

В. М. Мальцев

**Металлография
промышленных цветных
металлов и сплавов**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
В11

В11 **В. М. Мальцев**
Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / В. М. Мальцев –
М.: Книга по Требованию, 2012. – 366 с.

ISBN 978-5-458-46776-6

ISBN 978-5-458-46776-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

§ 1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

Алюминий один из важнейших промышленных металлов. Обладая комплексом ценных физико-химических свойств, он широко применяется в чистом виде и является основой многих промышленных легких сплавов. Ниже приведены важнейшие физические свойства алюминия.

Атомный вес	26 9825
Атомный радиус, А	1 43
Атомный объем, $\text{см}^3/\text{г-атом}$	10 0
Кристаллическая решетка	г.ц.к.
Период решетки, А	4 0413
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	2,71
Температура плавления, °С	660 24 (для алюминия чистотой 99,996%), 658 (для технического алюминия чистотой 99 5%)
Температура кипения, °С	2450
Скрытая теплота плавления, $\text{кал}/\text{г}$	96
Скрытая теплота испарения, $\text{кал}/\text{г}$	3050
Удельная теплоемкость, $\text{ккал}/(\text{г град})$ при температуре, °С:	
20	0,214
700	0,308
Теплопроводность при 25°С, $\text{кал}/\text{см сек град}$	0 503
Коэффициент линейного расширения, $1/\text{град}$, при температуре, °С:	
20—100	23,86
20—200	24,7
20—300	25,6
Удельное электросопротивление при 20°С, мком см	2,66
Ионизационный потенциал, эв	5 94
Поперечное сечение захвата тепловых нейтронов, $\text{барн}/\text{атом}$	0 23

В промышленности выпускают алюминий различной чистоты. Промышленные сорта алюминия и их назначение даны в табл. 1

Таблица 1

Промышленные марки алюминия (ГОСТ 3549—58)

Марка	Химический состав, %						Примерное назначение
	Al	примесей, не более				всего приме- сей	
		Fe	Si	Fe + Si	Cu		
AV0000	99 996	0,0015	0,0015		0 0010	0,004	Для исследовательских и других специальных це- лей
AV000	99 99	0,0030	0 0025		0 0050	0 010	
AV00	99 97	0 015	0 015		0 0050	0 03	
AV0	99 93	0 04	0 04		0 01	0 07	
A00	99 7	0 16	0 16	0 26	0 01	0 30	Для фольги: для осо- бых случаев плакировки кабельных и токопроводя- щих изделий, алюмиение- вых сплавов специального назначения и в химиче- ской промышленности
A0	99 6	0 25	0 20	0 36	0 01	0 40	
A1	99 5	0 30	0 30	0 45	0 015	0 50	Для токопроводящих изделий, алюминиевых сплавов, плакировки, фо- льги, красочной пудры и посуды
A2	99 0	0 50	0 50	0 90	0 02	1 0	Для сплавов на алю- миниевой и других осно- вах, алюминиевой посуды, кабельных и токопрово- дящих изделий и специ- альных лигатур
A3	98,0	1 1	1 0	1 80	0 05	2 0	Для подшихтовки алю- миниевых сплавов, для лигатур, алюминотермии и изделий широкого потреб- ления

В зависимости от содержания примесей он имеет различную структуру, физико-химические и механические свойства [1]. Чистейший алюминий (AV0000, AV000) при кристаллизации дает крупное зерно с ярко выраженной направленностью в структуре.

На рис. 1 атласа показана структура слитка алюминия высокой чистоты (99,99% Al), отлитого полунепрерывным методом.

Образование крупнозернистой ориентированной структуры в слитках является причиной возникновения межкристаллитных трещин при литье и обработке и порождает анизотропию свойств в литом металле. Для получения равномерной мелкозернистой структуры в слитках и отливках было предложено [2] вводить в алюминий и его сплавы микродобавки тугоплавких элементов — тантала, титана, циркония, бора и др. Эффект воз-

действия некоторых из этих добавок на величину зерна литого металла показан на рис. 1 и 2.

