

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ
И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ
ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Утверждено учебно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Воронеж 2018

УДК 539.4.011(075.8)

ББК 30.36я7

Ф166

Рецензенты:

*кафедра Естественных дисциплин ФГБОУ ВО Воронежский
государственный университет инженерных технологий
(зав. кафедрой, д-р. техн. наук., проф. Г.В. Калашиников,
д-р. техн. наук, проф. А.С. Борсяков);
д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин*

Фазовые равновесия и структурообразование сплавов на основе алюминия и магния для авиационной промышленности: учеб. пособие
Ф166 [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (Мб) /
Д.Г. Жиликов, О.В. Горожанкина, Е.Н. Федорова, В.А. Юрьева.-
Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем.
требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с
разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. –
Загл. с экрана.

ISBN

Данное учебное пособие разработано в рамках реализации образовательного модуля проекта целевого обучения студентов ВГТУ № 2017-КП-ОПК-039-П1-05 «Подготовка высококвалифицированных специалистов в области материаловедения современных конструкционных и функциональных материалов авиационной техники» для направления подготовки бакалавров 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» в соответствии с миссией модуля.

Табл. 17. Ил. 41. Библиогр.: 19 назв.

УДК 539.4.011(075.8)

ББК 30.36я7

ISBN

© Жиликов Д.Г., Горожанкина О.В.,
Федорова Е.Н., Юрьева В.А., 2018
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Цель издания данного пособия – подготовить будущих специалистов авиастроения к решению задач по рациональному выбору материала, который, в свою очередь, способствует улучшению качества авиационных изделий, увеличивает срок их эксплуатации, повышает надежность.

В настоящее время, характерно резко дифференцированное применение материалов в зависимости от конкретных условий эксплуатации. В пособии представлено расширенное описание материалов на основе алюминия, магния, применяемых в авиации, более полное, чем в требованиях Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования для данного направления подготовки бакалавров.

В пособии изложены общие сведения о металлах и их сплавах, описана структура сплавов на основе алюминия и магния. Рассмотрены общие закономерности структурообразования при их затвердевании, деформации и термической обработке. Приведены диаграммы фазового равновесия двойных металлических систем, кратко описано строение фаз в металлических системах, рассмотрены свойства сплавов в связи с их фазовым состоянием и структурой. Также описаны физические и химические процессы, протекающие в сплавах при их получении, обработке и модифицировании.

1. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

1.1. Свойства алюминия

Алюминий – металл серебристо-белого цвета. Отличительная особенность алюминия небольшая плотность ($2,7 \text{ г/см}^3$), невысокая температура плавления (660°C), сравнительно небольшое электросопротивление, всего в 1,51 раза больше, чем у меди. Алюминий не имеет аллотропических превращений и кристаллизуется в решетке гранцентрированного куба с периодом $a = 4,041 \text{ \AA}$. В чистом виде алюминий является очень мягким пластичным металлом. Как химический элемент алюминий должен был бы медленно разлагать воду подобно кальцию, однако имеющаяся на его поверхности окисная пленка надежно защищает металл от взаимодействия как с водой, так и с кислородом воздуха. Благодаря этой прочной, очень тонкой и прозрачной окисной пленке алюминий способен длительное время сохранять блестящий вид. Он хорошо обрабатывается давлением, сваривается газовой и контактной сваркой, но плохо обрабатывается резанием. Литейные свойства алюминий не высоки (усадка затвердевания 6 %). Высокая теплота плавления и теплоемкость способствуют медленному остыванию алюминия из жидкого состояния, что дает возможность улучшать отливки из алюминия и его сплавов путем модифицирования, рафинирования и других технологических операций [1].

Чистый алюминий широко применяется в качестве электропроводящего материала; на его основе создано большое число сплавов, используемых, главным образом, в авиации. В последние годы алюминиевые сплавы активно внедряются в автомобилестроение, пищевую промышленность (упаковочный материал) и бытовую технику. Особенно бурно растет применение алюминия в строительстве как отделочного и декоративного материала, очень стойкого в условиях атмосферной коррозии.

Постоянные примеси алюминия Fe, Si, Cu, Zn, Ti. Промышленностью выпускается несколько сортов алюминия, различающихся общим содержанием примесей от 0,001 до 1,0%. В зависимости от содержания примесей алюминий бывает особой чистоты А999 (0,001% примесей), высокой чистоты А995, А99, А97, А95 (0,005 – 0,05 % примесей) и технической чистоты А85, А8 (0,15 – 1,0 % примесей). Технический алюминий, выпускаемый в виде деформируемого полуфабриката маркируется АД0 и АД1. Примеси понижают тепло- и электропроводность (рис.1), коррозионную стойкость и пластичность алюминия.



Рис. 1. Влияние примесей на электропроводность алюминия [2]

На рис.2 и 3 приведены зависимости предела прочности и удлинения технического алюминия от степени деформации и температуры отжига.

Основные естественные примеси в алюминии – железо и кремний. На диаграмме состояния алюминий – кремний (рис. 4) имеется эвтектическая точка при 577°С и 11,7% Si.

Растворимость кремния в твердом алюминии при этой температуре составляет 1,65 %. С понижением температуры до 200 °С она уменьшается до 0,05%.

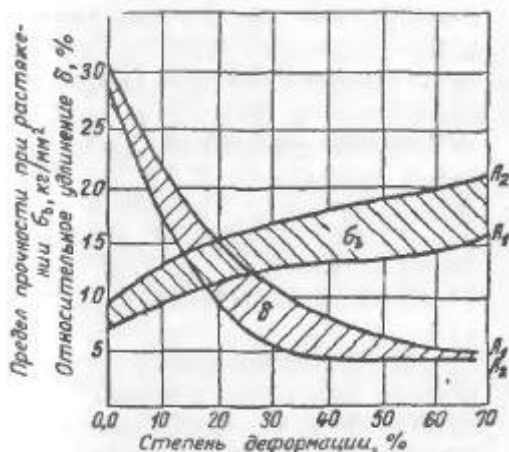


Рис. 2. Изменение предела прочности и относительного удлинения алюминия от степени деформации [2]

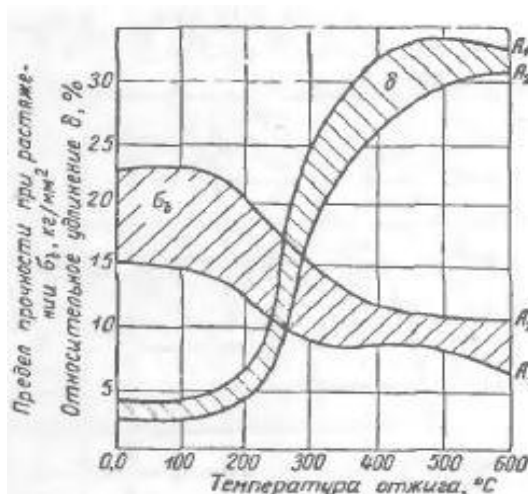


Рис. 3. Изменение предела прочности и относительного удлинения алюминия от температуры отжига [2]

Диаграмма состояния алюминий – железо сложная, с несколькими промежуточными фазами. Наиболее богатым алюминием является соединение FeAl_3 . Между ним и алюминием имеется эвтектическая точка при 655°C и 1,8% железа (рис.5). Растворимость железа в твердом алюминии при эвтектической температуре составляет 0,05 %, ниже 400°C она падает до нуля. Это означает, что в двойных доэвтектических сплавах алюминия с железом последнее всегда выделяется в виде включений фазы FeAl_3 , которые имеют либо эвтектическое происхождение, либо появляются из-за распада твердого раствора. Эвтектические выделения могут образовываться при значительно меньших концентрациях железа, чем 0,05% из-за неравновесной кристаллизации.

В алюминии, содержащем одновременно железо и кремний, кроме указанных фаз, характерных для двойных систем, могут появляться и сложные тройные соединения – $\alpha\text{-FeAlSi}$ и $\beta\text{-FeAlSi}$. Они могут появляться непосредственно при кристаллизации в случае больших содержаний примесей или в результате распада твердого раствора.

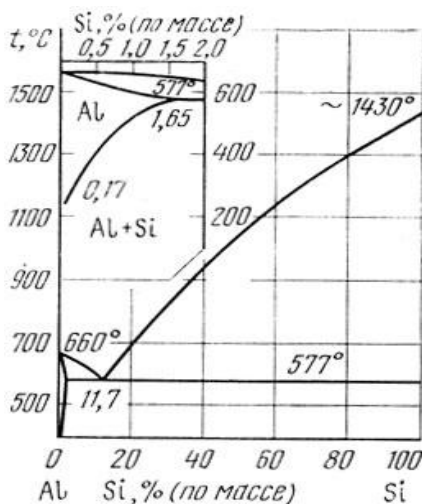


Рис. 4. Диаграмма состояния системы алюминий – кремний [1]

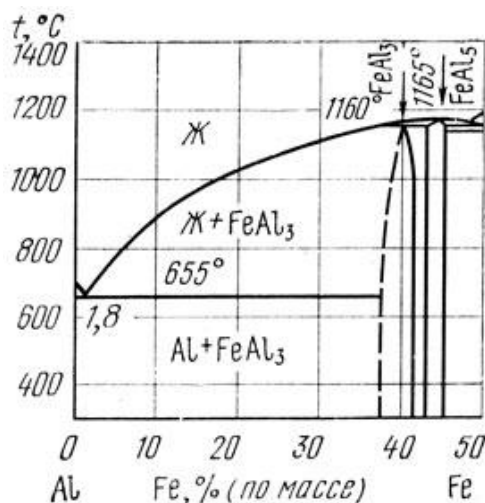


Рис. 5. Диаграмма состояния системы алюминий – железо [1]

Примеси железа и кремния в алюминии являются вредными, так как существенно снижают его пластические свойства. Обе эти примеси не только содержатся в первичном алюминии, их количество непрерывно увеличивается в алюминиевых сплавах при переплавах из-за взаимодействия с кремнеземом огнеупоров и стальным плавильным инструментом (ложками, скребками).

Особенность алюминия как основы сплавов состоит в том, что он ни с одним металлом не дает непрерывный ряд твердых растворов. Только в системе с цинком (рис. 6) при повышенных температурах имеется достаточно большая область твердых растворов. Сплавы этой системы образуют эвтектическую систему при температуре 382°C с богатой цинком эвтектикой при содержании 97-99 % Zn. Максимальная растворимость цинка в алюминии – 82,2 %. В области α -твердого раствора ниже температуры 391°C имеется разрыв. Обогащенная цинком α -фаза при температуре 275°C распадается с образованием эвтектической смеси алюминия с 31,6 %

Zn и цинка с 0,6 % Al. Далее растворимость цинка понижается и при температуре 100 °С она составляет всего 4 %.

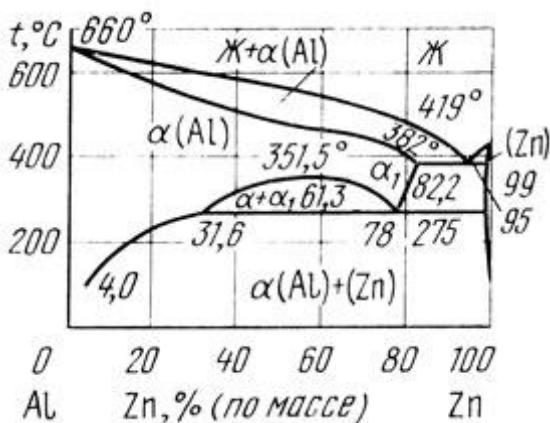


Рис.6. Диаграмма состояния системы алюминий – цинк [1]

В подавляющем большинстве случаев в двойных системах алюминий - металл появляются хрупкие промежуточные фазы. Следовательно, упрочнять алюминий посредством образования твердых растворов возможно лишь в ограниченной степени. Поэтому используют другой путь упрочнения - посредством образования частиц соединений в матрице твердого раствора. Этот путь неизбежно предопределяет использование термической обработки - закалки и старения. Ограниченность же области твердых растворов на основе алюминия вынуждает задавать такое содержание каждого легирующего компонента, которое не приводило бы к появлению излишнего количества хрупких промежуточных фаз.

1.2. Классификация алюминиевых сплавов

К преимуществам алюминиевых сплавов относятся высокая удельная прочность и способность сопротивляться инерционным и динамическим нагрузкам. Предел прочности

алюминиевых сплавов достигает 50-70 кгс/мм² при плотности не более 2,85 г/см³. По удельной прочности некоторые алюминиевые сплавы приближаются к высокопрочным сталям.

Большинство алюминиевых сплавов имеют хорошую коррозионную стойкость (за исключением сплавов с медью), высокие тепло- и электропроводность и хорошие технологические свойства.

В качестве основных легирующих элементов алюминиевых сплавов применяют Cu, Mg, Si, Mn, Zn; реже – Li, Ni, Ti, Be, Zr. Большинство легирующих элементов образуют с алюминием твердые растворы ограниченной растворимости и промежуточные фазы с алюминием и между собой (CuAl₂, Mg₂Si и другие).

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления, способности к термической обработке и свойствам (табл.1).

Деформируемые алюминиевые сплавы, как правило, содержат 2 – 3 и более легирующих компонентов в количествах от 0,2 до 2 – 4% каждого. Исключение составляет лишь двойной сплав АМц с 1,0 – 1,6% Mn. Марганец входит в состав большинства деформируемых алюминиевых сплавов в количестве 0,2 – 1,5%. Его назначение состоит в том, что он существенно замедляет рекристаллизацию, повышает температуру этого процесса и тем самым упрочняет сплав при повышенных температурах, измельчает рекристаллизованное зерно, входит в состав сложных соединений, которые придают сплавам жаропрочность.

Диаграмма состояния системы Al – Mn представлена на рис.7. Структура сплава АМц состоит из α - твердого раствора марганца в алюминии и вторичных выделений фазы MnAl₆ (рис.8).

В присутствии железа вместо MnAl₆ образуется сложная фаза (MnFe)Al₆, практически нерастворимая в алюминии, поэтому сплав АМц и не упрочняется термической обработкой.

Классификация алюминиевых сплавов

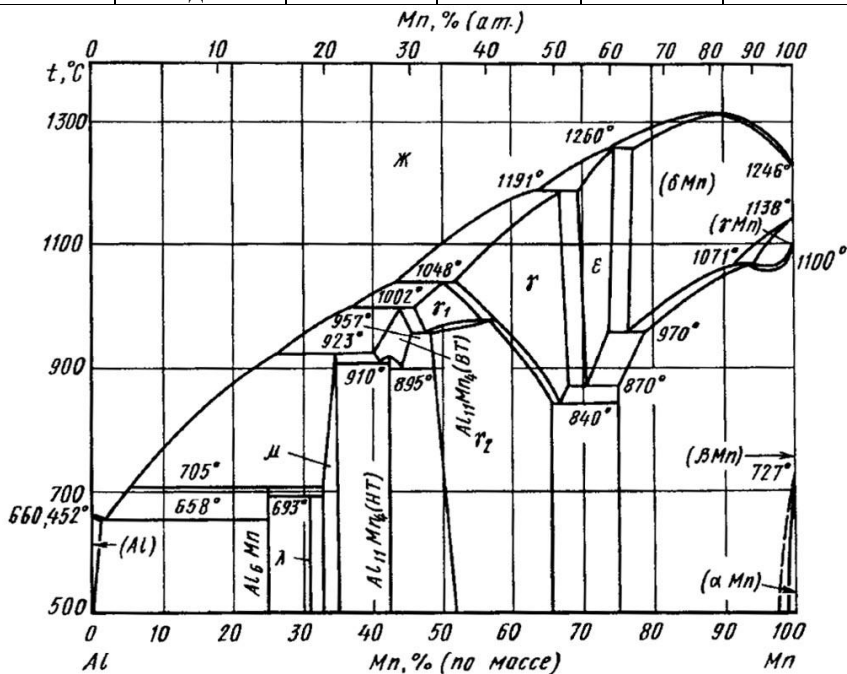


Рис.7. Диаграмма состояния системы Al – Mn [3]

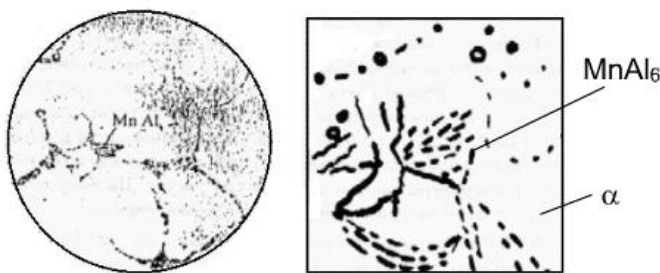


Рис.8. Микроструктура сплава АМц, х200 [4]

Состав данных сплавов имеет очень узкие пределы: 1 – 1,7 % Мп; 0,05 – 0,20 % Сu; медь добавляют в целях уменьшения питтинговой коррозии.

Допускается до 0,6 – 0,7 % Fe и 0,6 – 0,7 % Si, что приводит к некоторому упрочнению сплавов без существенной потери сопротивления коррозии.

При понижении температуры прочность быстро растет. Поэтому сплавы этой группы нашли широкое применение в криогенной технике.

Большинство деформируемых алюминиевых сплавов способно воспринимать закалку (без полиморфного превращения) и старение и в результате этого существенно упрочняться. Типичные легирующие компоненты рассматриваемых сплавов, кроме марганца, – медь, магний, кремний, цинк. В специальных жаропрочных сплавах содержатся железо, никель, хром, титан в количестве 0,2 – 1%. Во всех алюминиевых сплавах введение 0,1 – 0,2% титана вызывает сильное измельчение зерна в литом состоянии. Этот эффект частично сохраняется и после рекристаллизации. В некоторые сплавы вводят бериллий (0,001 – 0,002%) для уменьшения окисления при плавке.

На рис.9 и 10 представлены двойные диаграммы состояния алюминия с медью и магнием. В обоих случаях с повышением температуры наблюдается существенное изменение растворимости легирующих элементов в алюминии.

