

Введение

Лёгкие металлы относятся к группе цветных. Выражение «цветной металл» получило распространение благодаря цвету некоторых металлов: так, например, медь имеет розово-красный цвет, а у многих других цвет – светло-серый или серебристый. К легким относятся цветные металлы с плотностью менее 5000 кг/м^3 . Основными из них являются Al, Mg, Ti, Be. Первые три довольно широко распространены в земной коре, для сравнения в порядке убывания: Al – 8 %; Fe – 4...5 %; Mg – 2,35 %; Ti – 0,61 %; только Be – редкий металл. Его содержание в земной коре составляет 0,0005 %. Лёгкие металлы в основном применяют для производства сплавов, используемых в конструкциях с ограничениями в массе. Среди них уникальным металлом является бериллий. Этот красивый серебристо-белый металл почти в два раза легче алюминия и настолько же имеет большую тугоплавкость: алюминий плавится при температуре 660°C , а бериллий может выдерживать температуру до 1284°C ! Авиастроители считают бериллий металлом будущего.

Данная работа посвящена изучению структуры и свойств лёгких сплавов. При выполнении работы у студента формируются профессиональные компетенции – способность распознавать по структуре изучаемые сплавы, различать их по назначению и свойствам. Выполнив работу, студент должен:

- **знать:**
 - основные свойства, маркировку и области применения изучаемых сплавов;
 - типы образующихся структур различных сплавов в зависимости от концентрации компонентов и температуры по диаграммам состояния;
- **уметь** объяснять изменение свойств сплавов в зависимости от их структуры;
- **иметь навыки** проведения микроструктурного анализа цветных сплавов на основе алюминия, магния, титана и бериллия.

ПРАКТИКА № 8

АЛЮМИНИЕВЫЕ И МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

1. Цель работы: получение знаний о структуре и свойствах алюминия, магния и их сплавов.

2. Задачи работы:

- изучить особенности микроструктуры промышленных цветных сплавов на основе алюминия, магния;
- установить связь между структурой и свойствами изучаемых сплавов.

3. Теоретическая часть

Благодаря своей высокой удельной прочности сплавы на основе лёгких металлов находят широкое применение в самолётостроении.

Первыми в самолётостроении использовались сплавы на основе алюминия [1, С. 428].

3.1. Алюминий и его сплавы

Алюминий (лат. Aluminium, Al) – металл серебристо-белого цвета, легкоплавкий с температурой плавления 660°C и ГЦК решёткой. Он обладает высокой пластичностью, коррозионной стойкостью, тепло-и электропроводностью, малой плотностью (2700 кг/м^3), плохо обрабатывается резанием, удовлетворительно сваривается. Высокая коррозионная стойкость алюминия обусловлена образованием на поверхности тонкой и плотной пленки окиси Al_2O_3 .

Механические свойства алюминия зависят от его чистоты (содержания примесей) и состояния (литого или деформированного). Основными примесями, попадающими в алюминий при его производстве, являются кремний и железо, но могут содержаться также медь, цинк, титан и др.

Железо присутствует в структуре алюминия в форме химического соединения FeAl_3 , кремний соединений не образует, а его кристаллы имеют игольчатую форму. Эти примеси ухудшают пластичность

алюминия и часто не желательны в сплавах. Структура алюминия технической чистоты состоит из зерен алюминия, включений частиц кремния и $FeAl_3$ на границах.

Механические свойства технического алюминия в отожженном состоянии: $\sigma_s = 80$ МПа; $\sigma_T = 30$ МПа; $\delta = 35$ %. Из-за низкой прочности технический алюминий применяется только для изготовления малонагруженных деталей и элементов конструкции, когда от материала требуется лёгкость, пластичность, хорошая свариваемость. Из него делают цистерны, посуду, конденсаторную и пищевую фольгу, кабели, токопроводящие детали. Обладает хорошей отражательной способностью и поэтому применяется также для покрытия зеркал, рефлекторов и др.

Алюминиевые сплавы. По технологическому признаку современные алюминиевые сплавы делятся на деформируемые, литейные и спечённые из порошков. Они отличаются степенью легированности и способом получения из них деталей.

3.1.1. Деформируемые алюминиевые сплавы. Основными легирующими элементами в деформируемых алюминиевых сплавах являются Cu, Mg, Zn, Si, к числу которых позднее добавился Li. Классификацию алюминиевых сплавов на деформируемые и литейные легко пронаблюдать по диаграмме состояния, где алюминий образует эвтектический сплав с условным легирующим элементом «В» (рис. 8.1, а). Сплавы I и II относятся к деформируемым, они пластичны. Высокая пластичность объясняется их структурой – это однофазный α -твёрдый раствор. Сплавы с содержанием эвтектики (правее точки E) имеют наилучшую жидкотекучесть, меньшую пластичность δ и большую прочность σ (рис. 8.1, б). Они относятся к литейным сплавам.

Деформируемые по склонности к термическому упрочнению делятся на сплавы не упрочняемые (сплавы I) и упрочняемые термообработкой (сплавы II). Границей между ними является предел насыщения твёрдого раствора при комнатной температуре (точка S).

К деформируемым сплавам, не упрочняемым термообработкой относятся сплавы алюминия с марганцем – сплавы типа АМц и алюминия с магнием – магналии (АМг2, АМг5, АМг6 и др.). Они имеют в структуре α -твёрдый раствор соответственно марганца или магния в алюминии и включений различных фаз, которые при термической обработке дают очень незначительное упрочнение.

Вследствие этого сплавы типа АМц (1400) и АМГ (АМг2 (1520), АМг5 (1550), АМг6 (1560) упрочняют только пластической деформацией.

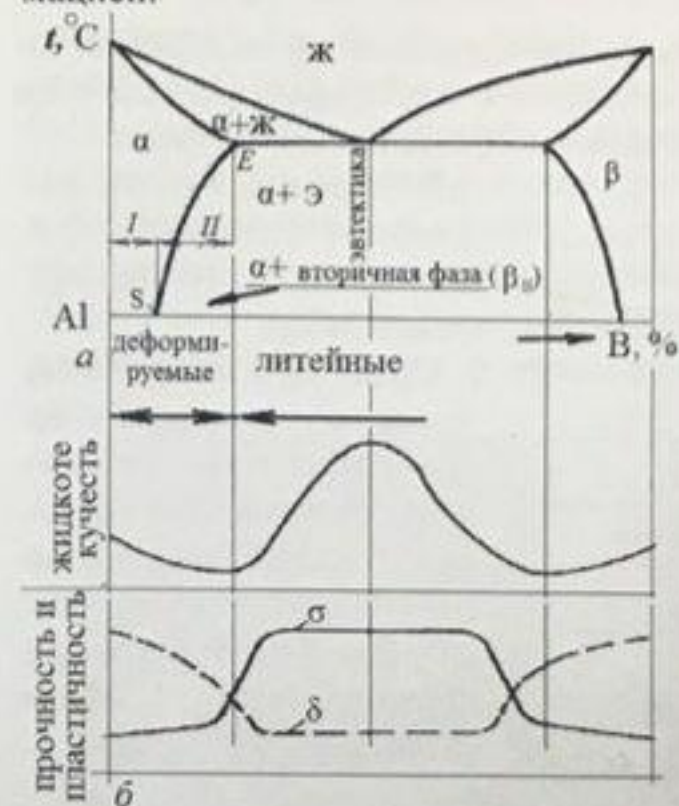


Рис. 8. 1. Схема типичной диаграммы состояния сплавов системы «алюминий-легирующий элемент» и их свойства

Сплавы в отожженном состоянии отличаются высокой пластичностью, хорошо свариваются и не подвержены коррозии.