Резкое измельчение зерна, по данным работ [2, 3], связано с образованием в расплаве частиц тугоплавких металлических соединений алюминия с вводимыми добавками ($TaAl_3$, $TiAl_3$, $ZrAl_3$ и др.), которые играют роль зародышевых центров при кристаллизации зерна алюминия. Кристаллизация из многих центров, искусственно созданных в расплаве, приводит к образованию мелкозернистой структуры в слитках.

Формирование отдельных дендритных зерен алюминия на частицах указанных соединений (на примере добавок титана показано на рис. 3, а.

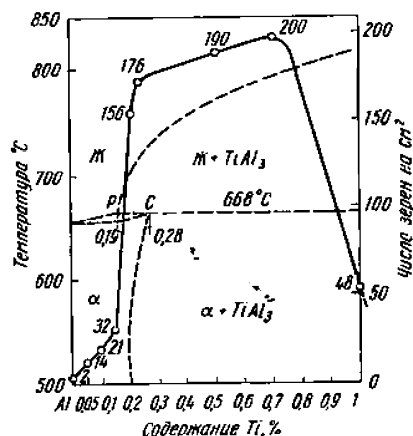


Рис. 1. Влияние титана на размер зерна алюминия высокой чистоты (99,99% Al) [3]

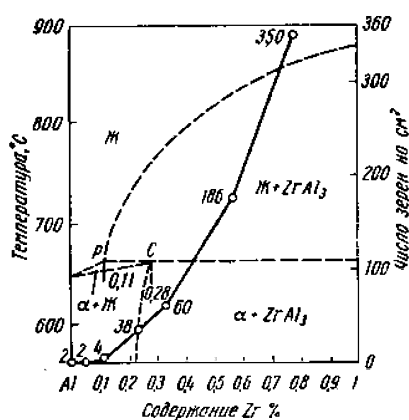


Рис. 2. Влияние циркония на размер зерна алюминия высокой чистоты (99,99% Al) [3]

Однако как было показано в работах [3, 4], не всякая тугоплавкая частица, созданная в расплаве, может являться центром кристаллизации.

Зародышами «затравками») для кристаллизации алюминия могут быть частицы, имеющие более высокую температуру плавления, чем сам алюминий, и обладающие с ним определенным структурным сходством.

Степень структурного и размерного соответствия решеток тугоплавких соединений и решетки алюминия в сопрягаемых гранях определяют интенсивность модифицирующего воздействия отдельных добавок.

Указанные условия хорошо выполняются для частиц металлических соединений $TaAl_3$ и $TiAl_3$, которые являются наиболее эффективными модификаторами алюминия.

Частицы тугоплавких соединений например, Cr_2Al_7), не удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, не могут

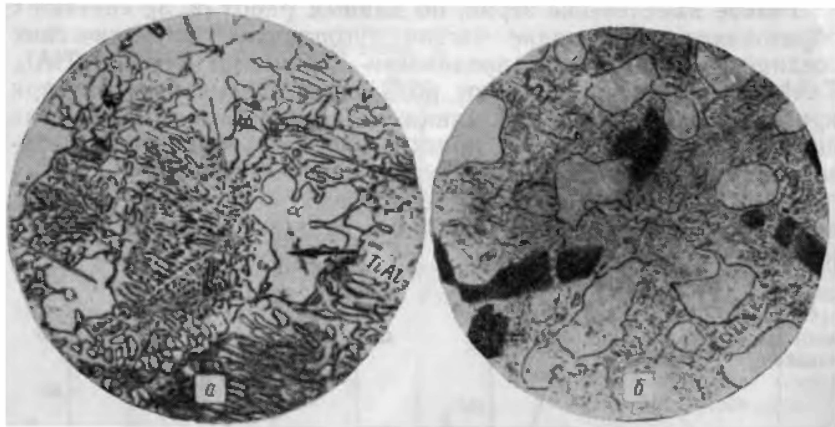


Рис. 3. Микроструктура сплавов алюминия. Травлено 0,5%-ной HF $\times 600$:
а — сплав 25% Cu, 0,5% Ti; б — сплав 25% Cu, 0,5% Cr ост. Al