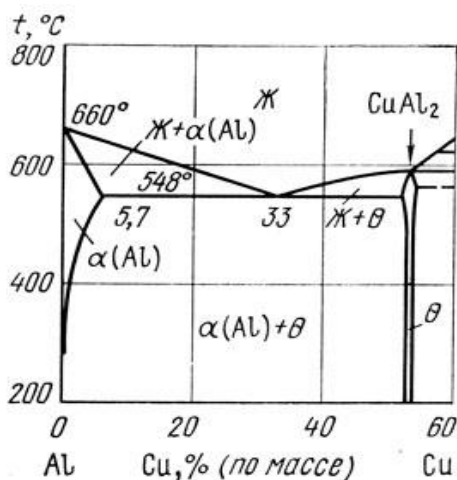


Рис.9. Диаграмма состояния системы алюминий – медь [5]

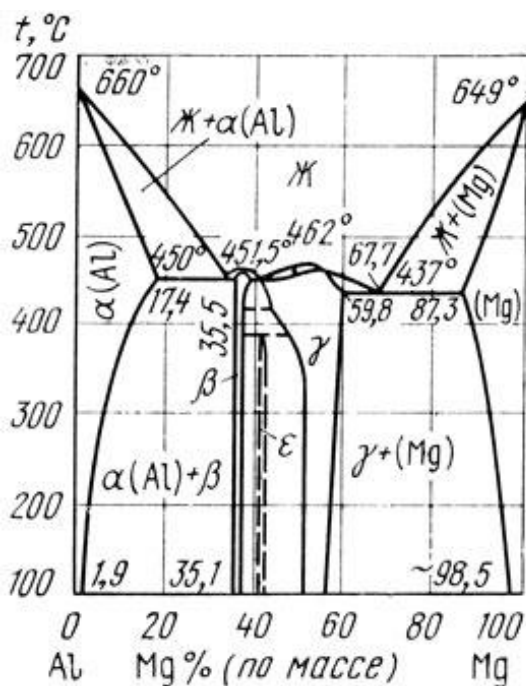


Рис.10. Диаграмма состояния системы алюминий – магний [5]

Типичными деформируемыми алюминиевыми сплавами являются так называемые дюралюмины – сплавы алюминия с медью, магнием и марганцем. Составы некоторых типичных деформируемых алюминиевых сплавов приведены в табл.2. Там же приведен состав по примесям одной из марок алюминия [7,8].

Таблица 2

Состав алюминиевых деформируемых сплавов

Марка сплава	Легирующие компоненты, % остальное Al						Примеси, % не более			
	Cu	Mg	Mn	Si	Zn	Прочие	Fe	Si	Cu	Zn
А5	-	-	-	-	-	-	0,3	0,3	0,02	0,06
АМц	-	-	1,0 - 1,6	-	-	-	0,7	0,6	0,2	0,1
АМг6	-	5,8 - 6,8	0,5 - 0,8	-	-	0,1 Ti; 0,001 Be	0,7	-	0,1	0,2
Д16 (дуралюмин)	3,8 - 4,9	1,2 - 1,8	0,3 - 0,9	-	-	-	0,2	0,25	-	0,1
АК8 (супердюралюмин)	3,9 - 4,8	0,4 - 0,8	0,4 - 1,0	0,6 - 1,2	-	-	0,3	-	-	0,1

Механические свойства указанных сплавов в различном состоянии приведены в табл.3.

Как видно, в результате легирования, нагартовки и термической обработки удастся в несколько раз повысить прочность (со 100 до 560 МПа) и твердость НВ (20 - 150) алюминия. У высокопрочных алюминиевых сплавов удельная прочность, т. е. отнесенная к плотности, оказывается больше, чем у сталей и других сплавов. Именно это и предопределяло их применение в летательных аппаратах.

Деформируемые алюминиевые сплавы, кроме закалки и старения, часто подвергают отжигу – гомогенизации. Это объясняется тем, что из-за неравновесной кристаллизации в спла-

вах возникает очень сильная дендритная ликвация и появляются неравновесные эвтектические составляющие. Особенно сильно ликвируют магний и медь. Так, по равновесной диаграмме состояния эвтектическая составляющая в сплавах алюминий - медь должна была бы появляться только при 5,65 % Cu, а она появляется уже при 1,6 – 2 % Cu.

Таблица 3

Механические свойства алюминия и некоторых деформируемых сплавов в различном состоянии

Марка сплава	Состояние	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	НВ
А5	Отоженный	80	60	30 - 40	70 - 90	25
	Нагартованный	150	120	5 - 10	50 - 60	35
АМц	Отоженный	130	50	20	70	30
	Нагартованный	220	180	5	50	55
АМг6	Отоженный	340	170	20	-	70
Д16	Отоженный	210	110	18	55	42
	Закаленный и естественно состаренный	450	330	17	30	105
АК8	Закаленный и искусственно состаренный	480	380	10	25	135
В95	Отоженный	260	130	13	-	-
	Закаленный и искусственно состаренный	560	530	8	12	150

Особенностью нагрева под закалку алюминиевых сплавов является необходимость очень строгого поддержания температуры ($\pm 5^\circ$), чтобы не допустить пережога (оплавления) и чтобы достичь наибольшего эффекта термической обработки. Так, сплавы Д16 и АК8 закаливают с температуры 495 – 505 °С, а сплав В95 – с 465 до 480 °С. Закалка проводится в воде. Алюминиевые сплавы после закалки подвергают естественному (20 °С, 4 – 5 суток) или искусственному старению. Искусственное старение в зависимости от состава сплава про-

водят при 120 – 195 °С 6 – 12 часов. Рекристаллизационный отжиг проводят при 300 – 350°С (чистый алюминий) и при 350 – 420°С (сплавы).

Как уже отмечалось, чистый алюминий обладает большой стойкостью против атмосферной коррозии. Сплавы алюминия, содержащие медь и цинк, значительно хуже в этом отношении. Двойные сплавы с марганцем и магнием (АМц и АМг) очень хорошо сопротивляются атмосферной коррозии.

Дюралюминием называют сплав Al-Cu-Mg-Mn. Маркируют его буквой Д и номером (например, Д1, Д16). Термическая обработка дюралюминия состоит из закалки и старения. Старение может быть как естественным (несколько суток), так и искусственным (10-20 часов при 150-200 °С). Микроструктура сплава Д1 в различных состояниях приведена на рис.11.

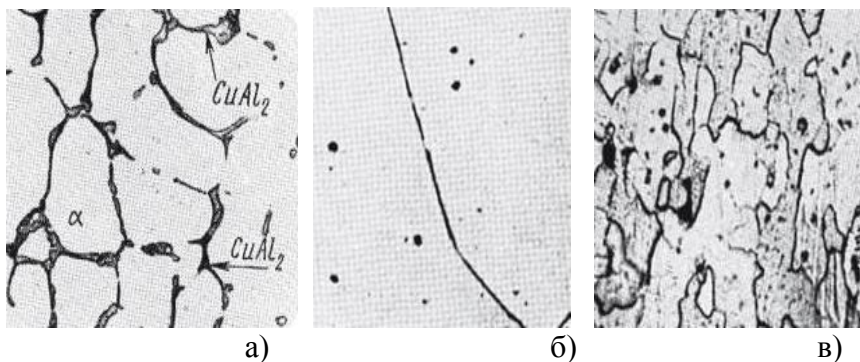


Рис.11. Микроструктуры дюралюмина Д1 [6]

а) в литом состоянии, $\times 250$ (видны дендриты алюминиевого твердого раствора (светлые) и фаза CuAl_2 (серая); фаза S и марганцовистая составляющая ввиду их малых количеств при данном увеличении не обнаруживаются;

б) закаленного дюралюмина, $\times 500$ (видны зерна алюминиевого твердого раствора и включения нерастворимых фаз;

в) состаренного дюралюмина, $\times 200$ (на шлифе кроме α – твердого раствора видны темные включения марганцовистой фазы)

Микроструктура сплава Д16 после закалки и старения приведена на рис.12,а.

После закалки в воде дуралюмины имеют невысокую твердость и прочность, но повышенную пластичность, лишь несколько сниженную по сравнению с отожженным состоянием. Пересыщенный по отношению к равновесному (отожженному) состоянию сплав является метастабильным и при длительном пребывании в области нормальных температур (естественном старении) или при сравнительно непродолжительном нагреве (искусственном старении) изменяет свое состояние, приближаясь к равновесному.

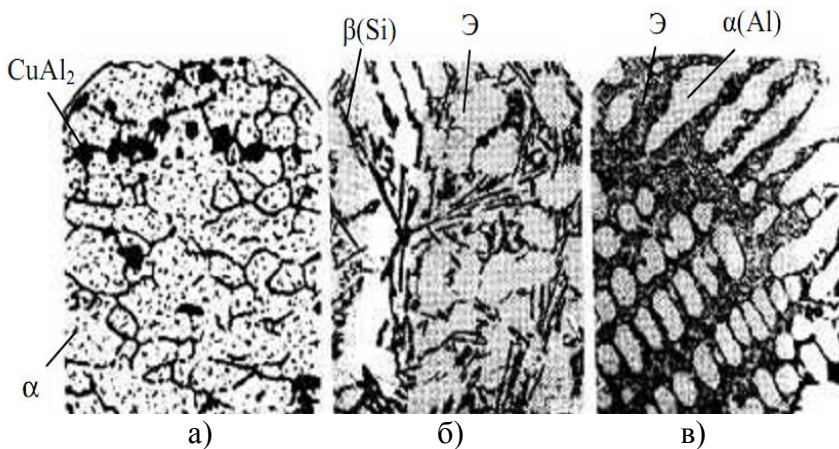


Рис.12. Микроструктуры алюминиевых сплавов, х300 [10]

а) дуралюмин Д16 после закалки и старения;

б) силумин АК12 до модифицирования;

в) силумин АК12 после модифицирования

Превращения при старении приводят к значительным изменениям свойств сплава: возрастают прочность и твердость при заметном понижении пластичности. Это происходит за счёт образования зон с резко повышенной концентрацией растворенного компонента (меди). Эти зоны носят название Гинье – Престона.

Дуралюмины получили широкое применение в авиационной промышленности. Например, Д1 – лопасти воздушных винтов, заклёпки, конструктивные элементы остова планеров; Д16 – обшивки клёпанных конструкций, длительно работающих при 80 °С, ограниченное время при 150 °С.

Литейные алюминиевые сплавы содержат почти те же легирующие компоненты, что и деформируемые, но в значительно большем количестве и на соответствующих диаграммах состояния литейные сплавы расположены ближе к эвтектическим концентрациям. Только такие сплавы обладают необходимыми литейными технологическими свойствами, позволяющими получать из них качественные фасонные отливки [5].

Многие литейные алюминиевые сплавы построены на основе системы алюминий – кремний (рис.4) и называются силуминами. Двойная эвтектика алюминий – кремний имеет очень грубую структуру, кремний выделяется в виде больших пластин, на шлифах – в виде игл (рис.13, а). Поэтому такие сплавы подвергают модифицированию, которое заключается в том, что в расплав перед разливкой вводят натрий, образующийся в результате обменной реакции с флюсом, содержащим фтористый натрий. Под действием тысячных долей процента натрия выделения кремния резко измельчаются (рис.13, б), а прочность и пластичность сплава возрастают.

Значительная группа алюминиевых литейных сплавов основана на тройной системе алюминий – кремний – медь и на двойной системе алюминий – магний. Особую группу составляют жаропрочные алюминиевые сплавы, содержащие 4 – 5% меди и небольшие добавки переходных металлов. Литейные свойства таких сплавов очень невысоки.

Многие алюминиевые литейные сплавы подвергают различным видам термической обработки.

Приняты следующие обозначения режимов термообработки: Т1 – старение (после литья без закалки), Т2 – отжиг, Т4 – закалка, Т5 – закалка и частичное старение, Т6 – закалка и полное старение до наибольшей твердости, Т7 – закалка и стабилизирующий отпуск, Т8 – закалка и смягчающий отпуск [9].

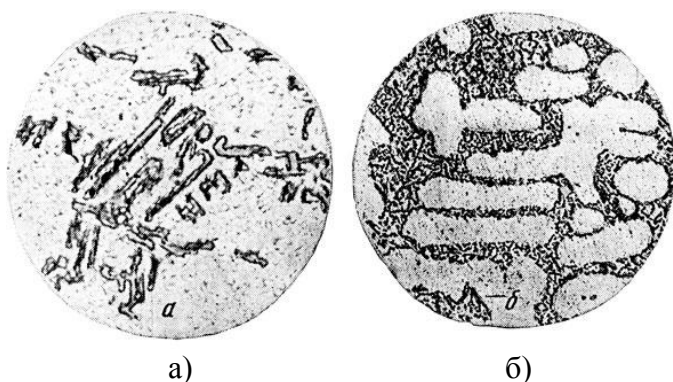


Рис.13. Микроструктура немодифицированного (а) и модифицированного (б) силумина с 7% Si, x200 [10]

Свойства алюминиевых литейных сплавов существенным образом зависят от способа литья, где решающую роль играет скорость охлаждения при затвердевании отливки и в процессе охлаждения (для сплавов, воспринимающих закалку). В общем случае увеличение скорости отвода тепла вызывает повышение прочностных и пластических свойств. Поэтому механические свойства отливок, полученных литьем в песчано-глинистые формы и по выплавляемым моделям, оказываются более низкими, чем при литье в кокиль, а при литье под давлением свойства настолько повышаются из-за очень резкого охлаждения, что, например, для силуминов оказывается ненужным модифицирование натрием. По этой же причине при литье в кокиль и под давлением допускается большее содержание вредной примеси железа.

В табл.4 приведены составы некоторых наиболее распространенных литейных алюминиевых сплавов, а в табл.5 - их механические свойства.

Сплав АЛ2 – простой двойной силумин эвтектического состава, не воспринимающий закалку. Термообработка его сводится к отжигу после литья для снятия напряжений.

Сплав АЛ4 – силумин доэвтектического состава, в который введен магний, что обеспечивает возможность закалки и старения в результате переменной растворимости соединения Mg_2Si в алюминии. Оба эти сплава подвергаются модифицированию натрием.

Таблица 4

Состав литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Легирующие компоненты, % (остальное Al)				Примеси, % не более					
	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Si	Mg	Cu	Zn	сумма
АЛ2	10 - 13	-	-	-	0,8 - 1,5	-	0,1	0,6	0,3	2,2 - 2,8
АЛ4	8 - 10	-	0,25 - 0,50	0,17 - 0,30	0,6 - 1,0	-	-	0,3	0,3	1,2 - 1,6
АЛ8	-	-	-	9,5 - 11,5	0,3	0,3	-	0,3	0,1	2,2
АЛ10В (АК8М7)	4 - 6	5 - 8	-	0,2 - 0,5	1,2 - 1,3	-	-	0,5 Mn	0,6	2,5 - 2,7
АЛ19	-	4,5 - 5,3	0,6 - 1,0	0,15 - 0,35 Ti	0,2	0,3	0,05	-	0,2	0,8 - 1,0

Сплав АЛ10В (АК5М7) построен на основе системы алюминий - кремний - медь с добавками магния. Закалка и старение сплава обеспечиваются переменной растворимостью в алюминии сложных соединений, а хорошие литейные свойства – достаточным количеством двойной эвтектики Al-Si и тройной эвтектики Al-Si-CuAl₂.

Сплав АЛ8 является практически двойным сплавом алюминия с магнием. Он по составу находится далеко от эвтектической точки, имеет большой интервал кристаллизации и поэтому обладает невысокими литейными свойствами. Однако хорошие механические свойства – пониженная плотность (2,55 г/см³), отличная коррозионная стойкость – обуславливают достаточно широкое его применение. Увеличение содержания магния и приближение к эвтектическому составу позволило бы улучшить литейные свойства, однако при этом

становится невозможной обычная плавка без покровных флюсов, так как расплав сильно окисляется.

Сплав АЛ 19 - это типичный высокожаропрочный материал, способный работать при 300°C.

Микроструктура литых доэвтектических силуминов состоит из светлых дендритов α - твердого раствора кремния в алюминии и двойной эвтектики $\alpha + \text{Si}$ игольчатого типа, рис.14, а (т.к. растворимость Al в Si при комнатной температуре составляет 0,05 % , допустимо считать, что в структуре сплавов при низких температурах присутствует не α – твердый раствор, а кремний).

Микроструктура сплава эвтектического состава состоит из эвтектики $\alpha + \text{Si}$. При обычном способе литья эта эвтектика имеет грубое строение (рис.14, б). Кремний в ней находится в виде грубых игл.

В силуминах заэвтектического состава первично кристаллизуются многогранные кристаллы Si светло – серого цвета (рис.14,в). Кремний хрупок, поэтому силумины имеют низкие механические свойства ($\sigma_{\text{в}}=120 - 160$ МПа, $\delta = 1 - 2\%$).

Чтобы избавиться от грубой эвтектики и первичных кристаллов, сплавы модифицируют, т.е. перед разливкой в расплав вводят небольшое количество натрия (0,05 – 0,08 % к массе сплава) или кальция, бора. В результате модифицирования увеличивается концентрация кремния в эвтектике (с 11,7 % до 15 %) и сплавы переохлаждаются относительно равновесно эвтектической температуры 577 °С. Силумины заэвтектического состава, содержащие 11,7 – 15 % Si, становятся доэвтектическими, и в их структуре вместо первичных хрупких кристаллов кремния имеются дендриты пластического α - твердого раствора (рис.8, г). Переохлаждение приводит к формированию в структуре мелкозернистой эвтектики.

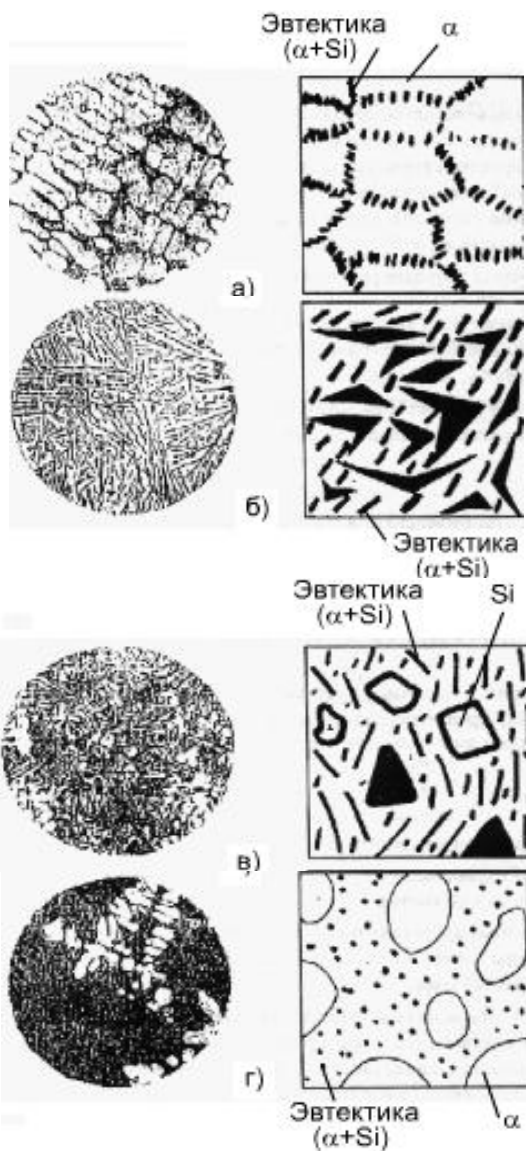


Рис.14. Микроструктура силуминов: а) доэвтектический, б) эвтектический, в) заэвтектический, г) модифицированный (справа – схематическое изображение микроструктур) [4]

Модифицирование улучшает не только механические свойства силуминов ($\sigma_b = 170 - 200$ МПа, $\delta = 3 - 5$ %), но и литейные. Модифицированные силумины хорошо свариваются и имеют высокую коррозионную стойкость. Для повышения прочности двойные силумины легируют магнием, медью и подвергают термической обработке [11–13].