Применяются для изготовления малонагруженных деталей путём глубокой вытяжки, сварки, работающих в коррозионной среде (канистры для бензина или масла, крупногабаритные ненагруженные конструкции типа узлов подъёмных кранов, корпусов судов и др.). Химический состав и маркировка сплавов этой группы приведены в табл. 1 П1 (прил. 1).

К сплавам, упрочняемым термической обработкой¹ относятся сплавы систем Al-Cu-Mg [дуралюмины Д1 (1110), Д16 (1160), Д18], Al-Mg-Si [авиали АВ (1340), АД31(1310)], ковочные системы Al-Cu-Mg-Si [АК6 (1360), АК8 (1380)] и высокопрочные системы Al-Cu-Mg-Zn [В95 (1950), В96]².

Относительно новыми являются сплавы систем Al-Mg-Li и Al-Cu-Li, легированные самым лёгким металлом литием (сплав ВАД23). Химический состав и маркировка сплавов этой группы приведены в табл. 2 П1. Основным легирующим элементом перечисленных сплавов (кроме авиалей и некоторых сплавов с литием) является медь, она входит в их состав. Поэтому формирование струк-

¹ Законы упрочнения алюминиевых сплавов при их термообработке впервые были сформулированы академиком А. А. Бочвар.

² Разработал академик И. Н. Фридляндер с сотрудниками (ВИАМ).

туры этих сплавов удобно рассмотреть на примере диаграммы состояния Al-Cu (рис. 8.2) применительно к дуралюминиям с содержанием 3,8...4,5 % Cu.

Дуралюмины – конструкционные алюминиевые сплавы системы Al-Cu-Mg (сплавы Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17) являются наиболее старыми сплавами, нашедшими широкое применение в технике.

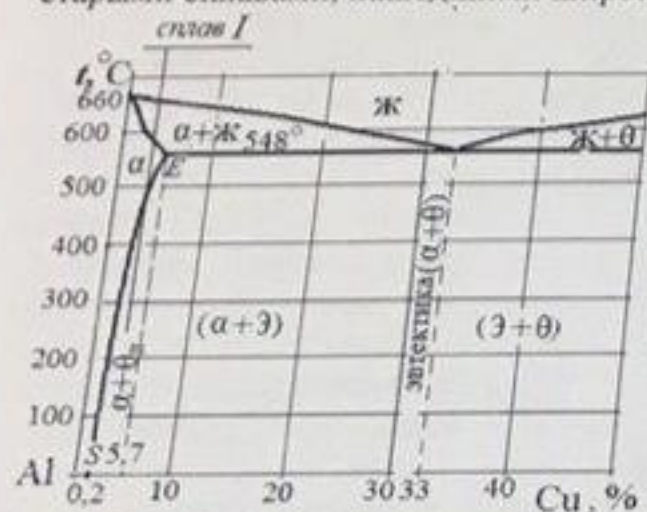


Рис. 8.2. Диаграмма состояния Al-Cu (левая часть)

В дуралюминии Д1 основной упрочняющей фазой является только θ_{II} -фаза (CuAl_2).

Сплав Д16 имеет более высокую прочность по сравнению с Д1. Это связано с тем, что Д16 содержит большее количество магния и поэтому наряду с θ_{II} -фазой появляется при старении ещё S-фаза (CuMgAl_2).

Основной термической обработкой этих сплавов является закалка и старение. Из диаграммы состояния Al-Cu следует, что растворимость меди в алюминии зависит от температуры: при комнатной температуре растворимость составляет 0,2 % (рис. 8.2), а максимальная растворимость достигает при температуре 548 °C и равна 5,7 %. Наличие линии переменной растворимости ES показывает возможность термической обработки сплава путём закалики и старения. Если рассматривать сплав I (левее точки E), то он после медленного охлаждения (отжига) будет находиться в равновесном состоянии и состоять из двух основных фаз: матрицы сплава в виде α -твёрдого раствора и растворимого соединения CuAl_2 (θ_{II} -фаза). В структуре дуралюминов в зависимости от их состава могут также присутствовать частично растворимая при нагреве S-фаза (CuMgAl_2) и не растворимые тёмные железистые, марганцовистые и кремнистые соединения (рис. 8.3, а).

Рассмотрим, какие происходят фазовые превращения при закалке сплава I. При нагреве под закалку сплав нагревают выше линии предельной растворимости SE (чуть выше 500 °C), при

которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в решётке алюминия и образуют α -твёрдый раствор. Затем выдерживают сплав при этой температуре и быстро охлаждают в воде. При быстром охлаждении со скоростью выше критической (обычно в холодной воде) все диффузионные процессы будут подавлены и выделение растворённых фаз не успеет произойти. Поэтому после закалки в сплаве фиксируется тот твёрдый раствор, который получился в момент достижения температуры закалки, а именно α -твёрдый раствор, пересыщенный атомами легирующих элементов, а также могут содержаться тёмные включения нерастворимых при нагреве фаз в виде различных химических соединений (рис. 8.3, б).

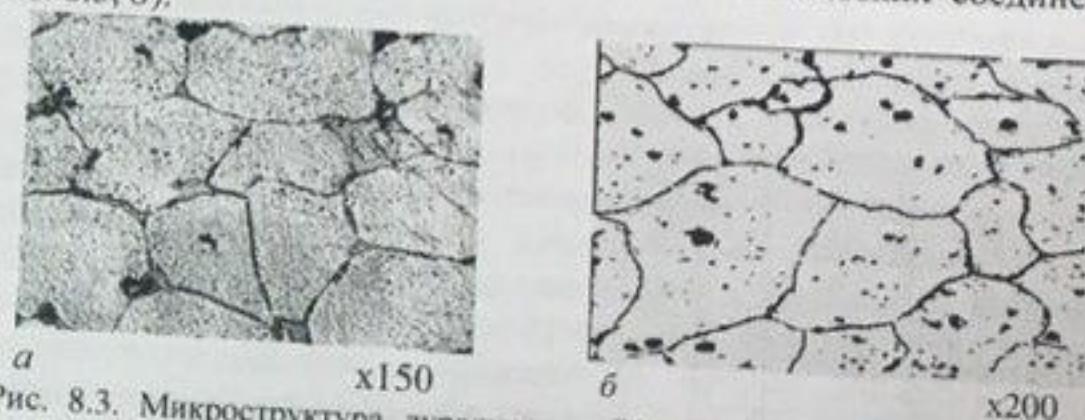


Рис. 8.3. Микроструктура дуралюмина Д1: а – деформированного и отожжённого, сероватые частицы θ -фазы (CuAl_2) по границам зёрен α -твёрдого раствора и тёмные – нерастворимые фазы; б – после закалки, видны включения тёмных нерастворимых фаз в виде железистых FeAl_2 , $\text{N}(\text{Cu}_2\text{FeAl})$, марганцовистых типа MnAl_6 или $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$, кремнистых соединений (Mg_2Si)

Такая структура свежезакалённого сплава придаёт ему низкую прочность, но высокую вязкость и технологическую пластичность. Этой особенностью дуралюмина широко пользуются технологи при изготовлении из него сложных деталей. Пока сплав пластичен, его можно растягивать, гнуть, ковать, но через нескольких суток происходит при комнатной температуре естественное старение и деталь становится прочной, твёрдой.

Старение основано на распаде пересыщенного твёрдого раствора и образования дисперсных частиц (дисперсионное твердение). При естественном старении (20 °C) или низкотемпературном искусственном старении (ниже 150 °C) не происходит выделения θ_{II} -фазы и других вторичных фаз, а образуются огромное количество плоских скоплений с резко повышенной концентрацией меди в виде дисков, получившие название «зоны Гинье – Престона» (ГП). Образование

таких зон связано с тонкими изменениями структуры, которые не обнаруживаются в световом, а в ряде случаев и в электронном микроскопе. И только специальные методы рентгеноструктурного анализа позволили двум исследователям французу Дж. Д. Гинье и независимо от него англичанину А. Престону описать механизм подготовительных стадий распада пересыщенного твердого раствора.