служить базой для формирования зерен алюминия и они располагаются обособленно, вне зерен алюминия (рис. 3, б)

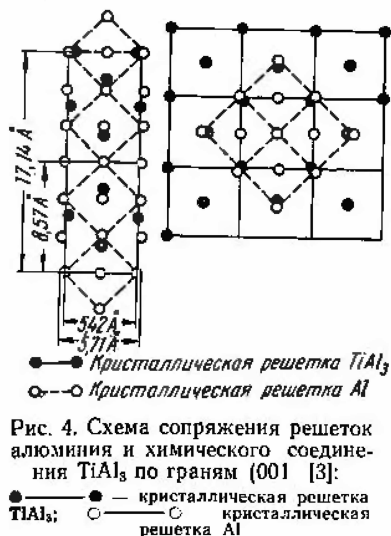


Рис. 4. Схема сопряжения решеток алюминия и химического соединения TiAl_3 по граням (001) [3]:

● — кристаллическая решетка TiAl_3 ; ○ — кристаллическая решетка Al

На рис. 4 показана схема сопряжения решеток алюминия и соединения TiAl_3 по плоскости (001 (грань куба из которой видно, что пристройка атомов алюминия возможна без существенного нарушения поля решетки соединения TiAl_3 . Описанный выше способ искусственного изменения (модифицирования) структуры литого алюминия и его сплавов в настоящее время получил широкое применение в промышленности.

Чистый алюминий марок АВ0000 и АВ000 практически не содержит примесей и имеет чистые границы.

Микроструктура алюминия высокой чистоты (99,99% Al) при обычном и большом увеличении

показана на рис. 2 атласа. Сопутствующие алюминию примеси (железо, кремний и др.) оказывают существенное влияние на его структуру, образуя различные соединения, отлагающиеся на границах зерен и внутри них.

Железо и алюминий образуют химическое соединение FeAl_3 , которое с ним дает эвтектику, содержащую около 1,82% Fe. Диаграмма состояния Al-Fe приведена на рис. 5.

Растворимость железа в твердом алюминии при температуре эвтектики 655°C составляет около 0,05% и при 400°C 0,003 0,005%. Таким образом, уже при ничтожных содержаниях железа $> 0,05\%$ по границам зерен алюминия появляется эвтектика, состоящая из алюминия и иглообразных кристаллов соединения FeAl_3 (рис. 3 атласа)

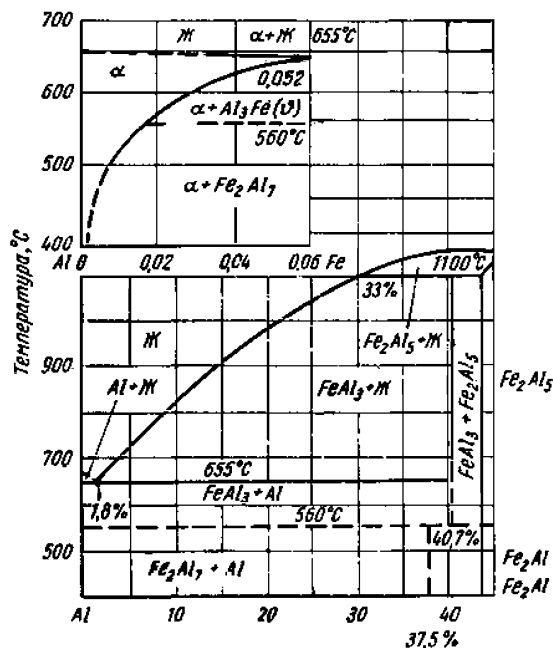


Рис. 5. Диаграмма состояния Al-Fe

Соединение FeAl_3 хрупкое и снижает пластичность алюминия.

Кремний, так же как железо, с алюминием образует диаграмму состояния эвтектического типа (рис. 6)

Растворимость кремния в алюминии при эвтектической температуре составляет 1,65%, при комнатной температуре 0,05%. При содержании кремния выше 0,05% в структуре алюминия по границам зерен появляются выделения хрупкого кремния в виде иглообразных кристаллов, подобно железосодержащей фазе.