По назначению конструкционные литейные алюминиевые сплавы условно делятся на следующие группы:

- 1) сплавы, отличающиеся высокой герметичностью (АК12 (микроструктура приведена на рис.11 б, в), АК8);
- 2) высокопрочные жаропрочные сплавы (АМ5, АК5М);
- 3) коррозионностойкие сплавы (АМг10; АЦ4Мг).

Таблица 5

Механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Состояние	σ_b , МПа	δ , %	НВ
АЛ2	Литой модифицированный	150	4	50
	Модифицированный и термически обработанный по Т2 (отжиг при 300 ± 10 °С 3 ч)	140	4	50
АЛ4	Литой немодифицированный	150	2	50
	Модифицированный и термически обработанный по Т6 (закалка с 535 ± 5 °С в воду, отжиг при 175 ± 5 °С, 15 ч)	230	3	70
АЛ8	Термически отработанный по Т4 (закалка в масле после выдержки при 430 ± 5 °С, 20 ч)	290	9	60
АЛ10В (АК5М7)	Литой в песчано-глинистую форму	130	-	80
	Литой в кокиль	160	-	80
	Литой в песчано-глинистую форму, термически обработанный по Т1 (старение при 175 °С, 10 ч)	150	-	80
	Литой в кокиль, термически обработанный по Т1 (старение при 175 °С, 10 ч)	170	-	90
АЛ19	Термически обработанный по Т5 (закалка с 545 ± 5 °С после выдержки 10 ч в воду и старение при 175 ± 5 °С, 5 ч)	340	4	90

Во всех литейных алюминиевых сплавах допускается 0,8 - 1,2 % железа как примеси, неизбежно попадающей в металл при переплавках. Поэтому во всех сплавах оговорено содержание марганца, который ослабляет вредное действие железа, переводя игольчатые выделения железной составляющей в компактные.

Литейные алюминиевые сплавы легируют большим количеством добавок, чем деформируемые сплавы.

Содержание добавок в литейных сплавах таково, что в литом сплаве образуется эвтектика, которая, как правило, повышает жидкотекучесть, плотность отливки и увеличивает сопротивление сплава усадочным напряжениям.

Сплавы с большим количеством кремния обычно имеют игольчатую эвтектику, но при добавке в жидкий сплав незначительного количества модификатора (металлический натрий, смесь фтористого натрия и хлористого натрия), значительно улучшается структура сплава, так как эвтектика становится мелкозернистой.

Силумины хорошо поддаются сварке и почти не дают трещин от усадочных напряжений, что объясняется малым интервалом кристаллизации. Большой недостаток силуминов – склонность к образованию окисных пленок (отчего повышается брак отливок), а также невысокая механическая прочность и плохая обрабатываемость резанием. Как и многие литейные сплавы, силумин очень чувствителен к загрязнению железом: уже незначительное увеличение содержания железа в силумине (на 0,1 – 0,2%) приводит к резкому снижению относительного удлинения (в 2 – 3 раза).

Механические свойства силуминов существенно ниже механических свойств деформируемых сплавов, что является следствием более грубой структуры силуминов.

Антифрикционные двойные сплавы на основе алюминия, содержащие сурьму, олово, медь, свинец в количестве 3 – 6 % предназначены для вкладышей подшипников скольжения. Алюминиевые сплавы этого типа получают в виде слоя на

стальной ленте обработкой давлением. Вкладыши из сплава алюминий - свинец получают методом порошковой металлургии.

Диаграмма состояния системы Al- Pb представлена на рис.15.

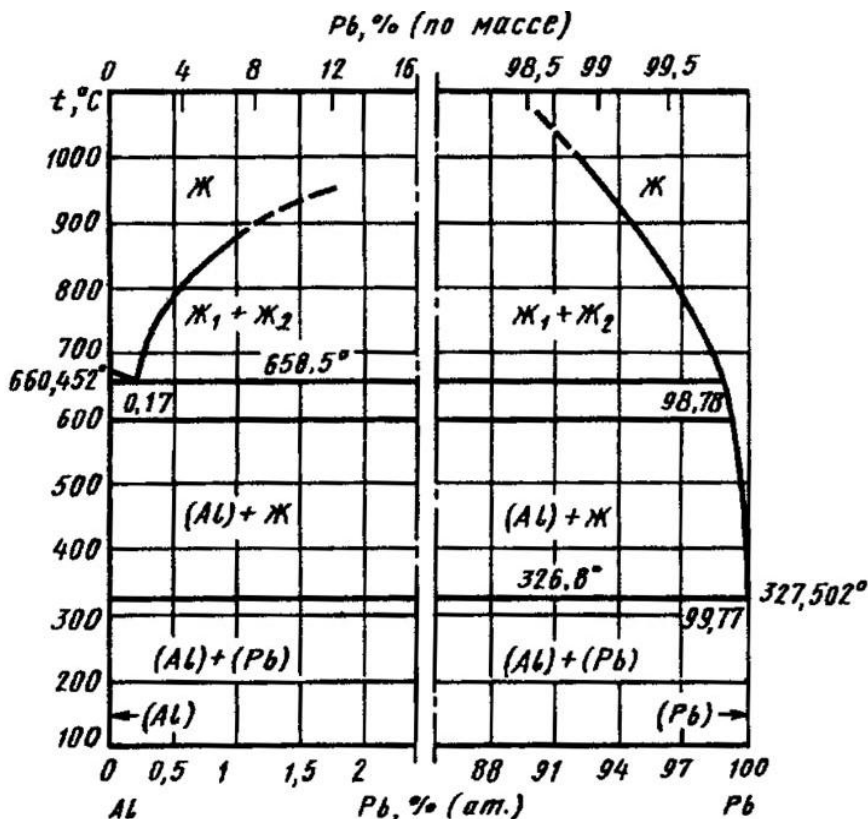


Рис.15. Диаграмма состояния системы Al – Pb [3]

Характерной особенностью антифрикционных алюминиевых сплавов (как и вообще антифрикционных сплавов) является двухфазная структура, причем фазы обладают существенно разной твердостью. В процессе работы, при трении с шейкой стального вала, мягкая фаза вырабатывается сильнее и

образующиеся зазоры служат естественными каналами, по которым смазка распределяется по всей поверхности трения.

В сплаве алюминия с сурьмой и медью твердой фазой являются соединения $AlSb$ и $CuAl_2$, а мягкой – сам алюминий.

В сплавах с оловом и свинцом именно эти металлы образуют мягкие прослойки по границам более твердых зерен алюминия.

В сплаве системы $Al - Pb$ с понижением температуры происходит разделение компонентов уже в расплаве с образованием двух жидких фаз (рис.15). Затвердевание начинается практически при температуре плавления алюминия и заканчивается при температуре плавления легирующего элемента (моноэвтектическая кристаллизация).

В сплавах систем $Al - Ti$ (рис.16,а), $Al - Cr$ (рис.16,б) растворимость элементов составляет десятые доли процента.

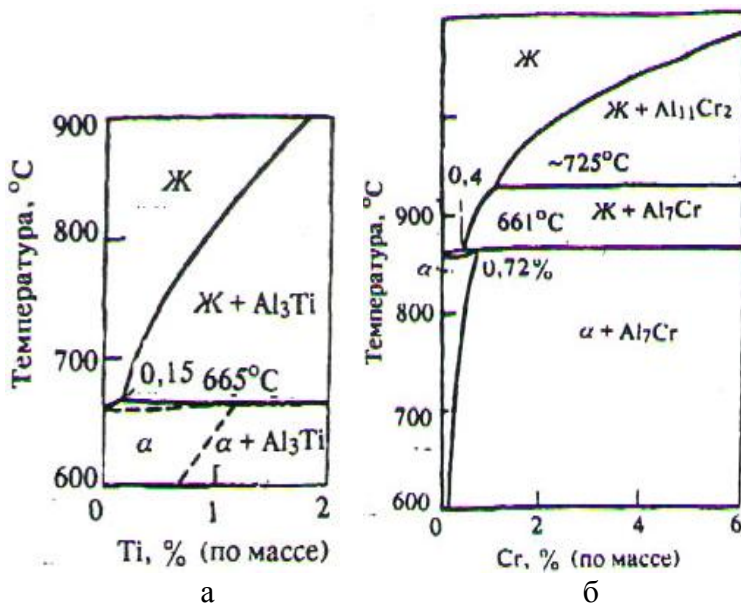


Рис.16. Диаграмма состояния системы $Al - Ti$ (а); $Al - Cr$ (б) [3]

1.3. Двойные диаграммы алюминиевых сплавов

1.3.1. Диаграмма состояния системы алюминий-литий (Al – Li)

Диаграмма состояния Al – Li (рис.17) характеризуется образованием трех соединений.

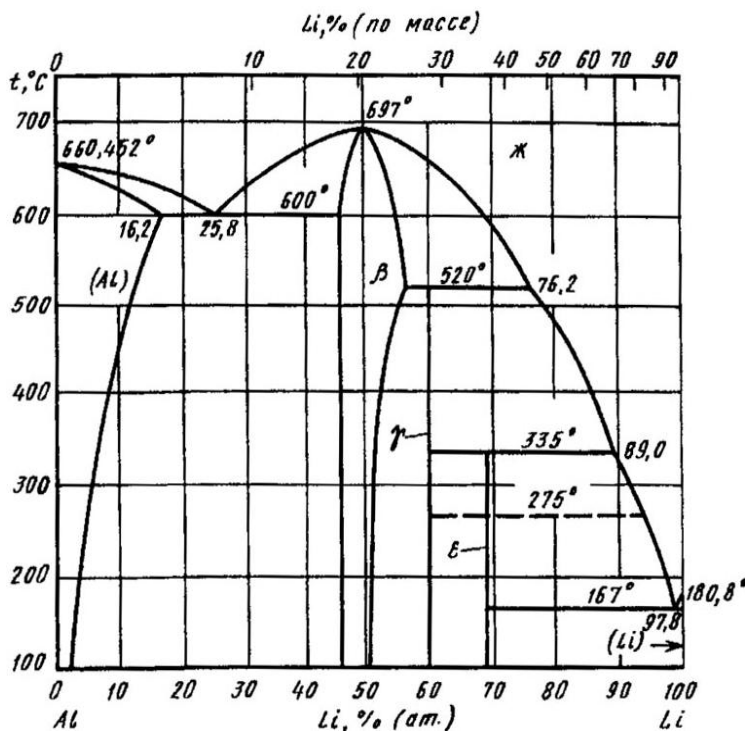


Рис.17. Диаграмма состояния Al – Li [3]

Соединение AlLi (β – фаза) плавится конгруэнтно при 697°C . Соединения Al_2Li_3 (γ – фаза) и Al_4Li_9 (ϵ – фаза) образуются по перитектическим реакциям при температурах 520 и 335°C , соответственно. Для соединения Al_2Li_3 ранее была принята формула AlLi_2 . Соединение Al_4Li_9 (ϵ – фаза) претерпевает полиморфное превращение при температуре -275°C .

Со стороны Al и со стороны Li в системе имеют место эвтектические превращения при температурах 600 и 167 °С, соответственно.

Для эвтектического превращения со стороны Al определялись также значения температуры в пределах 590 – 602 °С и концентрации эвтектической точки в пределах 22,5 – 30 % (ат.) Li. Температура кристаллизации соединения AlLi составляет 718 С или 660,4 °С по разным источникам. Температура перитектического превращения с образованием соединения AlLi₂ равна 521 С, концентрация Li в жидкой фазе 78 % (ат.).

1.3.2. Диаграмма состояния системы алюминий – кремний (Al – Si)

Диаграмме состояния Al – Si посвящено большое число исследований (рис.18).

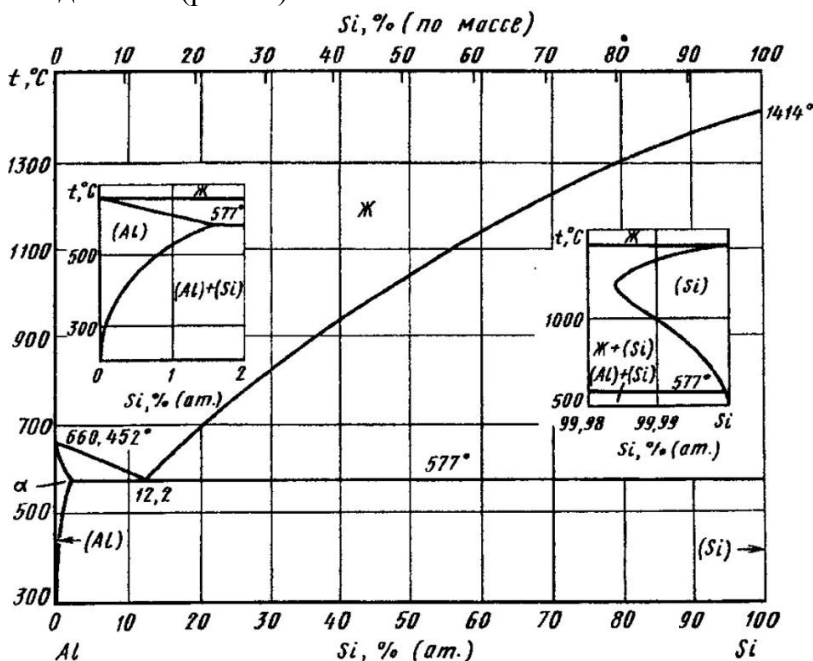


Рис.18. Диаграмме состояния Al – Si [3]

Эта система относится к простому эвтектическому типу с небольшой растворимостью компонентов друг в друге в твердом состоянии. Многочисленные результаты различных исследований хорошо согласуются между собой. Представленная на рис.18 диаграмма состояния является обобщением результатов ряда работ. На вставках показана растворимость компонентов в твердом состоянии на основе Al и на основе Si. Максимальная растворимость Si в твердом (Al) составляет $1,5 \pm 0,1$ % (ат.) при эвтектической температуре 577°C . Растворимость Al в (Si) носит ретроградный характер, максимальное ее значение равно $0,016 \pm 0,003$ % (ат.) при температуре 1190°C . Эвтектическая точка расположена при содержании $12,2 \pm 0,1$ % (ат.) Si.

1.3.3. Диаграмма состояния системы алюминий – никель (Al – Ni)

В сплавах системы образуется пять соединений, имеющих формулы: Al_3Ni , Al_3Ni_2 , AlNi (β), AlNi_3 (α'), Al_3Ni_5 (рис.19).

В сплавах системы образуется пять соединений, имеющих формулы: Al_3Ni , Al_3Ni_2 , AlNi (β'), AlNi_3 (α'), Al_3Ni_5 .

Соединение Al_3Ni имеет постоянный состав, остальные соединения – существенные области гомогенности.

Соединение AlNi плавится конгруэнтно, Al_3Ni_2 , AlNi , AlNi_3 – по перитектическим реакциям.

Соединение Al_3Ni_5 образуется при температуре 700°C и имеет область гомогенности 32 – 36 % (ат.) Al.

Соединение AlNi_3 в ряде случаев обозначается так же, как γ' - фаза.

Соединение Al_3Ni_2 ранее неточно обозначалось как Al_2Ni . Со стороны Al в системе имеет место эвтектическое превращение, температура которого по данным различных авторов колеблется в пределах $630 - 640^\circ\text{C}$, а концентрация эвтектической точки – в пределах 2,5 – 3,06 % (ат.).

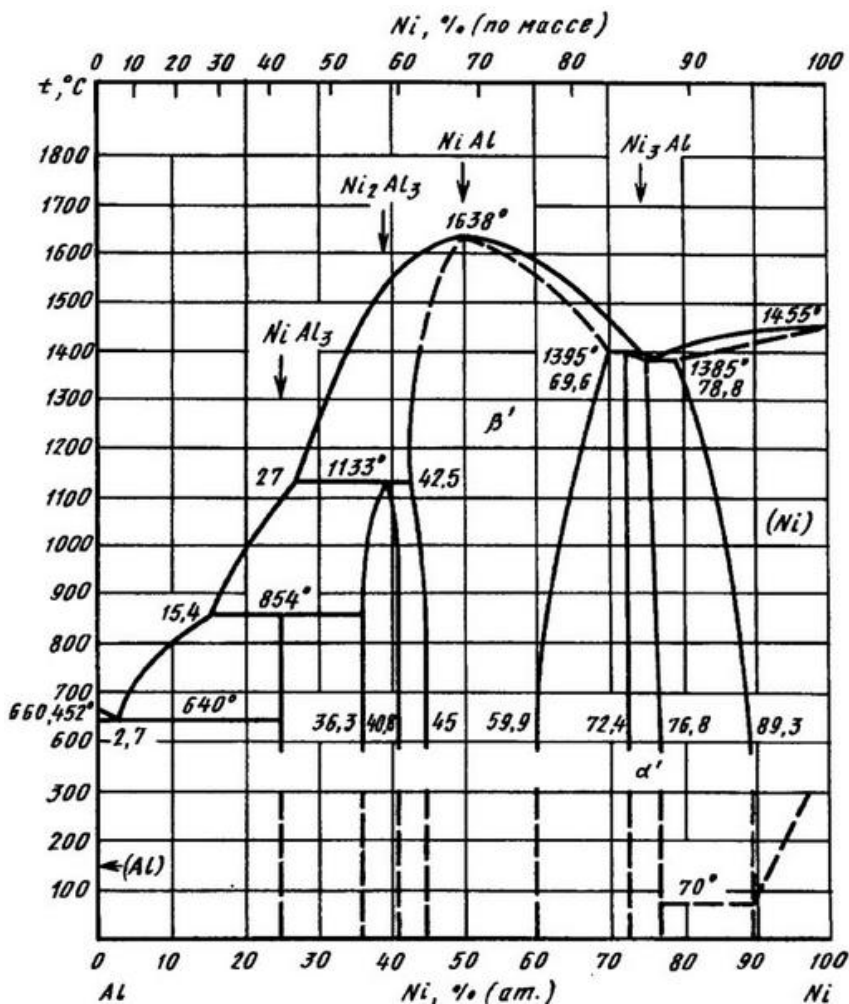


Рис.19. Диаграмме состояния Al-Ni [14]

Температура перитектического превращения, при котором образуется соединение Al_3Ni , определена равной 854°C , а концентрация жидкой фазы, участвующей в этом превращении, 15,1 и 15,3 % (ат.) [28 или 28,4 % (по массе)] Ni. Соединение Al_2Ni_3 образуется при температуре 1133°C . Темпера-

тура перитектической реакции образования фазы Al_3Ni_2 по другим источникам составляет 1132°C , а фазы Al_3Ni – 842°C .

Со стороны Ni неинвариантное превращение при 1385°C является эвтектическим, а при температуре 1395°C – перитектическим. При последнем превращении образуется соединение Al Ni_3 .

Добавка Al к Ni снижает температуру магнитного превращения до 70°C .

1.3.4. Диаграмма состояния системы алюминий – бериллий (Al – Be)

Установлена полная смешиваемость в жидком состоянии и отсутствие соединений. На рис.20 приведена диаграмма состояния, построенная во всем интервале составов по данным термического и микроскопического анализов. Она характеризуется наличием эвтектики из двух предельных твердых растворов на основе Al и Be.