Из-за разницы атомных радиусов меди (0,128 нм) и алюминия (0,143 нм) в местах скопления меди (зон ГП) создаются мощные искажения кристаллической решетки α -раствора, которые не дают двигаться дислокациям. Поэтому пластичность сплава падает, а прочность растёт.

Установлено, что при естественном и искусственном старении при нагреве до 100 °С максимальное упрочнение достигается в основном при образовании зон ГП (рис. 8.4). Такой уровень упрочнения

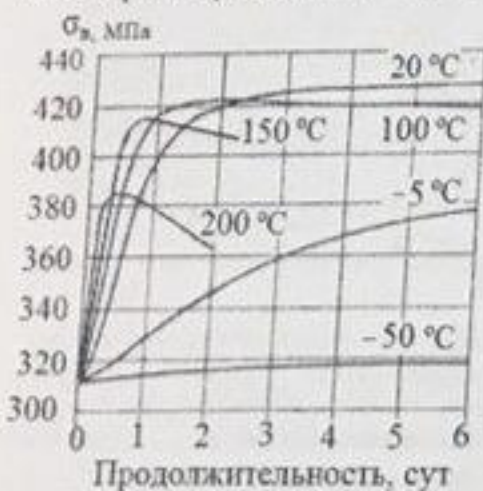


Рис 8.4. Характер изменения прочностных свойств σ_v дуралюмина при старении в зависимости от температуры и длительности выдержки

сохраняется в течение долгого времени при комнатной температуре, обеспечивая надежную работу изделий при эксплуатации. При более высоких температурах старения (150...200 °С) зоны ГП увеличиваются в своих размерах, а затем по мере выдержки происходит их выделение из твёрдого раствора в виде мельчайших частиц (CuAl_2 , Al_2CuMg и др.), которые впоследствии коагулируют и укрупняются. При этом расстояние между частицами увеличивается, что облегчает прохождение дислокаций между ними и прочность сплава снижается, а пластич-

ность увеличивается. Зарождение трещин в такой структуре затруднено, поэтому материал обладает высокой вязкостью. Старение при наиболее высоких температурах называется *разупрочняющим*. Температура нагрева под закалку и режимы старения для различных термоупрочняемых сплавов алюминия приведены в табл. 2 П1.

Сплав Д16 применяют для изготовления деталей и конструкций средней и повышенной прочности, работающих при динамических нагрузках. Самый пластичный из дуралюминов Д18 применяется для изготовления заклёпок.

Ковочные сплавы АК6 и АК8 системы Al-Cu-Mg-Si имеют хорошую пластичность и стойки к образованию трещин при горячей пластической деформации. Сплавы АК6 и АК8 по составу близки к дуралюминам, отличаются повышенным содержанием Si. Поэтому в их структуре вместо S-фазы (CuMgAl_2) присутствует кремнийсодержащая β -фаза (Mg_2Si). Могут быть в них фазы и более сложного состава (Al, Cu, Mg, Si).

Из сплава АК6 получают поковки сложной формы и средней прочности, а из сплава АК8 – высоконагруженные штампованные детали простой формы (хуже деформируются). Оба сплава имеют низкую коррозионную стойкость и требуют защиты. Максимальный эффект упрочнения наблюдается после закалки и искусственного старения.

Группа сплавов системы Al-Mg-Si, названных *авиалами*, содержат те же легирующие элементы, что и ковочные, но с гораздо меньшим содержанием меди. Поэтому авиали обладают невысокой прочностью, но значительной пластичностью. Маркируют их АВ, АД31, АД35. Основная упрочняющая фаза – Mg_2Si . Для получения максимальной прочности искусственное старение этих сплавов рекомендуется проводить сразу после закалки. Из этих сплавов получают листы, трубы, прессованные профили, лопасти винтов вертолётов и другие изделия, требующие повышенной пластичности в холодном и горячем состояниях.

Высокопрочные сплавы системы Al-Cu-Mg-Zn наряду с медью и магнием содержат значительное количество цинка. Они представлены сплавами В93, В95, В96Ц3 и особо прочным В96Ц. Сплавы этой системы являются наиболее высокопрочными среди алюминиевых сплавов, но характеризуются меньшей пластичностью, чем, например, дуралюмины.

Значительному упрочнению способствует цинк. Он образует в сплаве упрочняющие фазы η (MgZn_2), T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$). Содержится также в структуре упрочняющая фаза S (CuMgAl_2). Сплавы В95 и В96 применяют в самолётостроении для высоконагруженных деталей и конструкций, длительно работающих при температурах до 100 °С.

В отличие от дуралюминов в высокопрочных сплавах после закалки получается более стабильный твердый раствор. Поэтому сплавы применяют только после искусственного старения.

Сплав повышенной чистоты В96пч впервые был применён для

сварных крыльев истребителя МиГ-23 [3, С. 26]. На ранних самолётах с клёпаными крыльями использовался дуралюминий.

Сплав В96Ц3 рекомендуется вместо сплавов В95 в основном в виде длинномерных катаных (плиты, листы) и прессованных (профили, панели, полосы) полуфабрикатов для верхних обшивок крыла, стоек, балок и других элементов в преимущественно сжатых зонах планера перспективных самолетных конструкций. Из сплава освоено литье крупногабаритных круглых и плоских слитков. Сплав обладает хорошей технологической пластичностью при изготовлении полуфабрикатов в металлургическом производстве.

Алюминиево-литиевые сплавы. Введение лития³ в систему легирования позволяет получить новые, наиболее лёгкие сплавы алюминия. Они по прочности близки к высокопрочным сплавам системы Al-Zn-Mg-Cu, но имеют меньшую плотность и больший модуль упругости, жаропрочны. Такие свойства позволяют создавать аэрокосмическую технику с меньшей массой и даёт возможность экономии горючего, увеличения грузоподъёмности и улучшения других характеристик летательных аппаратов.

Алюминиево-литиевые сплавы подвергаются закалке и искусственному старению. Среди них наиболее известны сплавы систем Al-Mg-Li (например, сплав 1420, применяемый для изготовления конструкций летательных аппаратов) и Al-Cu-Li (сплав ВАД23, по новой маркировке – 1460), применяемый для изготовления топливных баков и ёмкостей сжиженных газов).

Следует отметить, за рубежом нет аналога отечественному сплаву 1420. Это объясняется значительными трудностями при плавке и литье сплавов системы Al-Mg-Li. Химический состав, режимы термообработки и механические свойства рассмотренных сплавов приведены в табл. 2 III (прил. 1).

3.1.2. Литейные алюминиевые сплавы. Литейные сплавы на основе алюминия широко используются для фасонного литья. Они должны обладать такими литейными свойствами как высокая жидкотекучесть (см. рис. 8.1), небольшая усадка, отсутствие склонности к образованию пор в отливках. В качестве литейных сплавов применяются сплавы систем: Al-Si (силумины) – АК12 (АЛ2), АК13 (АК13), АК9ч (АЛ4), АК5М (АЛ5); Al-Cu (жаропрочные) – АМ4,5 (АЛ7),

АМ5 (АЛ19) и Al-Mg (магналии, коррозионностойкие) – АЛ8, АМг10 (АЛ27), АМг11 (АЛ22)⁴ и др.

Сплавы систем Al-Cu и Al-Mg имеют низкие литейные свойства и поэтому применяются реже для получения литых деталей, чем силумины.