В технических сортах алюминия железо и кремний как примеси присутствуют одновременно. Поэтому их влияние на струк-

туру можно правильно оценить, пользуясь тройной диаграммой состояния Al-Fe-Si.

На рис. 7 показана проекция поверхностей ликвидуса этой системы. Согласно рис. 7, из жидкости в зависимости от содер

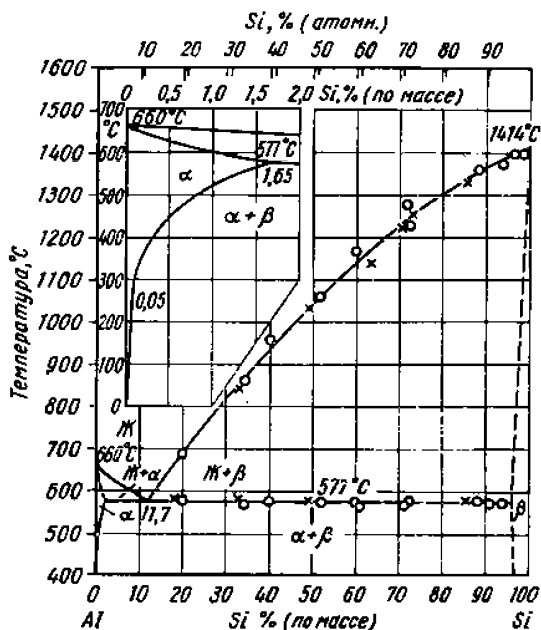


Рис. 6. Диаграмма состояния Al-Si

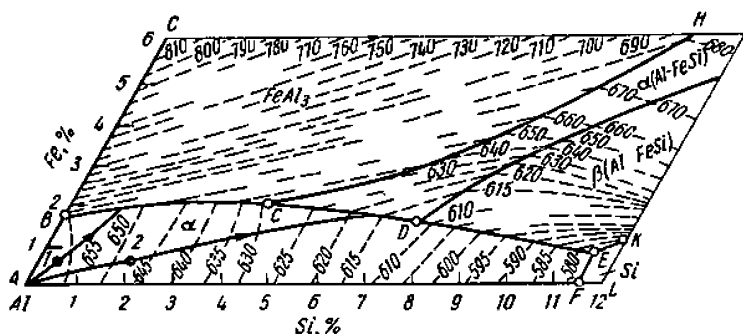
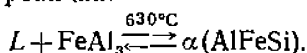


Рис. 7. Проекция поверхностей ликвидуса системы Al-Fe-Si

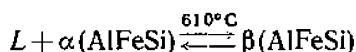
жания кремния и железа могут выпадать кристаллы алюминия, вернее, твердого раствора кремния и железа в алюминии, двойного химического соединения FeAl_3 и два тройных соединения, обозначенные α (AlFeSi) и β (AlFeSi). Фаза α (AlFeSi)

может непосредственно кристаллизоваться из жидкости при больших содержаниях железа и кремния или образовываться по перитектической реакции.



Эта фаза выделяется обычно в форме скелетообразных кристаллов и имеет тетрагональную решетку с периодами $a = b = 6,0 \text{ \AA}$ и $c = 9,46 \text{ \AA}$.

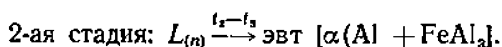
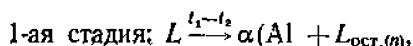
Фаза β (AlFeSi) образуется также по перитектической реакции



или выделяется непосредственно из жидкости в форме пластин и иглообразных кристаллов. Фаза β (AlFeSi) имеет ромбическую решетку с периодами $a = b = 6 \text{ \AA}$, $c = 43,4 \text{ \AA}$.

При малых концентрациях примесей кремния и железа как это имеет место в техническом алюминии по границам зерен алюминия образуются иглообразные кристаллы FeAl_3 (см. рис. 3 атласа), которые выделяются из расплава как составляющие эвтектики $\alpha(\text{Al}) + \text{FeAl}_3$.