Координаты эвтектики и значения растворимости компонентов друг в друге неоднозначны. Для температуры эвтектики указаны значения $644 - 647^\circ\text{C}$, а для содержания Be в эвтектике $1,5\% \text{ (ат.)}$ [$0,5\% \text{ (по массе)}$] – $4,1\% \text{ (ат.)}$ [$1,4\% \text{ (по массе)}$] Be.

Растворимость Be в (Al) составляет $0,02 - 0,03\% \text{ (ат.)}$ Be при температуре 600°C , $0,005 - 0,1\% \text{ (ат.)}$ Be при температуре 500°C и практически равна нулю при более низких температурах. Растворимость Al в (Be) по данным локального рентгеноспектрального анализа принята равной $0,02\% \text{ (ат.)}$ [$0,05\% \text{ (по массе)}$].

Установлено, что в сплавах, богатых Al, протекает не эвтектическая, а перитектическая реакция $\text{Ж} + (\text{Be}) \leftrightarrow (\text{Al})$. При этом линия ликвидуса в области твердого раствора на основе Al имеет минимум при $0,6\% \text{ (по массе)}$ Be. Растворимость Be в твердом (Al) составляет $0,25; 0,15; 0,007\% \text{ (по массе)}$, соответственно, при температурах $630, 600$ и 560°C .

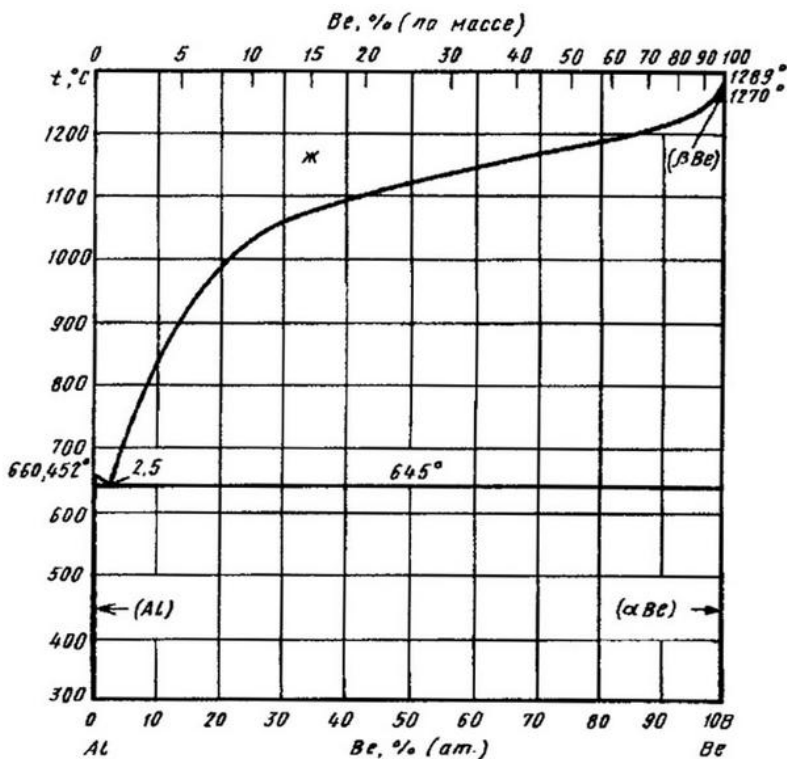


Рис.20. Диаграмме состояния Al – Be [15]

1.3.5. Диаграмма состояния системы алюминий – кальций (Al – Ca)

Диаграмма состояния Al – Ca построена по результатам термического, микроскопического исследований и измерения электросопротивления в зависимости от температуры (рис.21). Для исследования использовали Al с содержанием 0,3 % (по массе) Fe, 0,3 % (по массе) Si и Ca с содержанием 0,14 % (по массе) Fe, 0,11 % (по массе) Si, 0,15 % (по массе) Al и 1,17 % (по массе) Mg.

В системе существуют два соединения Al_4Ca и Al_2Ca .

Соединение Al_2Ca плавится конгруэнтно при температуре 1079°C .

Соединение CaAl_4 образуется по перитектической реакции $\text{Ж} + \text{Al}_2\text{Ca} \leftrightarrow \text{Al}_4\text{Ca}$ при температуре 700°C .

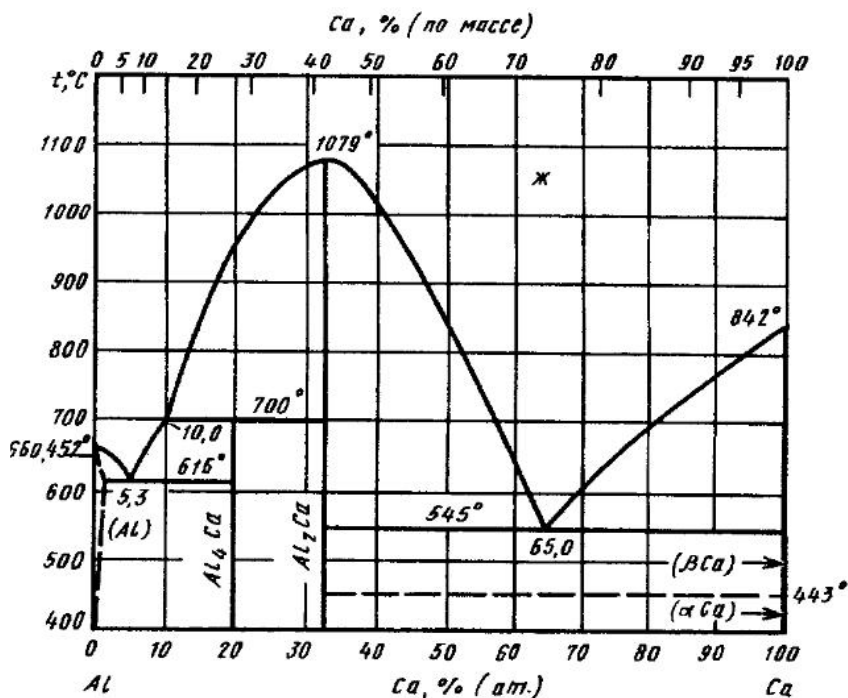


Рис.21. Диаграмме состояния Al – Ca [14]

Эвтектика, богатая Al, определена при температуре 616°C и содержании 5,3 % (ат.) Ca, а эвтектика, богатая Ca, существует при температуре 545°C и содержании 65,0 % (ат.) Ca. Растворимость Ca в Al составляет 0,4 % (ат.) Ca при температуре 616°C и 0,2 % (ат.) Ca при комнатной температуре.

Соединение AlCa имеет объемно центрированную тетрагональную решетку типа BaAl_4 с параметрами решетки $a = 0,436 \text{ нм}$, $c = 1,109 \text{ нм}$, $c/a = 2,54$. Соединение Al_2Ca имеет структуру типа MgCu_2 с параметром решетки $a = 0,8038 \text{ нм}$.

1.3.6. Диаграмма состояния системы алюминий – кобальт (Al – Co)

Система Al – Co характеризуется образованием нескольких соединений. Диаграмма состояния Al – Co (рис.22), базирующаяся на обзоре значительного числа исследований, в отдельных частях была построена предположительно в связи с отсутствием или противоречивостью имеющихся данных.

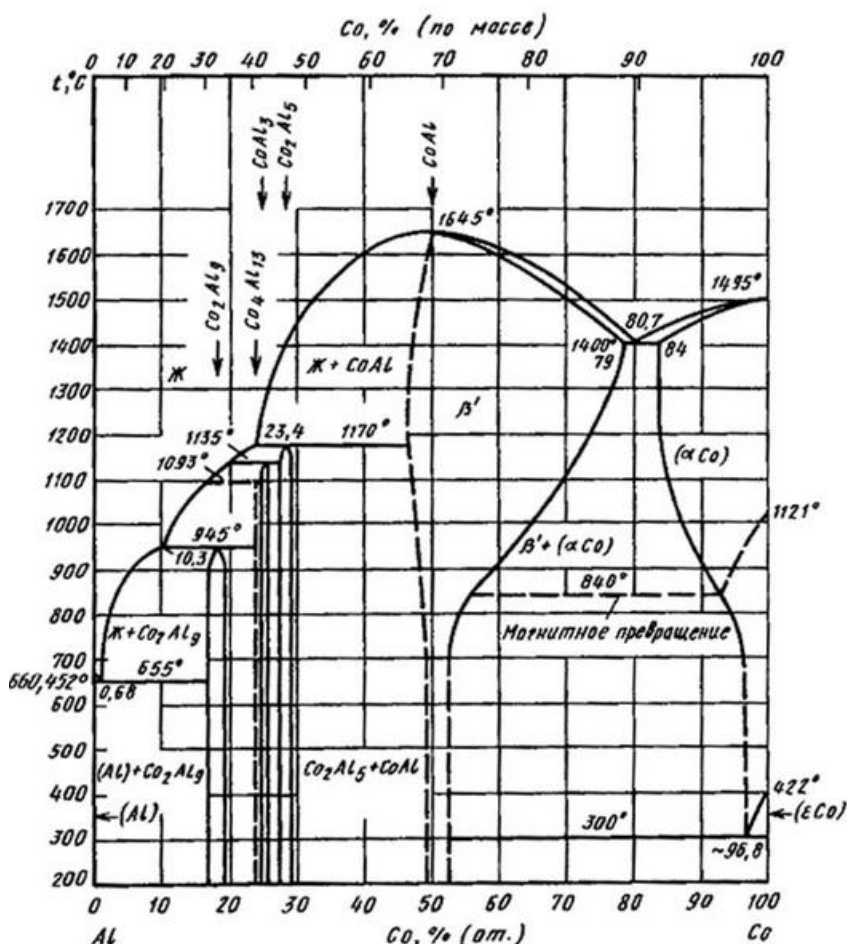


Рис.22. Диаграмме состояния Al – Co [3]

Установлено образование в системе четырех соединений: Co_2Al_9 , $\text{Co}_4\text{Al}_{13}$, CoAl_3 и Co_2Al_5 . Соединение CoAl плавится конгруэнтно при температуре 1645 °С. Остальные соединения Co_2Al_9 , $\text{Co}_4\text{Al}_{13}$, CoAl_3 и Co_2Al_5 образуются по перитектическим реакциям. Концентрации жидкой фазы при образовании соединений Co_2Al_9 и Co_2Al_5 равны 10,3 и 23,4 % (ат.) Со соответственно.

Области гомогенности фаз, определенные на медленно охлажденных от высоких температур сплавах, расположены для соединений Co_2Al_9 – от 17,3 до 19,2 % (ат.) Со, CoAl_3 – от 24,3 до 25,2 % (ат.) Со, Co_2Al_5 – от 27,5 до 28,8 % (ат.) Со и CoAl – от 49,3 до 53,8 % (ат.) Со.

Растворимость Со в (Al) при эвтектической температуре не превышает 0,009 % (ат.). Растворимость Al в (εСо) также практически равна нулю.

1.3.7. Диаграмма состояния системы алюминий – титан (Al –Ti)

На основании первых исследований была предложена диаграмма состояния Al – Ti (рис.23), которая характеризовалась наличием широких областей твердых растворов на основе α и βTi и соединения $\text{TiAl}(\gamma)$. Соединение TiAl_3 практически не имеет область гомогенности. Дальнейшие исследования показали, что в твердом состоянии протекают процессы упорядочения, связанные с образованием новых промежуточных фаз. Считается вероятным существование соединений Ti_3Al , Ti_2Al , TiAl_6 и TiAl_2 . Однако более поздние исследования подтвердили существование только двух соединений Ti_3Al , TiAl_2 , кроме уже известных TiAl , TiAl_3 .

Твердый раствор на основе соединения Ti_3Al получил символ α_2 . Характер и температуры образования соединения Ti_3Al и TiAl_2 , а также положения границ фазовых областей $(\alpha\text{Ti})/(\alpha\text{Ti}) + \alpha_2$ в течение длительного времени не получали у исследователей единого мнения.

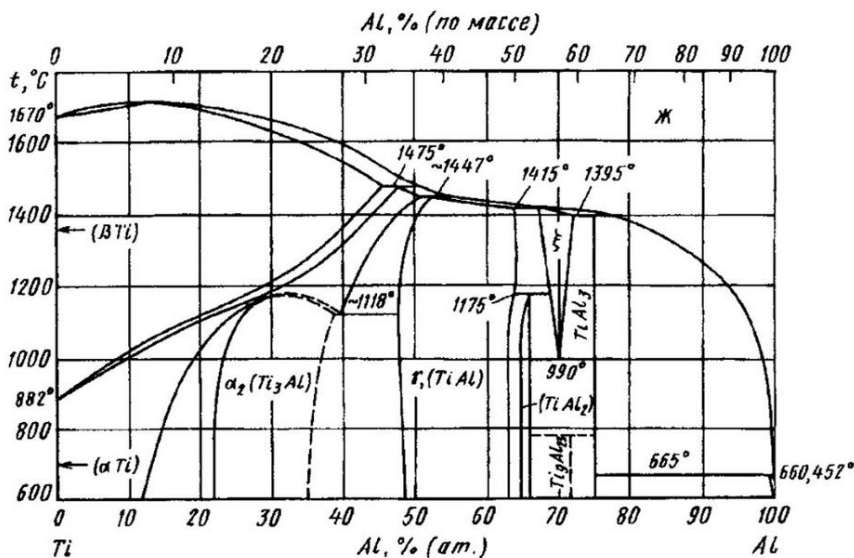


Рис.23. Диаграмме состояния Al – Ti [15]

Согласно данным рентгеновского, микроструктурного и других анализов соединение Ti_3Al образуется по реакции $(\beta Ti) \leftrightarrow Ti_3Al$ при температуре $1125^\circ C$.

По данным дифференциального термического и электронно-микроскопического анализов, соединение $TiAl$ образуется при упорядочении (αTi) в интервале температур $850 - 1180^\circ C$. По данным работы возможно существование двух модификаций фазы $TiAl_2$. Высокотемпературная фаза δ образуется по перитектической реакции при температурах выше $1400^\circ C$ и распадается по эвтектиoidной реакции при температурах выше $1000^\circ C$ на смесь $TiAl_2$ и $TiAl_3$.

1.3.8. Диаграмма состояния системы алюминий – цинк (Al – Zn)

Температуры чистых металлов приведены согласно существующим стандартам. В системе наблюдаются два нонвариантных равновесия: эвтектическое – $Ж \leftrightarrow (Al) + \beta$ при тем-

пературе 382 °С и монотектоидное $\alpha_1 \leftrightarrow \alpha + \beta$ при температуре 275 °С, где α и α_1 – твердые растворы на основе Al, β – твердый раствор на основе (Zn) (рис.24).

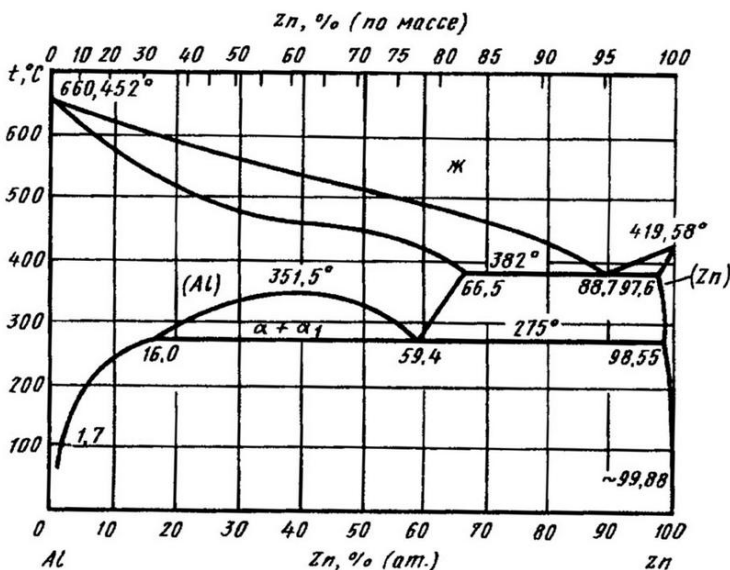


Рис.24. Диаграмме состояния Al – Zn [3]

Критическая точка на бинальной кривой, ограничивающей двухфазную область $\alpha + \alpha_1$ имеет координаты 351,5 °С и 39,5 % (ат.) Zn. В работах диаграмма состояния Al – Zn рассчитана с использованием термодинамических данных. По данным работы различие между рассчитанными и экспериментальными значениями температур ликвидуса и солидуса не превышает $\pm 1,5$ °С, а температур монотектоидного превращения и начала расслаивания твердого раствора на две фазы ± 3 °С. Максимальная растворимость Al в (Zn) при эвтектической температуре 382 °С составляет 2,5 % (ат.), а растворимость Zn в (Al) – 33,5 % (ат.). При старении закаленных сплавов, содержащих 6 – 30 % (ат.) Zn, обнаружено расслоение твердого раствора Al.

1.4. Сплавы тройных систем алюминия

1.4.1. Сплав системы Al – Mg – Si

Сплав системы Al – Mg – Si состоит из двух тройных эвтектик. Тройная эвтектика Al-Mg₂Si-Si, содержащая 12 % Si и 5 % Mg, плавится при температуре 555 °С.

Эвтектика Al – Mg₂ Si – Al₆Mg₂ с температурой плавления 451 °С почти не отличается от двойной системы Al-Al₃Mg₂. Линия ликвидуса, соединяющая обе тройные эвтектические точки, переходит через максимум при температуре 595 °С точно по квазибинарному сечению (8,15 % Mg и 4,75 % Si). Благодаря избытку магния (по отношению к Mg₂Si) растворимость кремния в α-твердом растворе сильно уменьшается. Сплавы Al – Mg, особенно литейные, содержат несколько десятых процента кремния и поэтому относятся к частичной системе Al-Mg₂Si-Al₃Mg₂.

На рис.25 приведены алюминиевые углы диаграммы Al–Mg – Si. Концентрации, отвечающие точкам A, B, C, D и E, приведены в табл.6 .