Силумины – сплавы алюминия с 8...14 % Si. Они маркируются буквами АК (алюминий + кремний), цифра после букв обозначает среднее содержание кремния. На рис. 8.5 приведена левая часть диаграммы состояния системы Al-Si с эвтектикой.

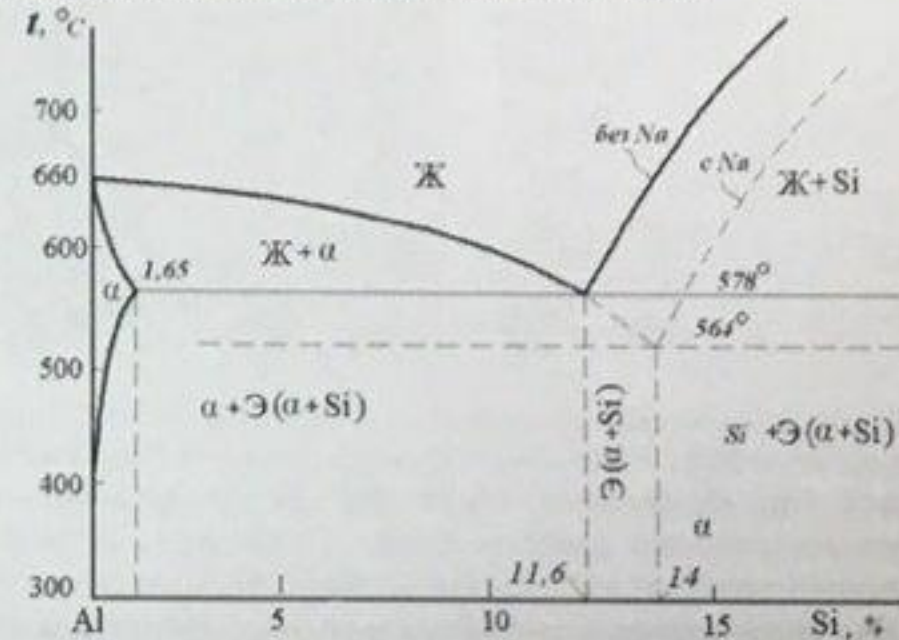


Рис. 8.5. Диаграмма состояния «алюминий – кремний»

Для эвтектических сплавов характерен узкий интервал кристаллизации, что обеспечивает плотность отливок (низкую пористость), хорошую жидкотекучесть и низкую усадку. В сплаве АК12 с содержанием 11,6 % Si эвтектика образуется при температуре 578 °С. Она состоит из α-твёрдого раствора и кристаллов чистого кремния (α+Si). Кремний при затвердевании эвтектики выделяется в виде тёмных грубых удлинённых частиц (рис. 8.6, а), которые играют роль надрезов в пластичном α-твёрдом растворе. Такая структура способствует получению низких механических свойств. Для устранения неблагоприятных избыточных удлинённых кристаллов кремния в структуре силуминов их подвергают модифицированию введением в расплав хлористых и фтористых солей натрия. Кроме

⁴ В скобках указана старая маркировка сплавов, которая ещё встречается в литературе

³ Литий – самый лёгкий среди металлов с плотностью всего 0,534 г/см³

модифицирующего действия натрия сдвигает эвтектическую точку в системе Al-Si в сторону больших содержаний кремния и низких температур (штриховая линия, см. рис. 8.5). Благодаря этому эвтектический сплав АК12 становится доэвтектическим.

В результате модифицирования натрием в структуре силумина АК12 появляются первичные кристаллы мягкой пластичной фазы α -твёрдого раствора дендритного типа, а эвтектика приобретает более тонкое строение и состоит из мелких кристаллов Si и фазы α -твёрдого раствора, т. е. становится более мелкодисперсной (рис. 8.6, б).

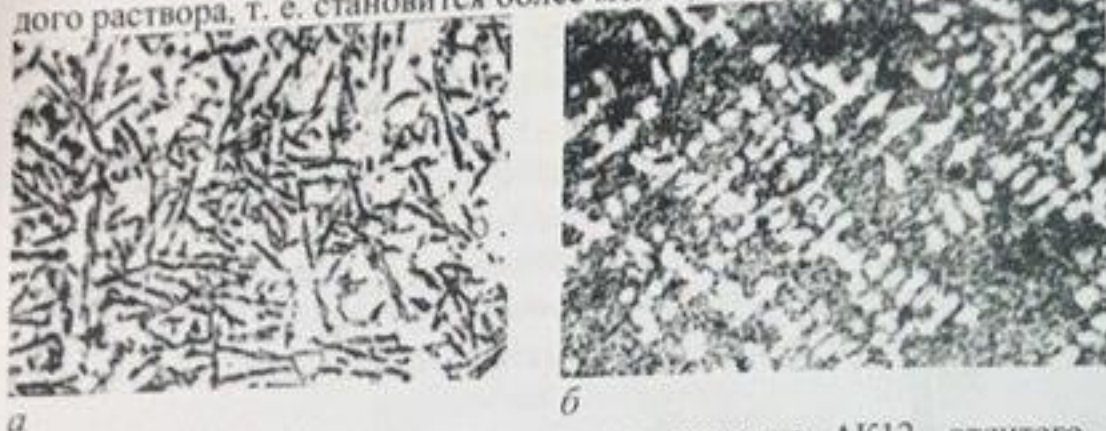


Рис. 8.6. Микроструктура эвтектического силумина АК12, отлитого в земляную форму, $\times 200$: а – до модифицирования; б – после модифицирования

Такое преобразование структуры после модифицирования улучшает механические свойства сплава. Сплав АК12 не подвергают упрочняющей термической обработке. Модифицированные силумины хорошо свариваются и имеют высокую коррозионную стойкость. Отливают из сплава АК12 поршни, головки цилиндров, корпуса насосов, блоки дизельных двигателей. Для повышения прочности доэвтектические силумины АК9 дополнительно легируют магнием, а АК8 одновременным введением магния и меди. Они могут упрочняться, кроме модифицирования, термической обработкой.

В табл. 3 III приведены некоторые марки литейных алюминиевых сплавов, их химический состав и механические свойства.

3.2. Магний и его сплавы

Магний (лат. Magnesium, Mg) – очень легкий светло-серый металл, с плотностью всего 1740 кг/м^3 ; он почти в 5 раз легче меди, в 4,5 раза легче железа; даже «крылатый» алюминий в 1,5 раза тяжелее магния. Температура плавления магния сравнительно невысока –

всего 650°C , но в обычных условиях расплавить магний довольно трудно, поскольку нагретый на воздухе до 550°C он вспыхивает и мгновенно сгорает ослепительно ярким пламенем. Это свойство магния широко используют в пиротехнике. Магний не полиморфен, имеет постоянную ГП решётку и низкие механические свойства.

Литой магний имеет $\sigma_b = 110 \dots 120 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 20 \dots 30 \text{ МПа}$, $\delta = 6 \dots 8 \%$, твёрдость 30 НВ. Такие низкие свойства чистого магния исключают его использование как конструкционного материала. Он в основном применяется в металлургии как раскислитель, восстановитель и легирующий элемент, является эффективным модификатором чугунов. В технике используются магниевые сплавы.

Магниевые сплавы. Эти сплавы, как лёгкий конструкционный материал, успешно конкурируют со сплавами на основе алюминия. В случае замены алюминиевых сплавов на магниевые в конструкции достигается 20...30 % весовой эффект. Удельная прочность магниевых сплавов выше, чем у алюминиевых. Магниевые сплавы поглощают ударные и вибрационные нагрузки и используются для изготовления таких деталей, как авиационные и автомобильные колеса, силовые детали самолетов и вертолетов, корпуса агрегатов и др.