Кристаллизация таких сплавов (например, сплава 1 на рис. 7) протекает в две стадии.



При определенных соотношениях между железом и кремнием (например, сплав 2 на рис. 7) может образоваться эвтектика $\alpha(\text{Al}) + \alpha(\text{AlFeSi})$. Такая эвтектика, имеющая скелетообразное строение, показана на рис. 4 атласа.

Все указанные железосодержащие фазы снижают пластичность алюминия.

Вредное влияние железа можно в значительной степени парализовать введением небольших добавок марганца, хрома и других металлов. Подробно эти вопросы будут рассмотрены ниже.

Технический алюминий имеет малую прочность, но высокую пластичность. Ввиду низкой прочности применение алюминия как конструкционного материала ограничено.

Прокатанный и отожженный алюминий имеет $\sigma_b = 8 \div 10 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{0,2} = 3 \div 4 \text{ кг/мм}^2$, $HB = 25 \div 30 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 35 \div 40\%$, $\psi = 80\%$.

Примеси железа, кремния и некоторых других металлов несколько повышают предел прочности и твердость алюминия, но снижают его пластичность. Изменение механических свойств

алюминия различной чистоты в зависимости от степени деформации и температуры отжига показано на рис. 8 и 9 [1].

Как следует из кривых, даже при максимальных степенях деформации (около 70%) удается довести прочность алюминия лишь до 16—20 кг/мм². Однако он сильно разупрочняется с повышением температуры (рис. 10).

Алюминий имеет высокую теплопроводность и электропроводность. Электропроводность чистого алюминия составляет 60% от электропроводности меди, что обеспечивает алюминию при его малом удельном весе широкое применение в электротехнике в качестве проводникового материала.

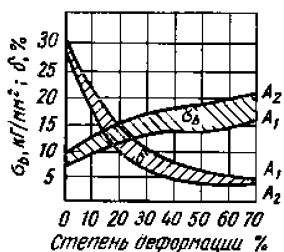


Рис. 8. Изменение механических свойств алюминия марок А1 (99,5% А1 и А2 (99,0% А1) в зависимости от степени деформации [1]

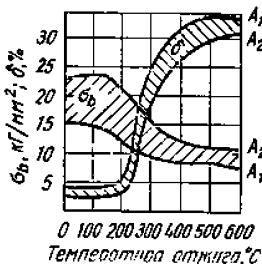


Рис. 9. Изменение механических свойств алюминиевых марок А1 (99,5% А1) и А2 (99,0% А1) в зависимости от температуры отжига [1]

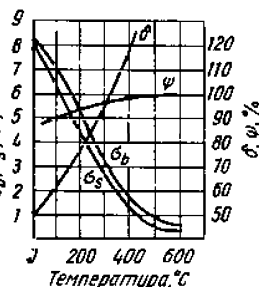


Рис. 10. Изменение механических свойств алюминия (99,57% А1, 0,22% Si, 0,21% Fe) при высоких температурах

Электропроводность и теплопроводность алюминия понижаются при легировании его различными металлами. Наиболее резко снижают электропроводность алюминия добавки марганца, хрома и ванадия, затем серебра и магния и в меньшей степени железа, кремния, никеля и меди. Влияние некоторых примесей на электропроводность алюминия показано на рис. 11 [5]. На рис. 12 показано влияние некоторых металлов на теплопроводность алюминия.

Алюминий характеризуется большой химической стойкостью на воздухе и в некоторых средах.

Повышенная коррозионная устойчивость алюминия объясняется образованием на его поверхности тонкой, но достаточно плотной защитной окисной пленки.

Высокая коррозионная стойкость алюминия обеспечивает широкое его применение в химическом аппаратостроении, в быту и других областях.

Как уже указывалось, чистый алюминий имеет низкую прочность ($\sigma_b = 8 \div 10$ кг/мм²), поэтому применение его как конструкционного материала в технике ограничено.

Алюминий можно значительно упрочнить введением в него различных легирующих компонентов и получить сплавы с необходимыми прочностными характеристиками. Наиболее распространенными легирующими присадками являются медь, магний, цинк, марганец, кремний, хром и др.