Таблица 6

Изменение концентрации алюминиевого твердого раствора, в зависимости от температуры

t. °C	A, Mg	B		C		D		E, Si
		Mg	Si	Mg	Si	Mg	Si	
595	-	-	-	1,17	0,68	-	-	-
577	-	-	-	1,10	0,63	-	-	1,65
552	-	-	-	1,00	0,57	0",83	1,06	1,30
527	-	-	-	0,83	0,47	0,6	0,8	-
502	-	-	-	0,70	0,40	0,5	0,65	0,80
452	17,4	15,3	0,1	0,48	0,27	0,3	0,45	0,48
402	13,5	11	0,0x	0,33	0,19	0 22	0,3	0,29
302	6,7	5	0,0x	0,19	0,11	0,1	0,15	0,06

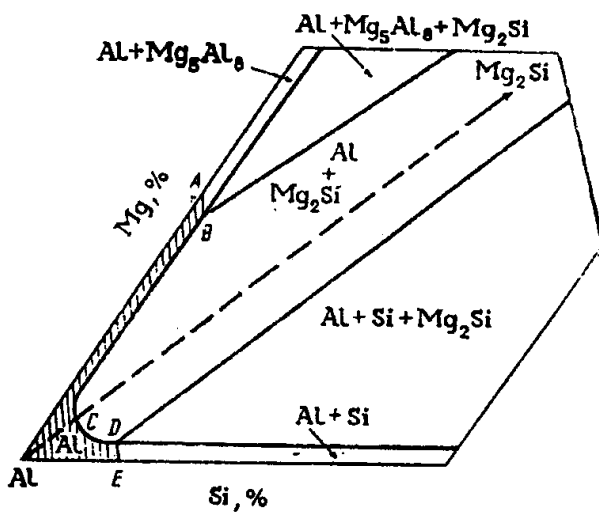
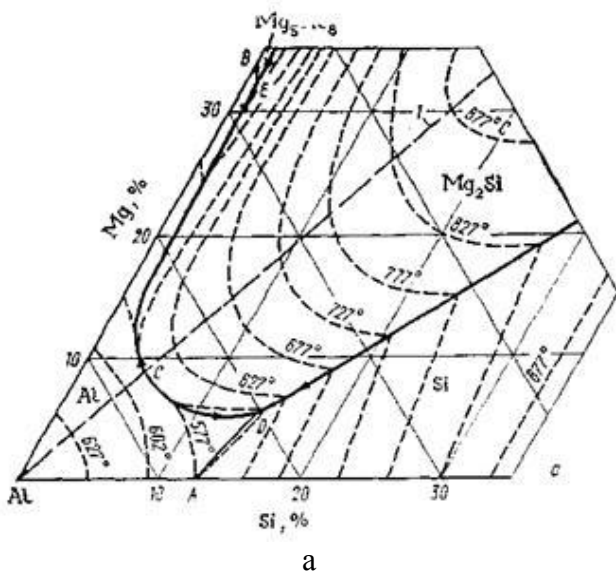


Рис.25. Алюминиевый угол диаграммы Al – Mg – Si: а – проекция поверхности ликвидус; б – распределение фазовых областей в твердом состоянии [14]

1.4.2. Сплав системы Al – Cu – Mg

Диаграмма состояния этой системы (рис.26) показывает, что наряду с двойными фазами Al_3Mg_2 (β) и Al_2Cu (θ) в равновесии с твердым раствором α могут находиться две тройные фазы S и T.

За перитектическим превращением при высоком содержании меди образуется близко к квазибинарному сечению Al-S (температура эвтектики 518 °C) и частичная эвтектическая область Al – S – Al_2Cu (температура эвтектики 507 °C). Богатая магнием фаза T ($\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$) возникает на основе фазы S в результате перитектической четырехфазной реакции при температуре 467 °C.

При температуре 450°C происходит последующая перитектическая четырехфазная реакция, по которой фаза T превращается в β .

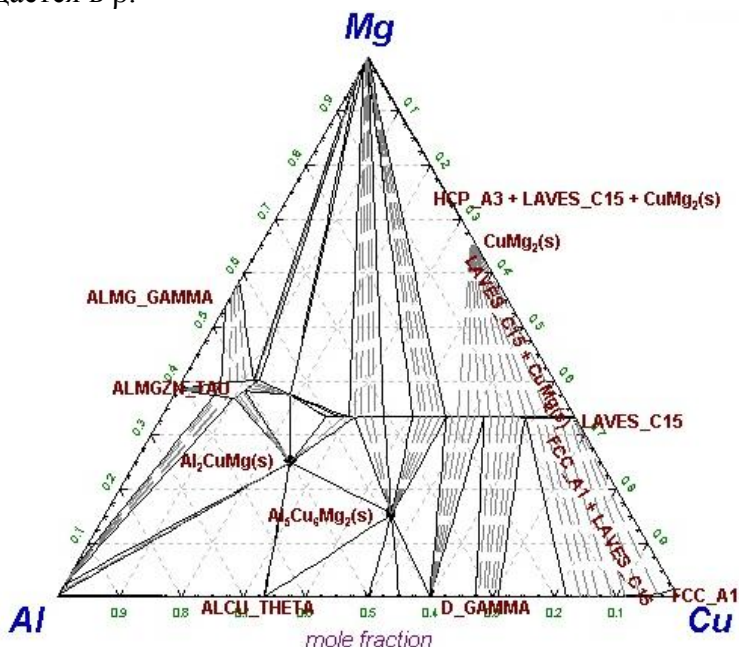


Рис.26. Диаграмма системы Al-Cu-Mg [15]

1.4.3. Сплав системы Al-Zn-Mg

В построении алюминиевого угла системы участвуют двойные фазы Al_3Mg_2 , MgZn_2 и тройная фаза Т, отвечающая среднему химическому составу $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (рис.27).

Сечения Al-MgZn₂ и Al-T остаются квазибинарными (температура эвтектики 447 °С). В частичной области Al-T-Zn при температуре 475 °С имеет место перитектическая четырехфазная реакция, по которой фаза Т превращается в фазу MgZn₂.

В дальнейшем при прохождении четырехфазной реакции при температуре 365 °С из фазы MgZn₂ при высоком содержании цинка образуется фаза MgZn₅, которая вместе с алюминием и цинком кристаллизуется по эвтектической реакции при температуре 343 °С.

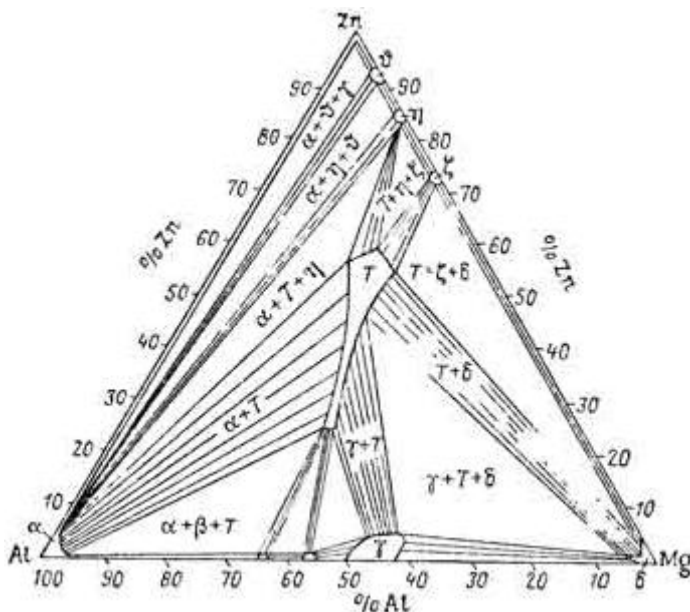


Рис.27. Изотермический разрез части диаграммы состояния системы Al- Mg- Zn при 25 °С [15]

1.4.4. Сплав системы Al-Cu-Si

Диаграмма состояния сплава показывает, что алюминий образует с кремнием и фазой Al_2Cu простую тройную эвтектическую частичную систему (температура эвтектики 525°C). Совместное присутствие меди и кремния не влияет на взаимную растворимость их в α -твердом растворе.

В сплавах на основе алюминия легирование основными компонентами предусматривается таким образом, чтобы их суммарное содержание находилось ниже максимальной растворимости. Исключение составляет кремний, который благодаря благоприятным механическим свойствам эвтектики используется в эвтектической и заэвтектической концентрациях.

Примеси и добавки могут видоизменить диаграмму состояния лишь незначительно. Эти элементы чаще всего слабо растворяются в твердом растворе и образуют гетерогенные выделения в структуре.

Вследствие неполного выравнивания концентрации внутри первичных кристаллов алюминиевого твердого раствора во время его затвердевания, в структуре могут появиться эвтектические участки при концентрации ниже максимальной растворимости, особенно в литом состоянии. Они располагаются по границам первичных зерен и препятствуют обрабатываемости.

Поскольку легирующие добавки растворяются в твердом растворе, гетерогенные структурные составляющие могут быть устранены длительным нагреванием при высоких температурах (гомогенизации) диффузионным путем. При горячем деформировании хрупкие выделения по границам зерен механически разрушаются и распределяются в структуре в стро-чечном режиме. Этот процесс характерен при превращении литой структуры в деформированную.

2. МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

2.1. Свойства магния

Магний – металл светло-серого цвета. Обладает очень малой плотностью ($1,74 \text{ г/см}^3$). Температура плавления магния 651°C , кипения – 1107°C . Кристаллическая решетка гексагональная плотноупакованная ($a = 0,3103 \text{ нм}$, $c = 0,5200 \text{ нм}$, $c/a = 1,62354$). Электропроводность составляет $38,6\%$ от электропроводности меди. Технический магний выпускают трех марок МГ90 (99,90 % Mg), МГ95 (99,95 % Mg), МГ96 (99,96 % Mg) [16].

На воздухе магний покрывается защитной оксидной пленкой. Стружка или порошок магния горят ярким белым пламенем, поэтому первоначально магний применялся лишь при фотографировании, а затем в пиротехнике, химической промышленности.

Стандартный электродный потенциал магния относительно водорода равен $2,4 \text{ В}$, поэтому магний вытесняет большинство металлов из водных растворов солей. Из кипящей воды магний медленно восстанавливает водород. Магний и сплавы, содержащие более 85% этого металла, можно по токсикологическим свойствам рассматривать вместе.

В промышленности их токсичность считается малой, хотя дымы оксида магния, как и некоторых других металлов, могут вызывать литейную лихорадку. При литье магния и сплавов с большим содержанием магния применяют фторидные флюсы и содержащие серу ингибиторы для отделения расплавленного металла от воздуха слоем диоксида серы. Это предохраняет металл от возгорания во время литья, однако дымы фторидов и диоксида серы могут представлять еще большую опасность. Самая главная опасность при обращении с магнием заключается в его возгорании. Мелкие частицы металла, образующиеся при шлифовке, полировке или обработ-

ке, могут легко воспламениться от случайной искры или пламени, причем они горят при температуре 1250°C.

Магний получают двумя основными способами: термическим восстановлением оксида магния и непрерывным электролизом хлористого магния.

Термический метод основан на первичном обжиге магнезита при температуре 700 – 800 °С, восстановлении оксида магния углеродом или кремнием и последующей конденсации из газовой фазы.

Во втором методе морскую воду или воду соленых озер смешивают с известковым молоком, которое осаждает хлористый магний. После фильтрации и обезвоживания хлористый магний направляют на электролиз, в процессе которого он разлагается на магний и хлор. Расплавленный магний собирают вакуум-ковшом с поверхности ванн, рафинируют путем промывки флюсами и жидким четыреххлористым титаном. В результате этого содержание вредной примеси железа, снижающего коррозионную стойкость магния, уменьшается в десятки раз. Применяют также рафинирование жидкого магния хлоридами марганца и циркония.

В России имеются два предприятия, производящие магний. АО «Соликамский магниевый завод», производство магния и его сплавов до 20 тыс. т/год. АО «АВИСМА», производство магния до 17 тыс. т/год. На производстве полуфабрикатов из магниевых деформируемых сплавов специализирован завод в г. Каменск-Уральский, Свердловской области.

В Казахстане имеется «Усть–Каменогорский титано-магниевый завод».

В Японии крупный металлургический концерн «Kobe Steel Ltd.» на заводе в г. Нагоя выпускает фасонные отливки и поковки из магниевых сплавов для автомобильной и авиационной промышленности.

Французский алюминиевый концерн «Pechiney» на заводе в г. Монтрей имеет цех по прессованию изделий из магния и его сплавов, выпускающий, в частности, прутки из сплавов

магния с содержанием 4% циркония для атомной промышленности.

Магниево–литиевые сплавы также характеризуются высокими механическими свойствами при криогенных температурах, высокой ударной вязкостью и малой чувствительностью к надрезам, незначительной анизотропией механических свойств и возможностью изготовления из них сварных соединений.

Примеси железа, плохо растворимого в магнии, снижают его коррозионную стойкость, поэтому содержание железа необходимо ограничивать в пределах 0,002-0,005 %.

Примеси никеля в магнии также вызывают интенсивную коррозию, в связи с чем его содержание не должно превышать 0,0005-0,002 %. Магний значительно корродирует в морской воде, разбавленных минеральных кислотах, кроме плавиковой, в большинстве органических кислот. Разбавленные щелочи, нейтральные и щелочные растворы фтористых солей не агрессивны. Магний и его сплавы весьма устойчивы по отношению к керосину, бензину, фенолу, минеральным смазочным маслам и к спиртам, кроме метилового.

2.2. Сплавы на основе магния

Сплавы магния обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью, хорошо поглощают вибрации, что предопределило их широкое использование в авиационной и ракетной технике.

Основной недостаток магниевых сплавов - низкая коррозионная стойкость, из-за чего их нельзя использовать без защитных покрытий (оксидирование, окраска). Магниевые сплавы имеют примерно в 1,5 раза меньшие упругие модули, чем алюминиевые сплавы, а это обуславливает большие упругие деформации и необходимость применения больших рабочих сечений деталей. Наконец, большинство магниевых сплавов не может работать при температуре выше 150 – 170 °С из-

за разупрочнения. Кроме этого, технология плавки и литья магниевых сплавов несравненно сложнее, чем алюминиевых, так как требуется обязательное применение солевых флюсов при плавке и защитных средств при разливке и нагревах выше 300°C. Также недостатком магниевых сплавов является трудность обработки давлением и литья.

Сплавы удовлетворительно свариваются дуговой сваркой в защитной среде инертных газов, контактной сваркой и хорошо обрабатываются резанием. Чаще применяют сплав магния с алюминием (до 10 %), цинком (до 5 – 6 %), марганцем (до 2,5 %), цирконием (до 1,5 %).

Алюминий и цинк в количестве до 6-7 %, образующие с магнием твердые растворы и соединения Mg_4Al_3 и $MgZn_2$, повышают механические свойства магния.

Марганец с магнием образует твердый раствор α . При понижении температуры растворимость марганца в магнии понижается и из α -твердого раствора выделяется β -фаза. Марганец, не улучшая механические свойства, повышает сопротивление коррозии и свариваемость сплавов магния.

Цирконий, введенный в сплавы магния с цинком, измельчает зерно, улучшает механические свойства и повышает сопротивление коррозии.

Редкоземельные металлы и торий повышают жаропрочность магниевых сплавов.

Бериллий в количестве 0,005-0,012 % уменьшает окисляемость магния при плавке, литье и термической обработке.

Магний только с кадмием образует непрерывный ряд твердых растворов, а с большинством металлов дает хрупкие промежуточные фазы. Легирующие компоненты вводят в таком количестве, чтобы состав находился недалеко от точки наибольшего насыщения твердого раствора на основе магния. Это дает наибольшее упрочнение раствора. Наличие же переменной растворимости обеспечивает возможность термической обработки сплавов путем закалки и старения.

Магниевого сплавы, как и алюминиевые, по технологии изготовления подразделяют на две группы:

- литейные сплавы – для получения деталей методом фасонного литья, маркируемые буквами «МЛ»;
- деформируемые сплавы, подвергаемые прессованию, прокатке, ковке, штамповке и другим видам обработки давлением, маркируемые буквами «МА».

Магниевого сплавы, как и алюминиевые, подвергают термической обработке – диффузионному отжигу (гомогенизации), отжигу, закалке и старению.

Слитки и фасонные отливки подвергают диффузионному отжигу (гомогенизации) обычно при 400 – 490 °С в течение 10 – 24 часов. При гомогенизации магниевых сплавов избыточные фазы, выделившиеся по границам зерен, растворяются, и состав по объему зерен выравнивается, что облегчает обработку давлением и повышает механические свойства.

Для устранения наклепа и уменьшения анизотропии механических свойств магниевые сплавы подвергают рекристаллизационному отжигу при 250-350 °С.

Некоторые магниевые сплавы могут быть упрочнены закалкой и старением.

Особенностью магниевых сплавов является малая скорость диффузионных процессов, поэтому фазовые превращения в них протекают медленно. Это требует больших выдержек при нагреве под закалку (4 – 24 час) и искусственном старении (15 – 20 час). По этой же причине возможна закалка на воздухе. Многие сплавы закаливаются при охлаждении отливок или изделий после горячей обработки давлением на воздухе, а следовательно, они могут упрочняться при искусственном старении без предварительной закалки. Гомогенизацию и закалку осуществляют при нагреве до 380 – 540 °С. (Т4) и последующее старение при 150 – 200 °С (Т6).

Прочность магниевых сплавов в процессе старения можно повысить только на 20 – 35 %. Пластичность сплавов при этом уменьшается, поэтому нередко ограничиваются

только гомогенизацией (закалкой), улучшающей механические свойства сплавов.

Основную группу деформируемых магниевых сплавов представляют сплавы, построенные на основе системы магний – алюминий – цинк с добавками марганца. Типичным для этой группы является сплав МА5 (7,8 – 9,2 % Al; 0,2 – 0,8 % Zn; 0,15 – 0,5 % Mn). Как видно из диаграммы состояния алюминий-магний (рис.28), сплавы с 5 – 10% Al способны поддаваться закалке и старению.

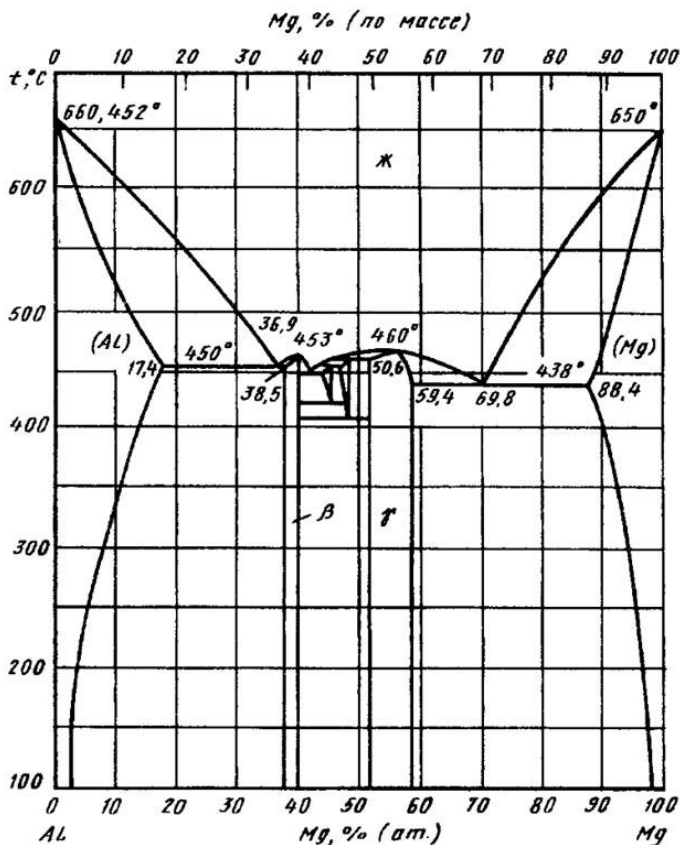


Рис.28. Диаграмма состояния алюминий – магний [3]

Действительно, такая термообработка используется для повышения свойств сплава МА5, при этом чаще применяют одну закалку с 405 – 415 °С с охлаждением на воздухе. После такой обработки получают $\sigma_b = 310$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220$ МПа, $\delta = 8\%$. Другая группа магниевых сплавов построена на системе магний - цинк - цирконий, например сплав ВМ65-1 (4,0 - 5,5%Zn; 0,3 – 0,9% Zr). Сплав также термически обрабатываемый и после обработки по режиму Т1 (искусственное старение при 175±5° С, 24 ч) имеет $\sigma_b = 350$ МПа, $\sigma_{0,2} = 300$ МПа, $\delta = 8\%$. Разработаны также магниевые сплавы с добавками редкоземельных металлов (церия, лантана) в количестве 0,3 – 1%. Основная цель, которую преследуют при разработке новых магниевых сплавов, - получить наибольшее упрочнение при температуре выше 170°С. Горячая обработка магниевых сплавов проводится при 350 – 400 °С, рекристаллизационный отжиг – при 300 – 350°С [17,18].