Среди недостатков – трудность обработки давлением и литья, уступают алюминиевым сплавам по пластичности и коррозионной стойкости.

Основными легирующими элементами в магниевых сплавах, повышающих их прочностные свойства, являются Al (до 10 %), Zn (до 5...6 %). Вводят также для увеличения коррозионной стойкости Mn (образует защитную плёнку из MnO), а для уменьшения размера зёрен цирконий Zr и церий Ce. Легирующие элементы образуют с магнием твёрдые растворы.

Промышленные магниевые сплавы, по технологическому признаку (как алюминиевые и другие сплавы), делятся на деформируемые (обозначают МА) и литейные (МЛ). Деформируемые применяются для получения различных профилей прокаткой, заготовок ковкой или штамповкой при нагреве. Из литейных сплавов получают литые детали.

Деформируемые магниевые сплавы (ГОСТ 14975-76) в зависимости от свойств и легирующих элементов делятся на пять групп.

Сплавы первой группы системы Mg-Mn (МА1, МА8) содер-

жаты около 2 % Mn являются *коррозионностойкими*. Здесь марганец слабо влияет на прочностные свойства, но повышает коррозионную стойкость и пластичность сплавов. Сплав МА1 имеет высокую технологическую пластичность и коррозионную стойкость, хорошо сваривается. Введение в сплав МА8 до 0,2 % церия приводит к измельчению зерна. Церий выделяется в магнии в виде высокодисперсных частиц Mg_4Ce , которые повышают механические свойства. Эти сплавы термически не упрочняются и поставляются в отожженном состоянии в виде листового материала.

Сплавы второй группы системы Mg-Al-Zn-Mn (МА2, МА5) относятся к сплавам *средней прочности*, а *высокопрочными* являются сплавы **третьей группы системы Mg-Zn-Zr (МА14, МА15, МА19, МА20)**. В этих сплавах Al и Zn эффективно упрочняют твердый раствор благодаря их высокой растворимости в магнии и появлению при искусственном старении упрочняющих фаз Mg_4Al_3 и $Mg_3Zn_3Al_3$. Однако, как уже отмечалось, концентрация Al и Zn, в промышленных сплавах не должна превышать соответственно 10 и 6 %, так как повышенное их содержание увеличивает количество упрочняющих фаз, что приводит к снижению пластичности.

В сплаве МА14 цирконий измельчает зерно, улучшает механические свойства и повышает сопротивление коррозии. После горячей обработки давлением его подвергают закалке и искусственному старению при 160...170 °С в течение 24 часов.

Четвертая группа представлена *жаропрочными* сплавами, на базе системы **Mg-PЗМ (МА11, МА12)**. Основной легирующий элемент в этих сплавах – *неодим (2,5...3,5 %)*, причем сплав МА11 дополнительно легирован *марганцем и никелем*, а сплав МА12 – *цирконием*. Неодим обеспечивает высокую жаропрочность, которая обусловлена достаточной стабильностью твердого раствора и небольшой скоростью коагуляции упрочняющей фазы Mg_9Nd при температуре эксплуатации. Основная цель легирования цирконием – это измельчение зерна, что вызывает улучшение технологической пластичности и прочности.

Сплавы этой группы применяются для изготовления деталей, работающих при температурах до 250...300 °С.

Пятую группу составляют *сверхлёгкие* сплавы системы **Mg-Zn-Li (МА18 с добавками церия, МА21 с добавками кадмия)** с плотностью 1300...1650 кг/м³. Сплав МА18 отличается самой малой

плотностью среди магниевых сплавов и высокой пластичностью. Сплав МА21 имеет более высокую прочность и коррозионную стойкость. Они также хорошо свариваются и обладают высокой ударной вязкостью. Получают из деформируемых магниевых сплавов в горячем состоянии прутки, полосы, профили, поковки сложной формы. Химический состав и механические свойства важнейших магниевых сплавов приведены в прил. 2.

Литейные магниевые сплавы (ГОСТ 2856-79) по составу близки к деформируемым и подразделяются на три группы:

1) сплавы *средней прочности* системы **Mg-Al-Zn (МЛ3, МЛ4, МЛ5, МЛ6)**;

2) *высокопрочные* сплавы системы **Mg-Zn-Zr (МЛ8, МЛ12, МЛ15, МЛ18)** и

3) *жаропрочные* сплавы, легированные редкоземельными металлами системы **Mg-PЗМ-Zr (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19)**.

Литейные магниевые сплавы МЛ5 и МЛ6 **первой группы** являются наиболее распространенными литейными сплавами. Алюминий в этих сплавах является основным упрочнителем, поскольку образует упрочняющую фазу Mg_4Al_3 . Цинк оказывает меньшее воздействие на свойства. Также вводят в состав этих сплавов марганец в небольшом количестве для повышения коррозионной стойкости (см. прил. 2). Эти сплавы имеют хорошую жидкотекучесть, менее склонны к образованию микрорыхлот и пористости, вследствие чего пригодны к литью сложных по конфигурации деталей, работающих в условиях значительных нагрузок. Они после оксидирования обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием.

Литейные **сплавы второй группы** системы Mg-Zn-Zr (МЛ12, МЛ15), по сравнению со сплавами системы Mg-Al-Zn, обладают более высокими прочностными свойствами, поскольку церий измельчает зерно. Ввиду меньшего размера зерна отливки из сплавов МЛ12 и МЛ15 отличаются малой чувствительностью механических свойств отливок к толщине сечения и усадочной пористости, чем отливки из сплавов МЛ4 или МЛ5.

Сплавы третьей группы системы Mg-PЗМ-Zr (МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19) отличаются высокой жаропрочностью. Они могут работать при длительной эксплуатации до 250...300 °С. Для легирования сплавов из редкоземельных металлов наиболее широко исполь-

зуют неодим. Сплавы содержат также добавки цинка, иттрия и индия. Сплавы на основе Mg-Nd-Zr (МЛ9, МЛ 10, МЛ 19) сочетают достаточно хорошие механические свойства при комнатной температуре с высокой жаропрочностью, хорошими литейными и технологическими свойствами. Они дают плотные отливки с однородными механическими свойствами в сечениях разной толщины.

Упрочняющая термическая обработка магниевых сплавов.

Ряд магниевых сплавов после горячей обработки давлением или литья подвергают закалке с последующим старением. Характерной особенностью всех магниевых сплавов является малая скорость диффузионных процессов, связанных с растворением и выделением интерметаллических фаз. Это позволяет производить закалку изделий на воздухе, а иногда – в горячей воде.

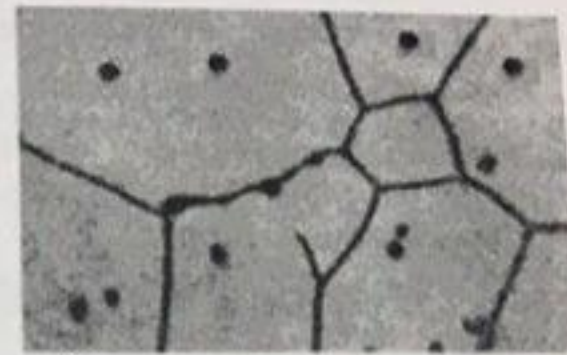
Нагрев под закалку способствует растворению избыточных фаз литейного происхождения, а также фаз, выделившихся при горячей деформации. Последующее охлаждение полуфабриката при закалке формирует пересыщенный твердый раствор, который затем распадается при искусственном старении. Естественное старение для магниевых сплавов не применяется, поскольку вылёживание при комнатной температуре не меняет свойств.

