в самолетостроении для наружных конструкций, работающих длительное время при температурах 100...120 °С, например, обшивка, шпангоуты, стрингеры и т.д.

Жаропрочные сплавы. Для получения необходимых жаропрочных свойств их легируют не только медью и магнием, но и железом, никелем и титаном. Упрочняющими фазами жаропрочных сплавов являются CuAl_2 , Al_2CuMg , Al_9FeNi и Al_6CuNi . После закалки и старения при частичном распаде твердого раствора эти фазы выделяются в виде дисперсных частиц, которые значительно повышают жаропрочность сплавов.

Марка	Химический состав, %	Механические свойства		
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АК4-1	Al – осн.; 1,9...2,5 % Cu; 1,4...1,8 % Mg; 0,35 % Si; 0,8...1,4 % Fe; 0,8...1,4 % Ni; 0,02...0,1 % Ti	430	280	13
Д20	Al – осн.; 6...7 % Cu; 0,4...0,8 % Mn; 0,1...0,2 % Ti	400	250	12

Жаропрочные алюминиевые сплавы используют для изготовления деталей, работающих при температурах до 300 °С (поршни двигателей внутреннего сгорания, детали турбореактивных двигателей и т.д.).



Сплавы дляковки и штамповки. Данные алюминиевые сплавы обладают высокой пластичностью и удовлетворительными литейными свойствами. К ним относятся сплавы АК6, АК8. Основными легирующими элементами являются медь, магний, марганец и кремний. Ковку и штамповку сплавов проводят при температуре ~ 450 °С. Для повышения прочности проводят термическую обработку, состоящую из закалки и искусственного старения. Упрочняющими фазами при старении являются Mg_2Si , $CuAl_2$, $Al_xMg_5CuSi_4$. Эти сплавы хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются контактной и аргодуговой сваркой. Литейные свойства улучшаются за счет добавки кремния. Однако эти сплавы склонны к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. Используют их для изготовления крепежных деталей, лопастей винтов вертолета и т.д.

Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, сравнительно небольшой усадкой, малой склонностью к образованию горячих трещин и пор, хорошими механическими свойствами.

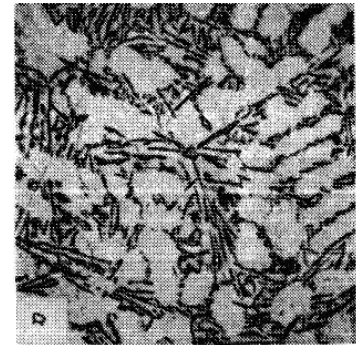
В качестве литейных сплавов применяют сплавы систем Al – Si, Al – Cu, Al – Mg. Маркируются эти сплавы буквами АЛ и далее стоит цифра, которая соответствует порядковому номеру из ГОСТа, например, АЛ2, АЛ4 и т.д.

Силумины. Сплавы Al – Si называют **силуминами**. Они обладают высокими литейными свойствами.

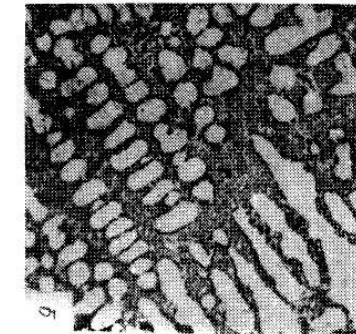
Наибольшее распространение получил сплав АЛ2. Si выделяется в виде крупных кристаллов игольчатой формы. Сплав с такой структурой обладает плохими механическими свойствами. Для измельчения структуры силумины подвергают модифицированию (вводят NaF и NaCl). Сплав АЛ2 не подвергают упрочняющей термической обработке.

Сплавы АЛ4 и АЛ9 дополнительно легируют Mg и подвергают упрочнению термической обработкой (закалка + искусственное старение), при этом в 2 раза повышается предел прочности. Упрочняющей фазой служит Mg_2Si .

Силумины легко обрабатываются резанием, свариваются. Их используют для изготовления различных корпусов, блоков цилиндров двигателей и т.д.



а)



б)


а - немодифицированный силумин имеет грубую игольчатую структуру и очень хрупок; **б** - после модифицирования становится мелкозернистой, в результате чего сплав приобретает пластичность

Сплавы, получаемые методом порошковой металлургии. Две группы:

САП – спеченные Al порошки, САС – спеченные Al сплавы.