Литейные магниевые сплавы по составу почти совпадают с деформируемыми сплавами, но отличаются большими допусками по примесям железа и никеля. Так, литейный сплав МЛ5 по содержанию алюминия и марганца одинаков со сплавом МА5. Среди литейных имеются также сплавы, основанные на системе магний – цинк (3 – 5%) – цирконий (до 1%), магний – редкоземельные металлы (1 – 3%) - цинк (0,5) – цирконий (до 1%). Сплавы этих систем разрабатывались как жаропрочные для работы при 200 – 250°С. В состав всех магниевых сплавов входит 0,01 – 0,02% Ве для уменьшения окисления при плавке.

Наиболее вредные примеси во всех магниевых сплавах - железо и никель, содержание которых установлено не более 0,01 – 0,05% (в зависимости от марки сплава). Эти примеси, будучи нерастворимыми в твердом магнии, выделяются в виде мелких частиц и вызывают резкое усиление атмосферной коррозии сплавов, так как обладают значительно более положительным электрохимическим потенциалом в сравнении с магнием [19].

2.3. Классификация магниевых сплавов

Магниевые сплавы разделяются на литейные и деформируемые.

Литейные и деформируемые магниевые сплавы в отечественных стандартах (ГОСТ) обозначаются следующим образом:

- МЛ (магниевые литейные сплавы ГОСТ 2856);
- МА (магниевые деформируемые сплавы ГОСТ 14957);
- п.ч. (повышенной чистоты);
- о.н. (общего назначения).

Литейные магниевые сплавы подразделяются в зависимости от способа литья: в песчаные формы, в кокиль, литье под давлением.

Способы фасонного литья магниевых сплавов и принятое в стандартах России их обозначение:

- в песчаные формы (в землю) (З);
- по выплавляемым моделям (В);
- в кокиль (постоянные металлические формы К);
- в гипсовые формы (Г);
- в оболочковые формы (О);
- под давлением (Д).

Деформируемые магниевые сплавы классифицируются на сплавы для прессования,ковки,штамповки, для горячей и холодной прокатки; по прочности при нормальных и повышенных температурах, коррозионной стойкости и плотности.

По уровню прочности и ряду других основных свойств (жаропрочности, плотности) магниевые деформируемые сплавы подразделяются на 4, а литейные – на 3 группы (табл.7).

Классификация магниевых сплавов в зависимости от предельно допустимых рабочих температур и продолжительности работы приведена в табл.8, по коррозионной стойкости – в табл.9, по свариваемости – в табл.10.

Таблица 7

Классификация магниевых сплавов по прочности

Группа сплавов	Классификация сплавов	Марка литейных магниевых сплавов	Марка деформируемых магниевых сплавов
I	Сплавы средней прочности	МЛЗ	МА1, МА2, МА8, МА8п.ч., МА2-1, МА2-1 п.ч., МА 20
II	Сплавы высокой прочности	МЛ4, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ5о.н., МЛ6, МЛ8, МЛ 12, МЛ 15	МА5, МА14, МА15, МА19
III	Жаропрочные сплавы	МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19	МА11, МА12
IV	Сплавы пониженной плотности, содержащие литий	—	МА18, МА21

Таблица 8

Классификация магниевых сплавов от условий работы

Группа сплавов	Рекомендуемые условия работы при температуре, °С	Марка литейных сплавов	Марка деформируемых сплавов
I	Длительно до 150, кратковременно до 200	МЛЗ, МЛ4, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ5о.н., МЛ6, МЛ8	МА1, МА2, МА2-1, МА5, МА2-1 п.ч., МА15, МА19, МА20
II	Длительно до 200, кратковременно до 250	МЛ12, МЛ15	МА8
III	Длительно до 200-300, кратковременно до 300-400	МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ 19	МА1 I, МА12
IV	Длительно до 125	—	МАИ
V	Длительно до 80	—	МА18, МА21

Таблица 9

Классификация магниевых сплавов по коррозионным свойствам

Группа сплавов	Коррозионная стойкость	Марка литейных сплавов	Марка деформируемых сплавов
I	Повышенная	МЛ4п.ч., МЛ5п.ч.	МА1, МА8, МА8п.ч., МА2-I п.ч.
II	Удовлетворительная	МЛ3, МЛ4, МЛ5, МЛ6, МЛ8, МЛ9, МЛ 10, МЛ 11, МЛ 12, МЛ 15, МЛ19	МА2. МА2-1, МА5, МА12, МА14, МА15, МА18, МА19, МА20, МА21
III	Пониженная	МЛ5о.н.	МАП

Таблица 10

Классификация магниевых сплавов по степени свариваемости

Группа сплавов	Свариваемость сплавов	Марка литейных сплавов	Марка деформируемых сплавов
I	Хорошая	МЛ9, МЛ 10, МЛ 11	МА2. МА2-1, МА2-1 п.ч., МА12, МА18, МА20, МА21
II	Удовлетворительная	МЛ3, МЛ4, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ6, МЛ8, МЛ 12, МЛ 15	МА1, МА5, МА8, МА1 I, МА15
III	Практически несвариваемые	—	МА14, МА19

2.4. Международная маркировка магниевых сплавов

В США и некоторых других странах магниевые сплавы маркируют по системе, разработанной Американским обществом по испытаниям материалов (ASTM) в соответствии с химическим составом и состоянием поставки.

Обозначение сплавов начинается с двух букв, представляющих два основных легирующих элемента.

Буквы располагаются по убыванию содержания элементов или при равных их количествах – по алфавиту.

Затем следуют цифры, указывающие содержание элементов в целых процентах.

Последующие буквы (А, В, С) отражают модификацию сплава по содержанию второстепенных легирующих элементов или примесей. Чистота сплава увеличивается от С до А, то есть А – наиболее чистый.

Символ Х обозначает, что сплав новый и пока не стандартизирован, то есть так называемый «временно стандартизированный сплав», например, AZ81XA.

Обозначения магниевых сплавов по ASTM приведены ниже: А – алюминий; Н – торий; Z – цинк; Е – редкоземельные металлы; М – марганец; L – литий; К или W – цирконий; Q – серебро [7,8].

Например, сплав AZ31В содержит номинально 3% алюминия, 1% цинка, имеет отличительные особенности по содержанию марганца и примесей (железа, никеля), что показывает буква В, то есть сплав средней чистоты по примесям.

В Британском стандарте (BS) магниевые сплавы обозначаются символом MAG (MAGNESIUM) и порядковым номером. Для деформируемых сплавов обозначение усложняется введением дополнительной буквы, указывающей вид полуфабриката, например, MAG-E-121 – магниевый сплав для прессованных (Extruded) полуфабрикатов, MAG-S-151 – магниевый сплав для листов (Sheets) и плит.

В Японии магниевые литейные сплавы обозначаются символом MC (Magnesium Castings), деформируемые магниевые

вые сплавы – МР, МВ, MS. Первая буква – магний (Magnesium), вторая - вид полуфабриката: Р – плита, лист (Plate), В – прутки (Bar), S – профиль (Shape). Помимо буквенного обозначения в японской марке присутствует цифра номера сплава, например МСЗ, МР5 и т. п.

Магниевые сплавы за рубежом, помимо стандартных обозначений, часто имеют дополнительные обозначения и торговые марки различных организаций и фирм. Например, сплав AZ31 (США) в Англии может иметь марку MAG-111, AZ31 Электрон А4, в Германии - MgAl3Zn, Магнезал W383 и т. п.

Фасонные отливки и деформированные полуфабрикаты из магниевых сплавов поставляются заказчику в состояниях после литья и горячей деформации без термической обработки и в термически обработанных состояниях.

Термическая обработка может быть как упрочняющая, так и разупрочняющая (отжиг) с целью повышения пластичности, поэтому магниевые сплавы подразделяются на термоупрочняемые и термически неупрочняемые (табл. 11).

Таблица 11

Классификация магниевых сплавов в зависимости от способа упрочнения

Группа сплавов	Способность сплавов упрочняться при термической обработке	Марка литейных сплавов	Марка деформируемых сплавов
I	Термоупрочняемые	МЛ4, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ5о.н., МЛ6, МЛ8, МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ 12, МЛ 15, МЛ 19	МА5, МА11, МА12, МАИ
II	Термически неупрочняемые	МЛЗ	МА1, МА8, МА8п.ч., МА2, МА2-1, МА2-1 п.ч., МА15, МА17, МА18, МА19, МА20, МА2I

Для характеристики состояния поставки отливок и деформированных полуфабрикатов в разных странах принято специальное обозначение, которое наносится после марки сплава. Например, МЛ4Т6 – сплав МЛ4 в закаленном и искусственно состаренном состоянии (табл.12).

Таблица 12

Обозначение состояния поставки магниевых сплавов

Состояние поставки	Обозначение			
	Россия ГОСТ	США ASTM	Великобритания BS	Япония JIS
Литое или горячедеформированное	-	F	M	F
Отожженное, рекристаллизованное максимальной пластичности	M	0	0	0
Холоднодеформированное (нагартованное) или частично отожженное	H	H, H1*, H2*	H, H1, H2	H, H1, H2
Частично закаленное и искусственно состаренное (закалка в процессе охлаждения после литья или горячей деформации)	T1	T5	TE(P)	T5
Отожженное после литья (частично закаленное). Применяется только для отливок	T2	T2	TS	T2
Закаленное и естественно состаренное	T4	T4	TB (W)	T4
Закаленное и искусственно состаренное	T6	T6	TF(WP)	T6
Закаленное и стабилизированное	T7	T7	T7	T7
Закаленное, нагартованное и искусственно состаренное	T8	T8	T8	T8
* H1 – нагартованное состояние, достигаемое в результате холодной деформации без последующего отжига. H2 – нагартованное и частично отожженное состояние. Цифра, следующая за обозначениями H1 или H2, указывает на степень нагартовки или на остаточную величину упрочнения деформацией после частичного отжига. Эта цифра меняется от 8(max упрочнение) до 2 (min упрочнение).				

В табл.13 приведены марки литейных магниевых сплавов в соответствии с действующими стандартами различных стран.

Таблица 13

Марки литейных магниевых сплавов в соответствии с действующими стандартами

Россия ГОСТ 2856	США ASTM B80	Великобритания BS 2970	Япония JISH5203
МЛ3	-	-	-
МЛ4	AZ63A	-	MC1
МЛ п.ч.	-	-	-
МЛ5	AZ81 A, AZ91C	MAG1	MC2
МЛ5 п.ч.	.	MAG2	-
МЛ5 о.н.	-	MAG7	-
МЛ6	.	MAG3	-
МЛ8	-	-	MC7
МЛ9	.	-	-
МЛ10	-	-	-
МЛ11	-	-	-
МЛ 12	ZK51A	MAG4	MC8
МЛ 15	-	-	-
МЛ19	-	-	-
-	AZ92A	-	MC8
-	AM100A	-	MC5
-	EZ33A	MAG6	MC8
-	ZE41A	MAG5	-
-	HZ32A	MAG8	-
-	ZH62H	MAG9	-
-	K1A	-	-
-	OE22A	-	-
-	QE21A	-	-
-	ZE63A	-	-
-	ZK61A	-	-
-	HK31A	-	-

В табл.14 приведены механические свойства литейных сплавов после длительных нагревов (1000 ч) при температуре 250 °С.

Таблица 14

Механические свойства литейных сплавов после длительных нагревов (1000 ч) при температуре 250 °С

Марка сплава	Состояние поставки	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
МЛ9	Т6	115	-	20
МЛ10*	Т6	165	120	16
МЛ11	Т6	95	50	-
*) Температура испытания 200 °С.				

В табл.15 приведены физические свойства отечественных литейных магниевых сплавов.

В Приложении 1 рассмотрены основные особенности и области применения российских и зарубежных магниевых литейных сплавов.

Предел текучести деформируемых магниевых сплавов при сжатии на 15 – 40 % ниже их предела текучести при растяжении. Исключение составляют сплавы типа МА14 и магниеволитиевые сплавы (МА18, МА21, LA141A), пределы текучести которых при сжатии и растяжении равны между собой.

В зависимости от состава сплава, вида и режима термообработки полуфабриката модуль упругости при растяжении (Е) находится в пределах $(4,1 - 4,4) \times 10$ МПа. Для сплавов с литием (МА18, МА21) $E = (4,4 - 4,6) \times 10^4$ МПа [16,18].

Модуль сдвига деформируемых магниевых сплавов составляет $(1,5 - 1,6) \times 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,31 – 0,35.

Отношение предела прочности при срезе к пределу прочности при растяжении равно приблизительно 0,7 для деформируемых магниевых сплавов и изменяется в пределах

120-220 МПа; составляет 0,35-0,45 от предела текучести при растяжении; твердость по Бринеллю – 400-800 МПа.

Таблица 15

Физические свойства отечественных литейных магниевых сплавов

Марка сплава	Физические свойства								
	Плотность г/см ³	Коэффициент термического линейного расширения в интервале температур, °С		Коэффициент теплопроводности при температуре, °С		Удельная теплоемкость при температуре, °С		Удельное электросопротивление при температуре, °С	
		20	100	20	100	100	200	20	100
		106 град-1		Вт/м*град		КДж/кг*град		104Ом*см	
МЛ4 , МЛ4 п.ч.	1,83	26,4		65	71	1,05	-	-	-
МА5 МЛ5 п.ч. НЛ5 о.н.	1,81	26,8		65	71	1,05	-	-	13,4
МЛ6	1.81	26,1		61	67	1,05	-	-	-
МЛ8	1,82	26,6		123	125	1.05	-	-	-
МЛ9	1,76	27,7		117	117	-	-	7,26	-
МЛ10	1,78	27.7		113	113	0,96	1,05	8,44	-
МЛ11	1,80	21,9		105	109	1,05	-	7,3	-
МЛ12	1.81	26,2		134	130	1,05	-	-	-
МЛ 15	1,83	25,9		138	134	0,92	-	-	-
МЛ19	1.79	27,7		88	-	1,13	-	7,5	-

В табл.16 приведены режимы термической обработки отечественных литейных магниевых сплавов; в табл.17 – отечественных деформируемых магниевых сплавов.

Таблица 16

**Режимы термической обработки отечественных литейных
магниевого сплавы**

Марка сплава	Состояние поставки	Закалка		Искусственное старение		Отжиг	
		Температура, °С	Время выдержки, ч	Температура, °С	Время выдержки, ч	Температура, °С	Время выдержки, ч
МЛ4	T4	380±5	8-16	-	-	-	-
МЛ4 п.ч.	T6 *	380±5	8-16	175±5	16	-	-
МЛ5	T2	-	-	-	-	350±5	2-3
МЛ5 п.ч.	T4	415±5	8-16	-	-	-	-
МЛ5 о.н.	T6	415±5	8-16	175±5	16	-	-
МЛ6	T4	360±5 410±5	3 21-29	-	-	-	-
	T6 T61**	360±5 410±5	3 21-29	190±5	4-8	-	-
МЛ8	T6 T61	490±5	5	165±5	24		
МЛ9	Г6	540±5	8-12	200±5	6-12	-	-
МЛ10	T6	540±5	8-12	205±5	12-18	-	-
	T61	545±5	4-8	205±5	8-12	-	-
МЛ11	T2	-	-	-	-	325±5	3-5
	T4	570±5	4-6	-	-	-	-
	T6	570±5	4-6	200±5	12-16	-	-
МЛ 12	T1	-	-	300±5	4-6	-	-
МЛ 15	T1	-	-	300±5	2-6	-	-
МЛ 19	T6	570±5	4-6	200±5	12-16	-	-

* T6 - закалка, обдувка сжатым воздухом.

** T61 - закалка, вода 90 ± 10 °С

Таблица 17

Режимы термической обработки отечественных деформируемых магниевых сплавов

Марка сплава	Состояние поставки	Закалка *		Искусственное старение		Отжиг	
		Температура, °С	Время выдержки, ч	Температура, °С	Время выдержки, ч	Температура, °С	Время выдержки, ч
МА2-1, МА2-1 п.ч.	М	-	-	-	—	320-350	0,5
МА5	Т4	410-425	2-6	-	-	-	-
МА8, МА8п.ч.	М	-	-	-	-	320-350	0,5
МАП	Т6	480-500	4	175±5	24	-	-
МА12	Т6	530-545	1-4	200±5	16	-	-
	Т1			200±5	16	-	-
МА14	Т1	-	-	170±5	10-24	-	-
МА15	м	-	-	-	-	260±15	0,5
МА18	11	-	-	150±5	4-16	-	-
МА20	м	-	-	-	-	260±10	1
МА21	Т7	-	-	150±5	4-16	-	-
*) Закалка деформированных полуфабрикатов производится в горячую (90±10 °С) воду или сжатым воздухом							

В Приложении 2 рассмотрены основные особенности и области применения российских и зарубежных магниевых деформируемых сплавов.

2.5. Системы двойных диаграмм

2.5.1. Диаграмма состояния системы магний – кальций (Mg – Ca)

Исследованию диаграммы состояния Ca – Mg посвящено большое число экспериментальных работ. На рис.29 приведен обобщенный вариант диаграммы состояния Ca – Mg.

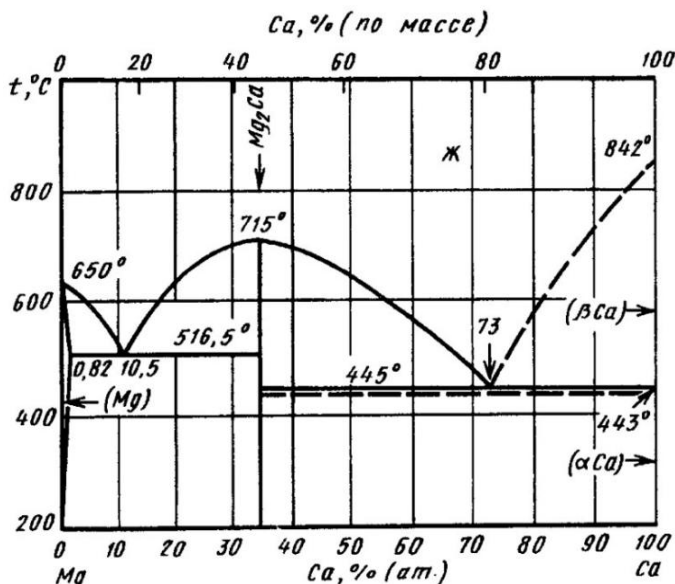


Рис.29. Диаграмма состояния Mg – Ca [3]

В сплавах системы образуется одно конгруэнтно-плавящееся при 715°C соединение Mg_2Ca . Это соединение образует две эвтектики: $\text{Mg} + \text{Mg}_2\text{Ca}$ и $\text{Mg}_2\text{Ca} + \beta\text{-Ca}$, кристаллизующиеся, соответственно, при температурах $516,5$ и 445°C . Растворимость Ca в Mg при эвтектической температуре достигает $0,83\%$ (ат.). Mg практически не растворяется в Ca.