Механические свойства сплавов первой группы МЛ5 и МЛ6 могут повышаться гомогенизацией при 420 °С или закалкой на воздухе. Наличие переменной растворимости алюминия и цинка в магнии с изменением температуры обеспечивает возможность упрочнения сплавов системы Mg-Al-Zn также старением после закалки. При нагреве под закалку до температуры 415 °С с выдержкой 12...24 ч. неравновесные фазы литейного происхождения переходят в твердый раствор. Литейные или деформируемые сплавы магния имеют структуру α -твердого раствора и избыточной фазы типа Mg_3Al_2 в виде темных частиц (рис. 8. 7).

После закалки и добавочного старения при 175 °С (для МЛ5) и 190 °С (для МЛ6) в течение 16 часов происходит распад магниевого твердого раствора с выделением интерметаллического соединения $Mg_{17}Al_{12}$ и заметно возрастают прочностные характеристики. При старении происходит распад твердого раствора, сопровождающийся выделением дисперсных интерметаллидов, трудно различимые под оптическим микроскопом. Однако магниевые сплавы не всегда подвергают старению.



а



б

Рис. 8.7. Структура магниевое сплава МЛ5 после литья, х340:

а – в литом состоянии α - твердый раствор и избыточная фаза типа Mg_3Al_2 ;
б – после закалки пересыщенный α -твердый раствор

После старения для многих сплавов характерна пониженная пластичность и слабое упрочнение, как в сплавах системы Mg-Al-Zn. Более значительное упрочнение при старении происходит в сплавах систем Mg-Zn-Zr и Mg-PЗМ-Zr.

4. Практическая часть

4.1. Оборудование и материалы

- компьютерная установка на базе оптического микроскопа «Olimpus GX – 41»;
- коллекция шлифов сплавов:
 - 1) силумин не модифицированный;
 - 2) силумин модифицированный;
 - 3) магниевый деформируемый сплав;
 - 4) магниевый литейный сплав.
- наглядные пособия и справочные материалы (атлас типовых структур металлов).

Последовательность выполнения работы

- выявить, изучить с помощью оптического микроскопа и зарисовать структуру типичных алюминиевых, магниевых сплавов в различном состоянии, указав фазовый состав, свойства и применение этих сплавов;
- в отчёте привести диаграммы состояния изучаемых сплавов и их свойства в зависимости от состава.

Критерии результативности работы

Работа считается выполненной в том случае, если студент:

- 1) научился правильно анализировать структуру лёгких сплавов на основе алюминия, магния, а также знает их назначение;
- 2) результаты выполненной работы представлены в соответствии с требованиями к оформлению и содержанию отчёта;
- 3) правильно ответил на все контрольные вопросы.

Требования к оформлению и содержанию отчёта

Письменный отчет по работе должен включать:

- 1) наименование и цель работы;
- 2) схемы изучаемых микроструктур сплавов на основе алюминия, титана и магния;
- 3) основные графики и схемы, приведенные в методических указаниях;
- 4) основные свойства изучаемых сплавов;
- 5) анализ зависимости между структурой и свойствами изучаемых сплавов.

Контрольные вопросы

1. Какие металлы относятся к лёгким?
2. Какими свойствами обладает алюминий?
3. Для изготовления какой продукции применяется алюминий?
4. На какие группы делятся алюминиевые сплавы по технологическим признакам?
5. Как можно различить по диаграмме состояния «алюминий – легирующий элемент» сплавы по технологическим признакам?
6. Какие алюминиевые сплавы относятся к термически упрочняемым и не упрочняемым?
7. Какую структуру имеет дуралюминий после отжига и после закалки со старением? При каких режимах они проводятся?
8. Как маркируется дуралюминий?
9. Что за сплавы «силумины» и как они маркируются?
10. Какой процесс называется модифицированием и для чего его используют?

11. Что из себя представляет магний и какие он имеет характеристики?

12. Какими элементами легируют магниевые сплавы и как они влияют на их структуру?

13. На какие группы делятся магниевые деформируемые сплавы и по каким признакам?

14. На какие группы делятся магниевые литейные сплавы по прочности?

15. Какая особенность магниевых сплавов позволяет им закаливаться на воздухе?

16. Подвергают ли низкопрочные магниевые сплавы старению?

17. В сплавах какой группы выше эффект упрочнения после старения?

18. Какими преимуществами обладают магниевые литейные сплавы 2-й группы?

19. Чем обуславливается высокая жаропрочность магниевых литейных сплавов 3-ей группы?

20. Как влияет измельчение зерна на свойства магниевых сплавов?

21. На какие группы, и по каким признакам делятся магниевые деформируемые сплавы?

22. Какие деформируемые магниевые сплавы относятся к термически упрочняемым сплавам, а какие к не упрочняемым?

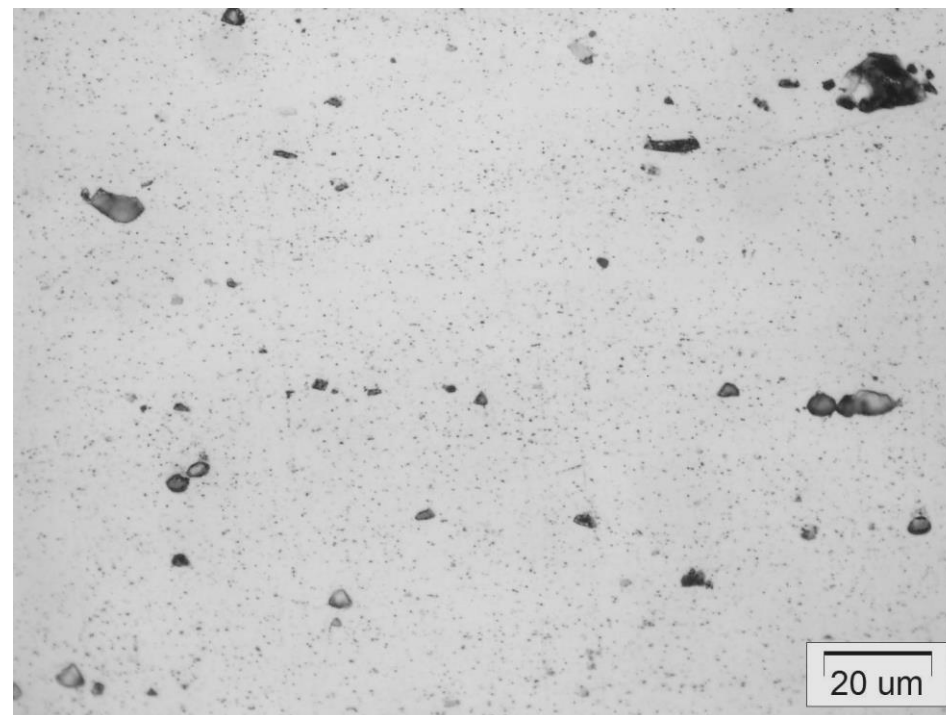
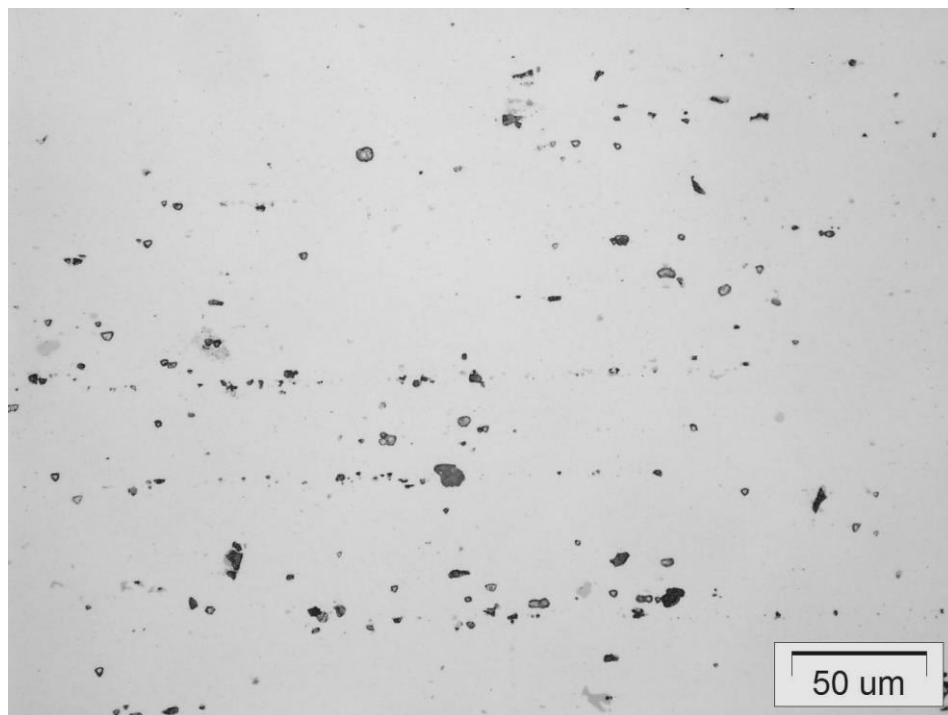
Тесты для самоконтроля приведены в прил. 3.