Спеченные алюминиевые порошки (САП). Используют алюминиевую пудру и мелкодисперсную Al_2O_3 , которые перемешивают, засыпают в пресс-формы и прессуют, проводят спекание при 600 °С. Они имеют хорошую жаропрочность, прочность, высокую коррозионную стойкость, хорошую тепло- и электропроводность, высокое сопротивление истиранию. Свойства изделий из САП зависят от содержания Al_2O_3 и степени дисперсности алюминиевой пудры. САП применяют вместо нержавеющей сталей для изготовления деталей в малонагруженных конструкциях, эксплуатируемых при температурах 300...500 °С (кратковременно до 1000 °С).

Марка	Полуфабрикат	Темп. исп., °С	Кол-во Al_2O_3 , %	Механические свойства		
				σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
САП-1	Прутки, полосы	20	6...9	260...300	200...240	8...12
		300		160...180	120...140	3...7
		500		50...70	50...60	2...6
САП-2	Прутки, полосы	20	9...13	320...360	210...250	6...8
		300		170...180	150...160	4...6
		500		80...90	80...90	2...3
САП-3	Прутки, полосы	20	13...18	380...450	320...360	3...6
		300		190...210	140...160	4...7



Спеченные алюминиевые сплавы (САС). Сплавы состоят из спеченного легированного алюминиевого порошка или гранул. В зависимости от легирующих компонентов САС подразделяются на три группы.

Первая группа содержит Mn, Cr, Zr, Ti. В результате технологических нагревов под горячее прессование и экструзию (обработка давлением) они распадаются с выделением дисперсных интерметаллидных фаз, что приводит к повышению прочности.

Вторая группа САС легирована Fe, Ni и Co. Большая скорость охлаждения частиц порошка обеспечивает образование гетерогенной структуры, т.е. дисперсные интерметаллидные фазы равномерно распределены в матрице.

Третью группу САС составляют гранулированные сплавы, полученные из алюминиевых сплавов, содержащих Pb, Sn, Cd.

Полуфабрикаты из САС получают, нагревая сначала порошки и гранулы в алюминиевой оболочке, а затем подвергая горячему прессованию и экструзии. Для сплавов первой и второй групп этот процесс проводится при температуре 400...500 °С, что обеспечивает создание и сохранение необходимой структуры и получение требуемых свойств.

Применяют САС для деталей, работающих в паре со сталью при температуре 20..200 °С, которые требуют сочетания низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности, а также в приборостроении, когда путем литья и обработки давлением трудно получить соответствующий сплав.

Новые сверхлегкие сплавы

Сплавы системы Al – Li имеют высокую удельную прочность с высоким удельным модулем упругости, они резко снижают вес конструкций самолета. Каждый процент содержания лития в Al – Li сплаве снижает его плотность на 3 % и повышает модуль упругости на 6 %. Плотность таких сплавов составляет 2,54...2,56 г/см³.

Впервые сплавы системы Al – Cu – Li были разработаны более 25 лет назад у нас в стране (сплав ВАД23) и за рубежом (сплав 2020) с низким содержанием лития (1,1 %), имевшие по сравнению с высокопрочными алюминиевыми сплавами более высокую удельную прочность и жесткость.

В настоящее время разработаны новые сплавы этой системы. Сплав 1420 (содержит 0,1...2 % Li) – самый легкий алюминиевый сплав, его плотность 2,5 г/см³. Модуль упругости сплава – 76000 МПа в отличие от модуля упругости традиционных сплавов типа Д16, равного 72000 МПа. Применение сплава 1420 вместо сплава Д16 в конструкциях снижает массу от 13 % до 20 %.

Сплав 1420 обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью. Он сваривается всеми видами сварки. Прочность сварного соединения составляет 84 % от прочности основного материала. Повторная термическая обработка сплава после сварки дает 100 %-ную прочность. Сплав 1420 закалывают с 450 °С охлаждением в воде или на воздухе с последующим искусственным старением при 120 °С в течение 12 ч. Закалка с охлаждением на воздухе обеспечивает высокую коррозионную стойкость, закалка в воде – получение более высоких характеристик пластичности.