Кристаллическая структура соединения Mg_2Ca гексагональная типа MgZn_2 (фаза Лавеса) с параметрами $a = 0,623$ нм, $c = 1,012$ нм.

2.5.2. Диаграмма состояния системы кобальт – магний (Co – Mg)

На рис.30 приведена диаграмма состояния Co – Mg.

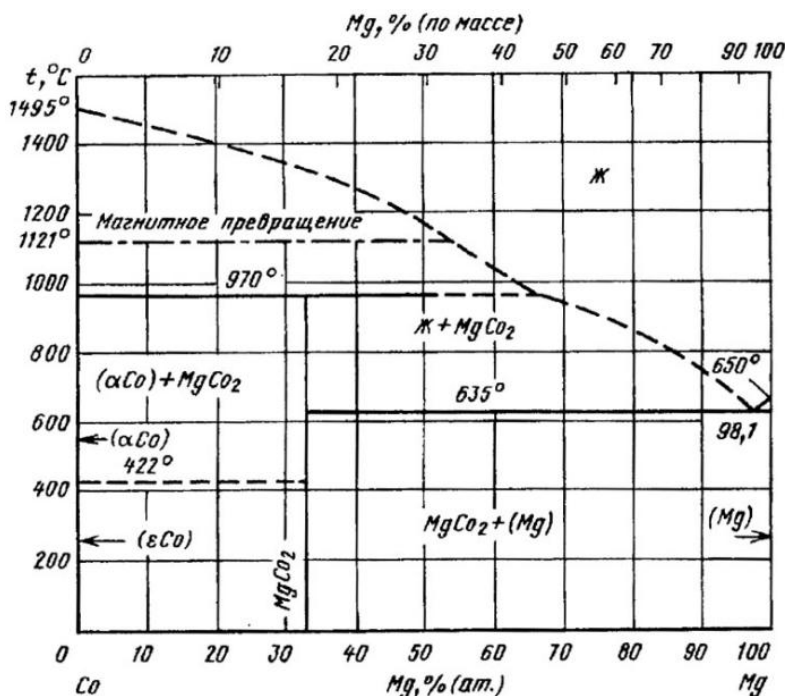


Рис.30. Диаграмма состояния Co – Mg [3]

В системе образуется одно соединение MgCo_2 , относящееся к фазам Лавеса. Образование соединения происходит при охлаждении расплава по перитектической реакции при температуре 970 °С. Со стороны Co в системе предполагаются превращения, связанные с полиморфным превращением при температуре 422 °С и переходом от состояния ферромагнетизма к парамагнитному состоянию при температуре 1191 °С.

Со стороны Mg в системе имеет место эвтектическое превращение при температуре 635 °С и содержании 1,9 % (ат.) 4,5 % (по массе) Со.

Результаты измерения параметров кристаллических решеток Mg и Со свидетельствовали об отсутствии существенной растворимости компонентов друг в друге в твердом состоянии. Кристаллическая решетка фазы MgCo_2 типа MgNi_2 с параметрами $a = 0,486 \text{ нм}$, $c = 0,792 \text{ нм}$.

2.5.3. Диаграмма состояния системы висмут-магний (Bi – Mg)

На рис.31 приведена диаграмма состояния Bi – Mg.

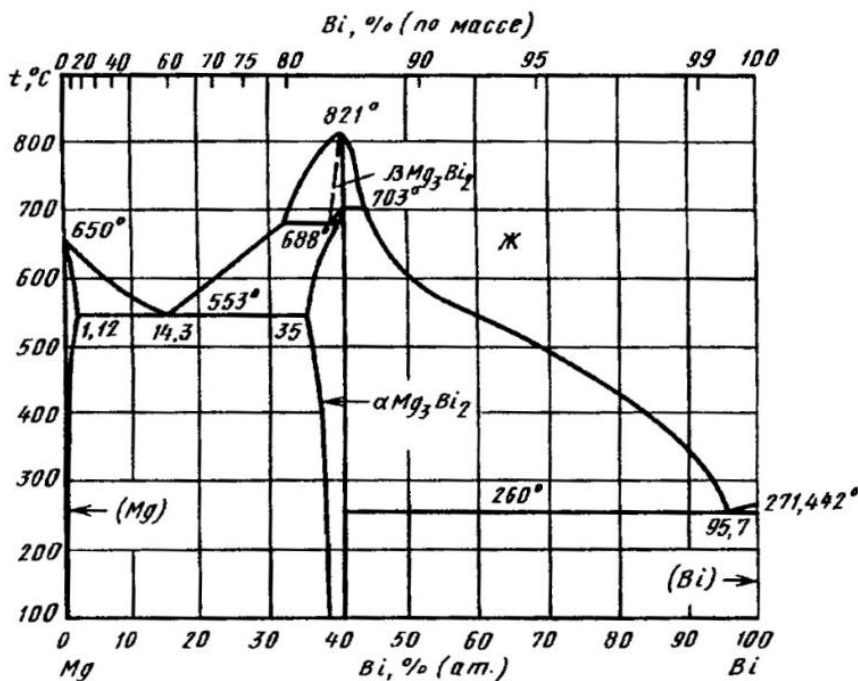


Рис.31. Диаграмма состояния Bi – Mg [3]

Металлы неограниченно растворимы в жидком состоянии. При кристаллизации в системе конгруэнтно образуется соединение Mg_3Bi_2 при температуре $821\text{ }^{\circ}\text{C} - 823\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Соединение Mg_3Bi_2 претерпевает полиморфное превращение при температуре $703\text{ }^{\circ}\text{C}$. Область гомогенности Mg_3Bi_2 $\sim 2\text{ } \%$ (ат.) .

В системе наблюдаются два превращения эвтектического типа: $\text{Ж} \leftrightarrow \text{Mg} + \text{Mg}_3\text{Bi}_2$ при температуре $553\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержании $14,3\text{ } \%$ (ат.) Bi ($58,9\text{ } \%$ (по массе) Bi); $\text{Ж} \leftrightarrow \text{Mg}_3\text{Bi}_2 + \text{Bi}$ при температуре $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержании $95,7\text{ } \%$ (ат.) Bi ($99,5\text{ } \%$ (по массе) Bi), а также превращение кататектического типа при температуре $688\text{ }^{\circ}\text{C}$. Растворимость Mg в Bi незначительна, однако она предполагается равной $8\text{ } \%$ (ат.).

2.5.4. Диаграмма состояния системы германий- магний (Ge – Mg)

На рис.32 приведена диаграмма состояния Ge – Mg.

В системе образуется одно промежуточное соединение – Mg_2Ge , плавящееся конгруэнтно при $1117\text{ }^{\circ}\text{C}$ и образующее эвтектики с исходными элементами.

Эвтектика $\text{Ge} + \text{Mg}_2\text{Ge}$ имеет место при температуре $697\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержании $35,7\text{ } \%$ (ат.) Mg, другая Эвтектика $\text{Mg} + \text{Mg}_2\text{Ge}$ образуется при температуре $636\text{ }^{\circ}\text{C}$ и содержании $1,15\text{ } \%$ (ат.) Ge .

Взаимная растворимость компонентов незначительна. Поданным рентгеновского исследования, растворимость Ge в Mg при температуре $602\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $0,003\text{ } \%$ (ат.).

Соединение Mg_2Ge имеет кубическую структуру типа CaF_2 с параметром решетки по данным различных работ, колеблющимся от $0,6370$ до $0,6393\text{ нм}$.

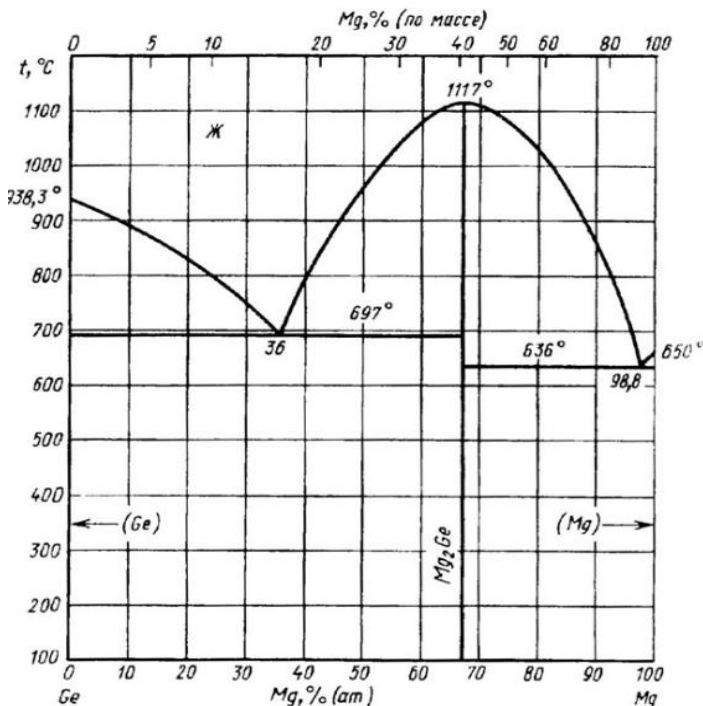


Рис.32. Диаграмма состояния Ge – Mg [3]

2.5.5. Диаграмма состояния системы серебро – магний (Ag – Mg)

На рис.33 приведена диаграмма состояния Ag – Mg.

Система характеризуется образованием одного конгруэнтно плавящегося соединения $\beta'(\text{AgMg})$ и одного инконгруэнтно плавящегося соединения $\gamma(\text{AgMg}_3)$.

На основе Ag и Mg образуются ограниченные твердые растворы.

В пределах области твердого раствора (Ag) имеет место упорядочение с образованием фазы α' (Ag_3Mg). Кристаллическая структура фазы α' (Ag_3Mg) – упорядоченный твердый раствор с ГЦК решеткой. Характер упорядочения близок к упо-

рядочению по типу Au_3Cu , но наблюдается также и небольшая тетрагональность.

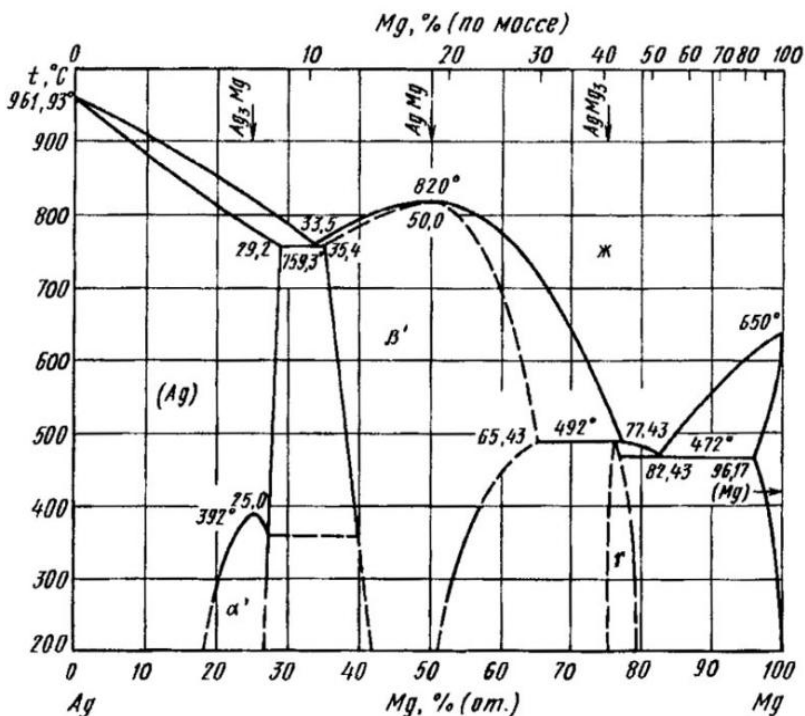


Рис.33. Диаграмма состояния Ag –Mg [3]

При изменении содержания Mg в пределах 20,0 – 28,5 % (ат.) средний параметр решетки фазы α' изменяется на 0,0010 нм, находясь в диапазоне 0,4104 – 0,4114 нм по данным различных авторов. Тетрагональность решетки c/a составляет 1,0060 при 28,5 % (ат.) Mg.

Кристаллическая структура фазы $\beta'(\text{AgMg})$ – ОЦК типа ($a = 0,32897 - 0,33472$ нм).

Кристаллическая структура фазы $\gamma (\text{AgMg}_3)$ – гексагональная типа AsNa_3 ($a = 0,48842 - 0,49030$ нм, $c = 0,77868 - 0,78438$ нм).

2.5.6. Диаграмма состояния системы никель – магний (Ni – Mg)

Впервые диаграмма состояния Mg – Ni (рис.34) была построена на основании данных термического анализа.

Определено существование двух соединений Mg_2Ni и $MgNi_2$ и сделано предположение, что в области сплавов, содержащих от 55,4 до 70,1 % (ат.) Ni имеется расслоение и соединение $MgNi_2$ образуется в результате взаимодействия двух жидкостей. Для соединения Mg_2Ni установлен инконгруэнтный характер плавления при температуре 768 °С.

В системе протекают два невариантных превращения эвтектического типа при температурах 512 и 1082 °С и невариантное превращение перитектического типа при 768 °С, определено, что соединение $MgNi_2$ плавится конгруэнтно.

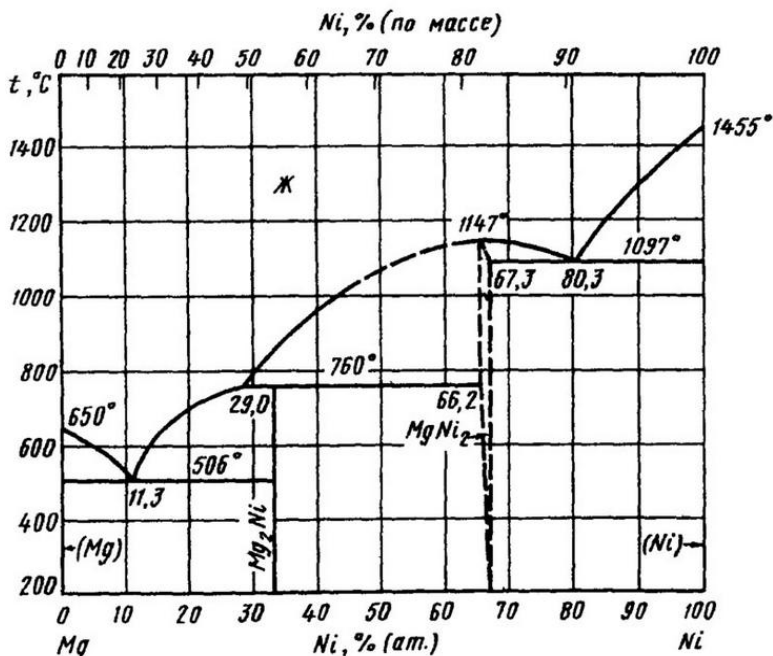


Рис.34. Диаграмма состояния Mg – Ni [3]

Как следует из диаграммы состояния Mg-Ni, соединение Mg_2Ni образуется по перитектической реакции при температуре 760 °С, а соединение MgNi_2 плавится конгруэнтно при 1147 °С и имеет узкую область гомогенности при содержании Ni от 66,2 до 67,3 % (ат.).

Растворимость Ni в Mg очень мала и составляет при 500 °С менее 0,04 % (ат.). Растворимость Mg в Ni также незначительна и составляет при 1100 °С менее 0,24 % (ат.)

2.5.7. Диаграмма состояния системы кадмий – магний (Cd – Mg)

Изучению диаграммы состояния системы Cd – Mg (рис.35) посвящено большое число исследований.

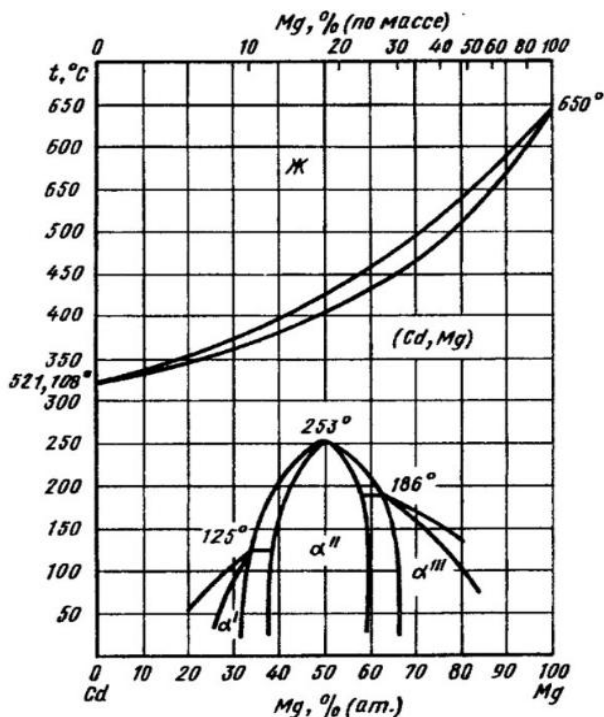


Рис.35. Диаграмма состояния Cd – Mg [3]

Система характеризуется образованием непрерывного ряда твердых растворов.

При температурах ниже линии солидус имеет место упорядочение с образованием трех фаз: α' (MgCd_3), α'' (MgCd) и α''' (Mg_3Cd).

2.5.8. Диаграмма состояния системы магний – галлий (Mg-Ga)

На рис.36 приведена диаграмма состояния Mg-Ga .

В системе образуются пять соединений: Ga_2Mg_5 , GaMg_2 , GaMgGa_2Mg и Ga_5Mg_2 , из которых Ga_2Mg_5 , GaMg и Ga_2Mg плавятся конгруэнтно при 470, 370 и 283 °С соответственно.

Все соединения, образующиеся в системе Ga-Mg , имеют узкие области гомогенности – менее 0,1 % (ат.).