Алюминиевые сплавы

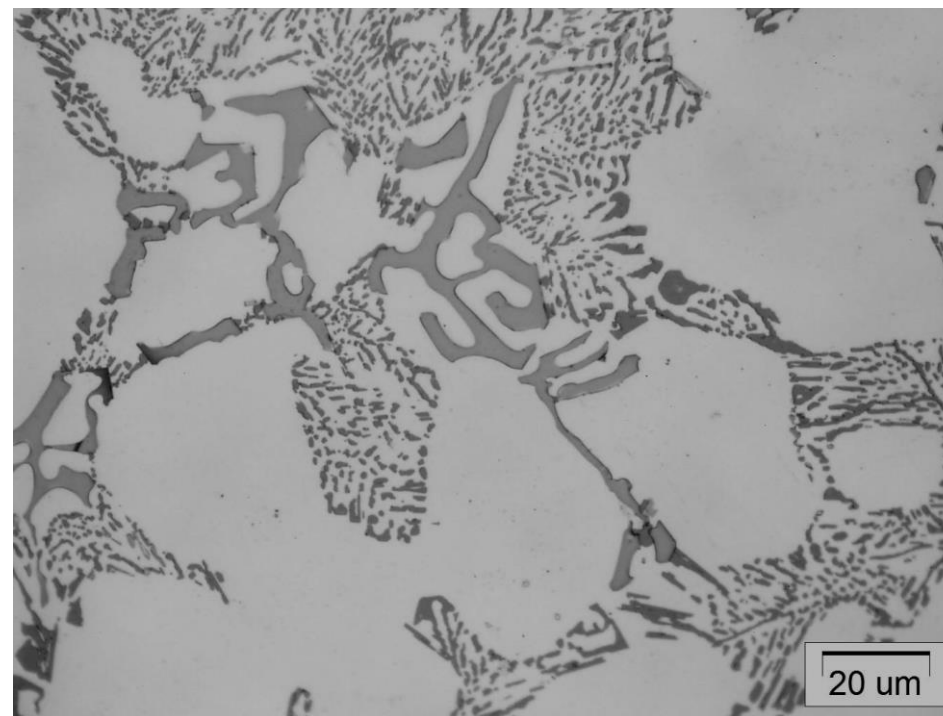
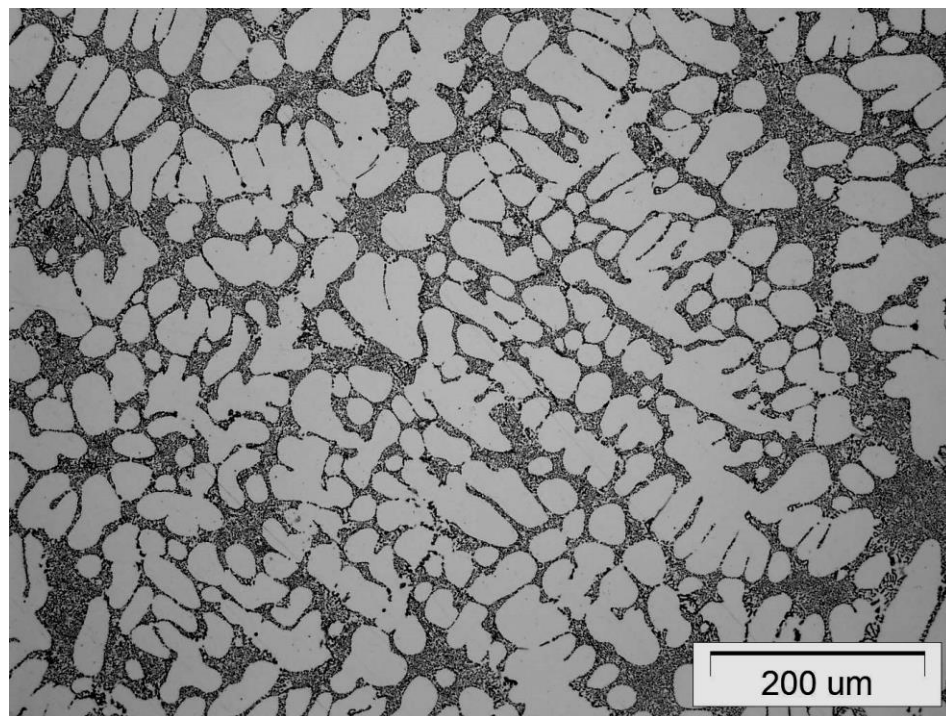
Химический состав в % исследуемых сплавов

	Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Zr	Mg	Zn
AK9	до 1.3	8 - 11	0.2 - 0.5	до 0.3		85.1 - 91.6	до 1		0.2 - 0.4	до 0.5
AK12	до 1.5	10 - 13	до 0.5		до 0.1	84.3 - 90	до 0.6	до 0.1	до 0.1	до 0.3
Д16	до 0.5	до 0.5	0.3 - 0.9	до 0.1	до 0.1	90.8 - 94.7	3.8 - 4.9		1.2 - 1.8	до 0.3