Упрочнение сплавов достигается за счет образования твердых растворов на основе алюминия, а также различных металлических соединений. Взаимодействие алюминия с различными

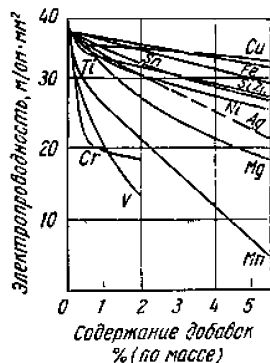


Рис. 11. Влияние примесей на электропроводность алюминия

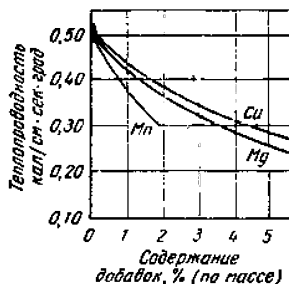


Рис. 12. Влияние некоторых легирующих добавок на теплопроводность алюминия

элементами показано на диаграммах состояния (см. приложение III)

Ниже рассматриваются важнейшие группы промышленных алюминиевых сплавов.

§ 2. СПЛАВЫ АЛЮМИНИЯ

Применяющиеся в технике алюминиевые сплавы делятся на две основные группы — литейные и деформируемые. Сплавы первой группы применяются для получения различных отливок. Сплавы второй группы используются для изготовления деформируемых полуфабрикатов (поковок, лент, листов, труб, прутков, профилей и т. д.).

Ниже рассмотрены структура и свойства наиболее распространенных литейных и деформируемых промышленных алюминиевых сплавов.

1. Литейные сплавы

Теоретические основы создания литейных сплавов рассмотрены в работах [6—8].

Состав важнейших промышленных литейных сплавов и их условная классификация приведены в табл. 2.

Небольшие добавки марганца, присутствующие почти во всех литейных сплавах, вводятся для подавления вредного влияния примесей железа, а также для повышения механических и коррозионных свойств сплавов.

Железо и кремний являются обычными примесями в алюминии. В некоторые сплавы железо вводят в больших количествах для получения особых свойств жаропрочности и др.

Литейные алюминиевые сплавы отличаются большим разнообразием структур. Отдельные структурные составляющие этих сплавов различают под микроскопом по характерной кристаллической форме, их цвету и изменению цвета под действием различных травителей.

Рекомендуемые травители, их назначение, режимы травления шлифов и воздействие их на отдельные структурные элементы сплавов указаны в приложении I и II. Эти же травители применяют для выявления структурных составляющих в деформируемых алюминиевых сплавах.

Наиболее распространенным травителем алюминиевых сплавов является 0,5—1% ный водный раствор плавиковой кислоты. Этот травитель, за исключением отдельных случаев, применялся нами для выявления микроструктуры всех алюминиевых сплавов, приведенных в атласе.

Большинство литейных сплавов подвергается термической обработке. Режимы термической обработки для различных сплавов приведены в табл. 3.

В дальнейшем для краткости в тексте указаны ссылки на эти режимы (в соответствии с их условными обозначениями без подробной расшивки самих режимов).

Механические свойства сплавов для различных условий литья и термической обработки даны в табл. 4—6.

В табл. 7 и 8 приведены некоторые физические и технологические свойства наиболее важных литейных сплавов.

Сплавы алюминия с кремнием

Сплавы алюминия с кремнием, известные под названием силумины, являются весьма распространенными литейными алюминиевыми сплавами.

Микроструктура силуминов различного состава показана на рис. 5 атласа, где на фоне игольчатой эвтектики $\alpha + \text{Si}$ видны кристаллы первичных выделений α -твердого раствора или β Si) в зависимости от положения сплавов относительно эвтектического состава.

Силумины с грубоигольчатой эвтектикой вследствие большой хрупкости кремния характеризуются невысокими механическими свойствами ($\sigma_b = 13 \div 14 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 1 \div 2\%$) и пониженными литейными и коррозионными свойствами.