Деформируемый термоупрочняемый сплав Д16

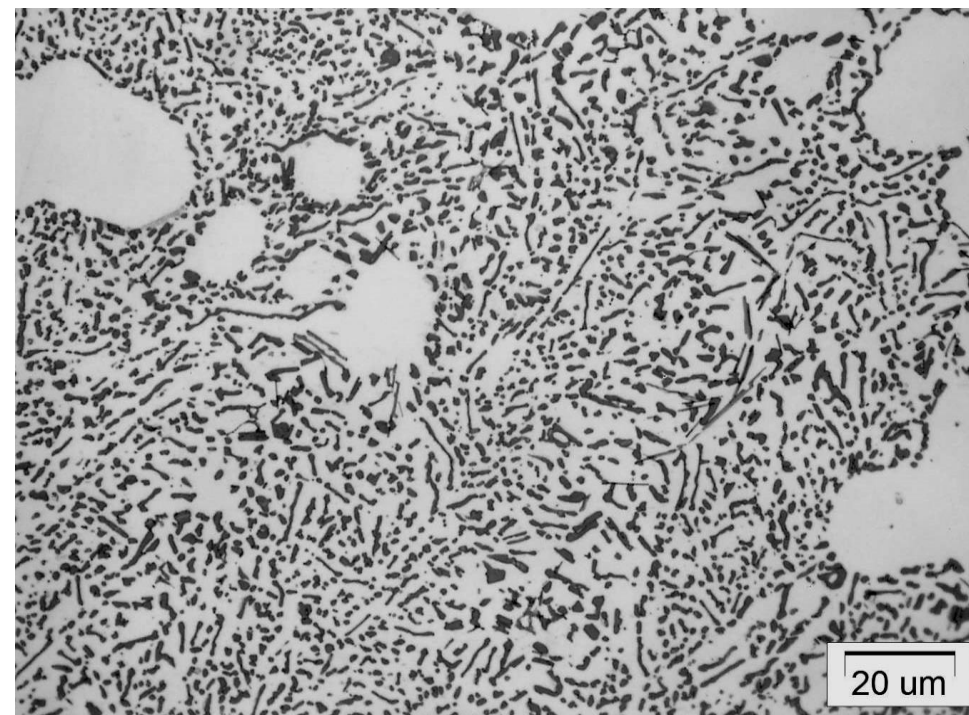
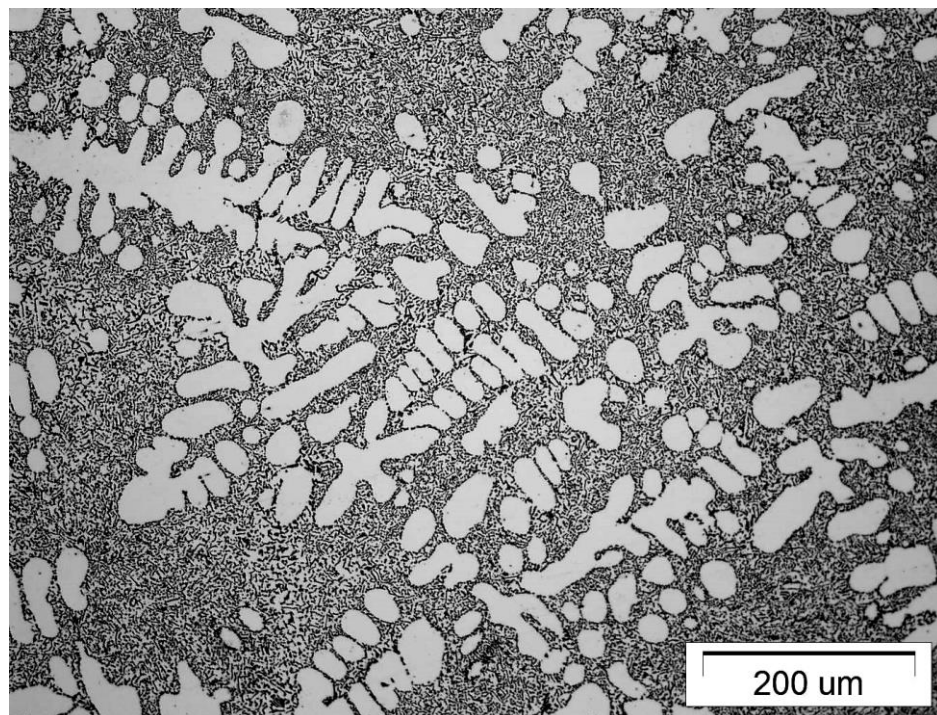


Литейный доэвтектический сплав АК9



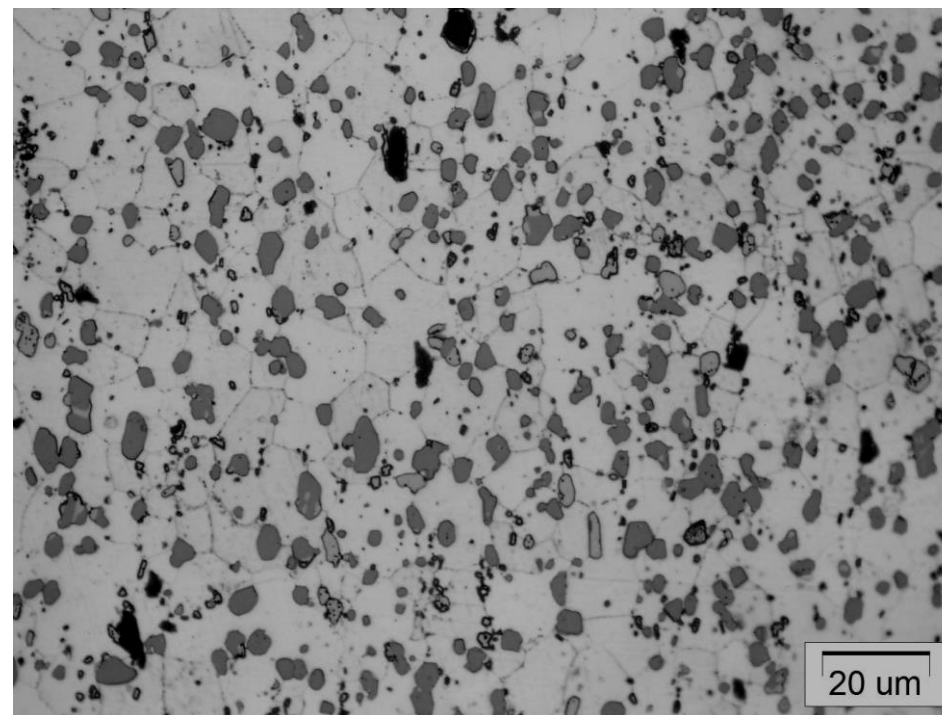
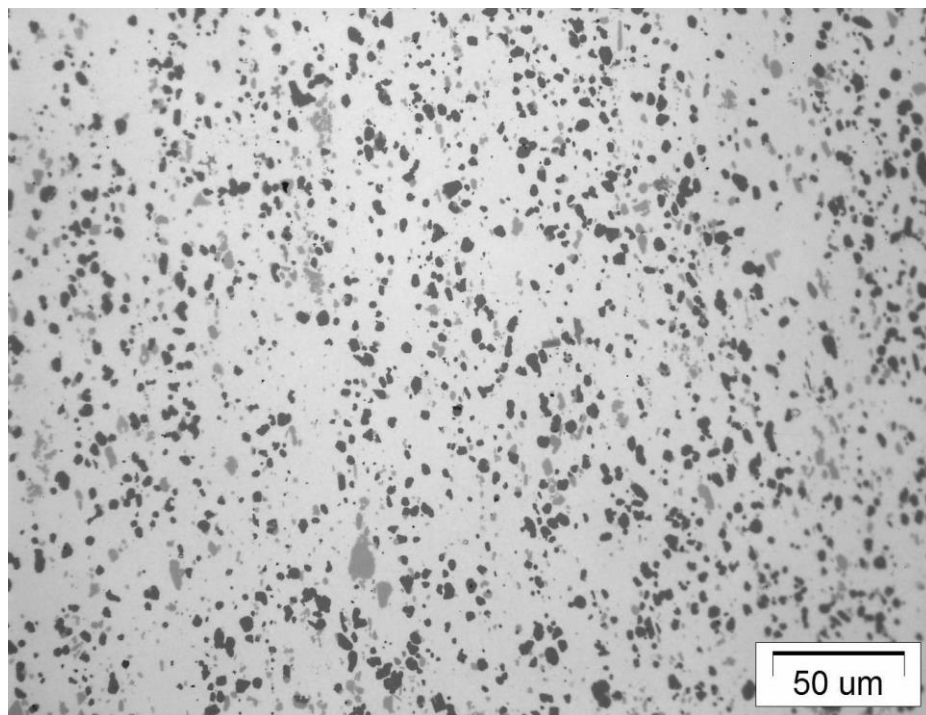
Литое состояние

Литейный эвтектический сплав АК12



Литое состояние

Деформируемый эвтектический сплав АК12Д



Микроструктура сплава послековки