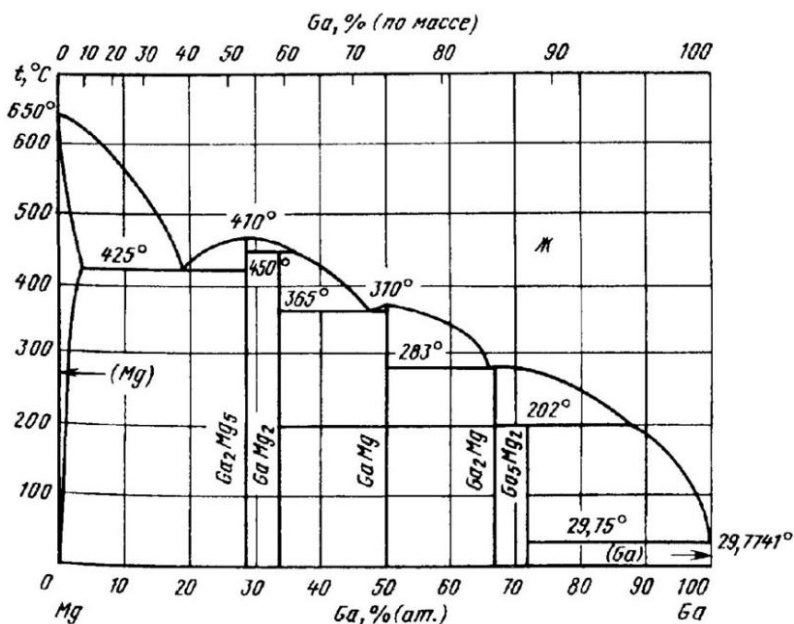


Рис.36. Диаграмма состояния Ga-Mg [3]

2.5.9. Диаграмма состояния системы церий – магний (Ce – Mg)

На рис.37 приведена диаграмма состояния Ce – Mg.

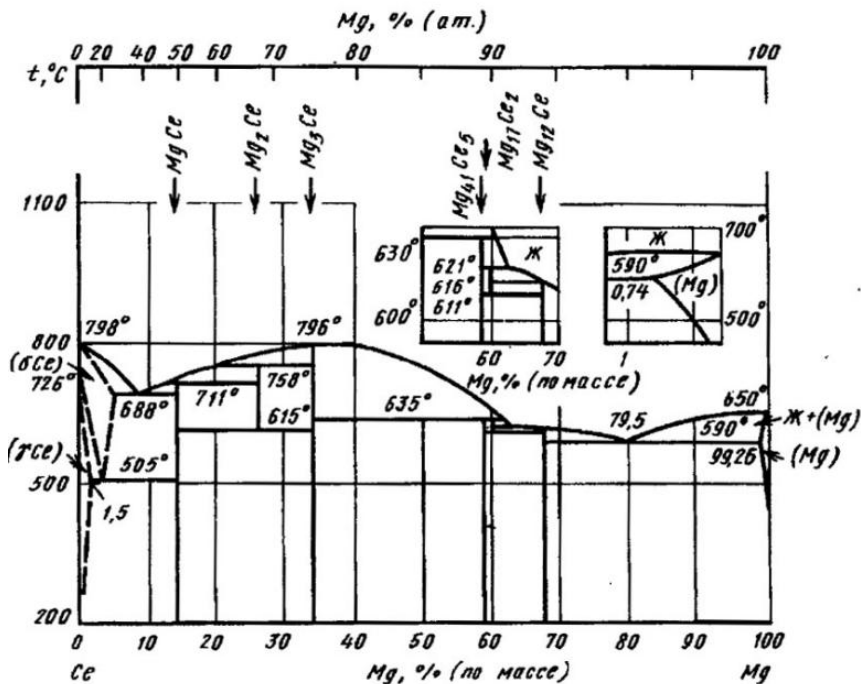


Рис.37. Диаграмма состояния Ce – Mg [3]

В системе образуются шесть соединений: MgCe, Mg₂Ce, Mg₃Ce, Mg₄₁Ce₅, Mg₁₇Ce₂ и Mg₁₂Ce. Для ближайшего к Mg соединения принималась формула Mg₉Ce, однако потом было установлено, что в области концентраций вблизи 90 % (ат.) Mg образуются три соединения: Mg₄₁Ce₅, Mg₁₇Ce₂ и Mg₁₂Ce. Участок диаграммы состояния в этой области концентраций показан на левой вставке. Соединения образуются по перитектическим реакциям при температурах 630, 621 и 616 °C соответственно. Соединение Mg₁₇Ce₂ распадается при температуре 611 °C по эвтектоидной реакции $\text{Mg}_{17}\text{Ce}_2 \leftrightarrow \text{Mg}_{41}\text{Ce}_5 + \text{Mg}_{12}\text{Ce}$.

Для соединения $\text{Mg}_{41}\text{Se}_5$ первоначально принималась формула $\text{Mg}_{42}\text{Se}_5$. Растворимость Mg в γ - Se составляет 1,5 % (по массе) [8,2 % (ат.) Mg] и 0,24 % (по массе) [1,4 % (ат.) Mg] при температурах 500 и 200 °C соответственно.

2.5.10. Диаграмма состояния системы мышьяк – магний (As – Mg)

На рис.38 приведена диаграмма состояния As – Mg при давлении ~4 МПа. Диаграмма состояния построена с учетом известных данных о соединениях, образующихся в системе As – Mg, и на основании предположения о существовании эвтектик $\text{Mg} + \sigma\text{-Mg}_3\text{As}_2$ и $\text{As} + \text{MgAs}_4$ по аналогии с системами $\text{Mg} - \text{Bi}$ и $\text{Mg} - \text{Sb}$. Растворимость As в Mg очень мала.

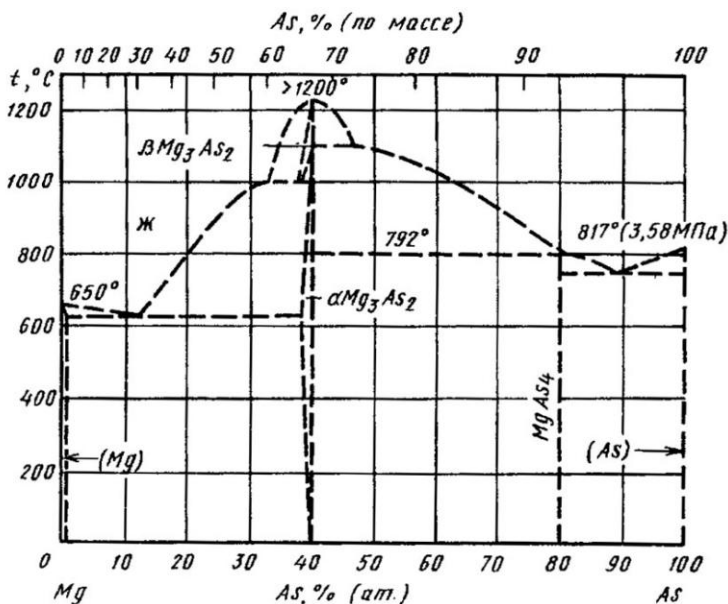


Рис.38. Диаграмма состояния As – Mg [3]

В сплавах системы As – Mg установлено существование двух соединений Mg_3As_2 и MgAs_4 . Соединение Mg_3As_2 , синте-

зированное из Mg чистотой 99,99 % (по массе) Mg и As чистотой 99,9995 % (по массе) As, плавится при температуре выше 1200 °С и претерпевает полиморфное превращение, температура которого находится между 1000 и 1100 °С . Соединение MgAs_4 имеет склонность к диссоциации при повышенных температурах. При создании избыточного давления паров As, равного 0,5 МПа, оно устойчиво до температуры плавления 792 °С.

2.5.11. Диаграмма состояния системы литий – магний (Li – Mg)

Система Li – Mg (рис.39) характеризуется наличием широких областей твердых растворов (Li) и (Mg), максимума на кривой ликвидуса при температуре 592 °С и содержании 70 % (ат.) Mg, эвтектического равновесия $\text{Ж} \leftrightarrow (\text{Mg}) + (\text{Li})$ при 588 °С и 77 % (ат.) Mg.

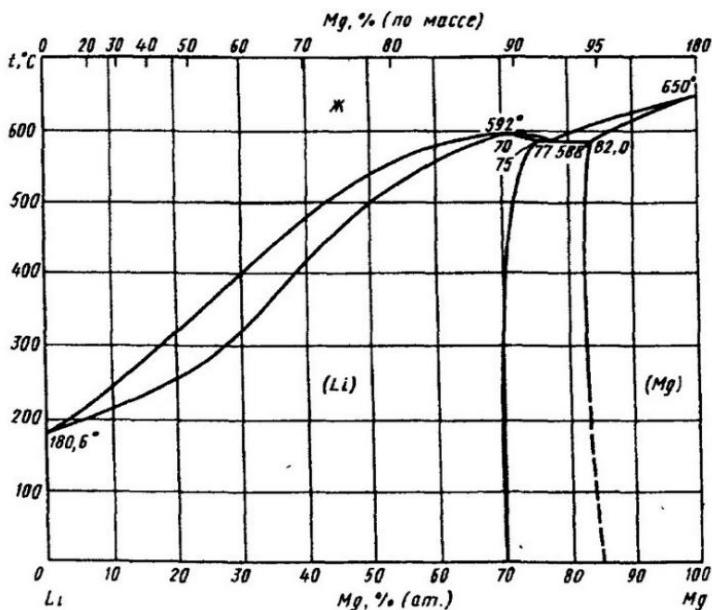


Рис.39. Диаграмма состояния Li – Mg [3]

Данные растворимости Li в (Mg), определенные методами металлографического и рентгеновского анализов, находятся в хорошем соответствии с данными, полученными методами микрорентгеноспектрального и дилатометрического анализов.

При температурах 200 – 400 °С растворимость Li в (Mg) практически постоянна и составляет $18,0 \pm 0,1$ % (ат.). Данные по растворимости Mg в (Li), определенные металлографическим анализом в работах , согласуются с данными, полученными методом измерения электросопротивления.

При температурах 200 – 400 °С граница растворимости Mg в (Li) проходит при 30,1 % (ат.) Li.

Выше температуры 500 °С граница несколько смещается в сторону увеличения содержания Li.

Наличие максимума на кривой ликвидуса привело к предположению в ранних работах о существовании промежуточной фазы на базе соединения Li_2Mg_3 или LiMg_2 , что не подтвердилось в последующих исследованиях.

Значения параметров решетки (Mg) a и c уменьшаются по мере легирования его Ir и составляют 0,31918 и 0,51319 нм, соответственно при 18,4%(ат.) Li. Параметр объемноцентрированной решетки (Li) в интервале концентраций 100 – 30 % (ат.) Li изменяется по кривой с минимумом. Значения параметра решетки a следующие: 0,3510 нм при 100 % (ат.) Li; 0,3492 нм при 57 % (ат.) Li; 0,3517 нм при 30 % (ат.).

2.5.12. Диаграмма состояния системы магний – иридий (Mg – Ir)

Термический анализ сплавов проводился лишь до концентраций Ir 16 % (по массе) со стороны Mg. Диаграмма состояния (рис.40) характеризуется эвтектическим превращением, протекающим при 615 °С. Концентрация эвтектической точки, установленная экстраполяцией кривой ликвидуса до

эвтектической горизонтали, составляет около 20,7 % (по массе) Ir или 3,2 % (ат.) Ir.

Растворимость Ir в твердом Mg не превышает 1,4 % (по массе) или 0,18 % (ат.). В системе Ir – Mg установлено образование двух промежуточных фаз.

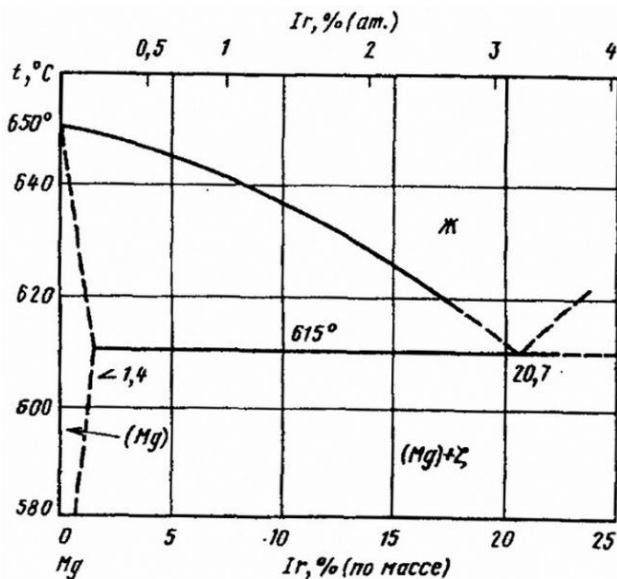


Рис.40. Диаграмма состояния Mg- Ir [3]

2.5.13. Диаграмма состояния системы магний – индий (Mg – In)

На рис.41 приведена диаграмма состояния Mg – In.

При кристаллизации в системе имеет место образование фаз β и (In) по перитектическим реакциям:

- Ж + (Mg) $\leftrightarrow$ β при температуре 484 °С и концентрации -25 % (ат.) In в жидкости;
- Ж + $\beta \leftrightarrow$ (In) при температуре 160,2 °С и концентрации -97 % (ат.) In в жидкости.

При охлаждении фаза β претерпевает упорядочение с образованием фаз β' и β'' . Фаза β' образуется при температуре 356 °C (355 °C) и концентрации 29 % (ат.) In, а фаза β'' при температуре 338 °C и концентрации 46 % (ат.) In (47 % (ат.) In).

Состав фазы β соответствует формуле Mg_3In ; фазы β_3 – Mg_5In_2 ; β_2 – Mg_2In , что согласуется с данными работы. Имеются также сведения об образовании в системе фазы Mg_2In_5 , которая ранее обозначалась как фаза $MgIn_2$ (или $MgIn_3$). Образование фазы Mg_2In_5 противоречит результатам более поздней работы.

Максимальная растворимость Mg в твердом (In) составляет – 2 % (ат.). Растворимость In в твердом (Mg) при температуре 484 °C равна 19,4 % (ат.), при температуре 327 °C – 18,7 % (ат.), при температуре 200 °C – 13,9 % (ат.).

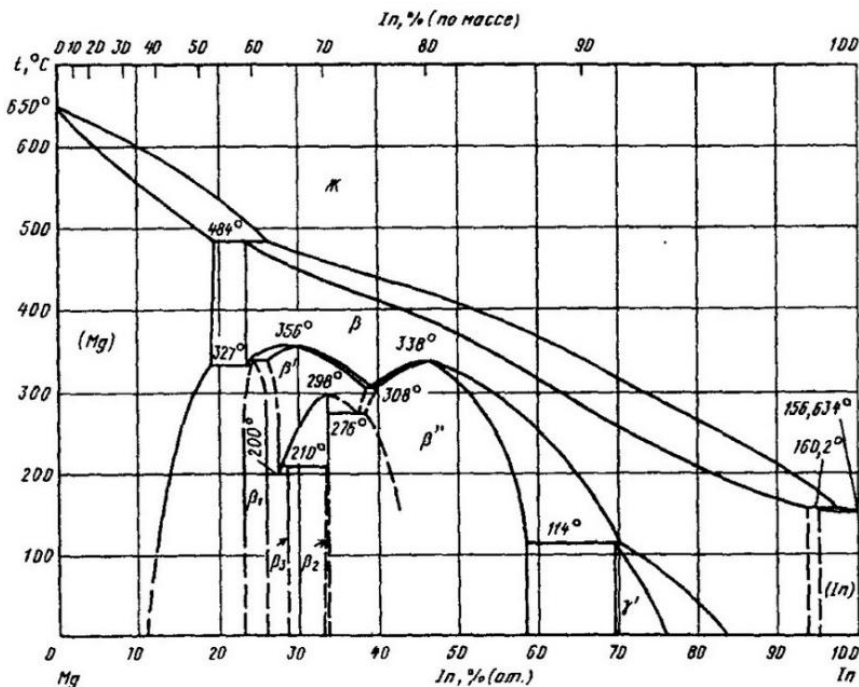


Рис.41 Диаграмма состояния Mg – In [3]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии показаны потенциальные возможности расширения применения алюминия и его сплавов. Перспектива использования алюминия определяется его большими природными запасами и ценным комплексом химических, физических и механических свойств. Больше всего алюминевые сплавы применяют в планере вертолетов и самолетов, летающих со скоростью до 2500 км/ч. В самолетостроении и вертолетостроении алюминиевые, магниевые сплавы нашли широкое применение.

Рассмотрены перспективы развития деформируемых магниевых сплавов, влияние легирующих элементов и параметров деформации на структуру, механические и коррозионные свойства магниевых сплавов. В учебном пособии магний рассмотрен как самый легкий конструкционный материал, используемый в промышленных масштабах.

Пособие подготавливает студента к умению прогнозировать структурно-фазовые изменения в сплавах при внешних воздействиях, анализировать необходимый комплекс эксплуатационных и технологических свойств сплавов, а также к освоению специальных дисциплин, изучающих основные производственные технологии и процессы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пикунов М.В. Металловедение / М.В. Пикунов, А.И. Десипри. М.: Металлургия, 1980.- 256 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев.- 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Н.П. Лякишев. – М.: Машиностроение, 1996.-992 с.
4. Лившиц Б.Г. Металлография: учебник для студ. металлург. вузов./ Б.Г. Лившиц. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
5. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов: учебник для металлургических специальностей. / Ю.М. Лахтин. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
6. Пикунов М.В. Современные проблемы материаловедения и металлургии. Кристаллизационные процессы: учеб. пособие / Пикунов М.В., Баженов В.Е. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2016. – 95 с.
7. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, В.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Машиностроение, 2003.– 784 с.
8. Шишков М.М. СНГ. Марочник сталей и сплавов ведущих промышленных стран мира: справочник / М.М. Шишков, А.М. Шишков.– 3-е изд., доп.- Донецк: Юго – Восток, 2005. – 576 с.
9. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов.– 3-е изд., перераб. и доп.- М.: МИСИС, 1999. – 416 с.
10. Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение Справочник / В.М. Белецкий,

Г.А. Кривов; Под общ. ред. акад. И.Н. Фридляндера.– Киев: КОМИНТЕХ, 2005.– 365 с.

11. Квасов Ф.И. Промышленные алюминиевые сплавы. Справочное издание / Ф.И. Квасов, И.Н. Фридляндер (ред.).– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Металлургия, 1984.– 528 с.

12. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо.; Пер с англ.– М.: Металлургия, 1979.– 640 с.

13. Хэтч Дж.Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение. Справочник / Дж.Е. Хэтч. Пер. с англ.– М.: Металлургия, 1989.– 422 с.

14. Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем: учебное пособие для вузов /А.М. Захаров.– М.: Металлургия, 1990.– 240 с.

15. Белов Н.А. Диаграммы состояния тройных и четверных систем: учебное пособие для вузов /Н.А. Белов.– М.: "МИСИС", 2007.– 360 с.

16. Смирягин А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова.– 3-е изд., доп. и перераб.– М.: Металлургия, 1974.– 488 с.

17. Эйдензон М.А. Магний / М.А. Эйдензон; Перев. с англ.– М.: Металлургия, 1969.– 352 с.

18. Эмли Е.Ф. Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов / Е.Ф. Эмли; Перев. с англ.– М.: Металлургия, 1972.– 488 с.

19. Портной К.И. Магниевые сплавы. Свойства и технология. Справочник / К.И. Портной, А.Л. Лебедев.– М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1952.– 736 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Примерное сравнение обозначений для чистого алюминия и алюминиевых сплавов

Ниже приведена таблица соответствия популярных марок / обозначений алюминия и алюминиевых сплавов. Стандарты: США – Канада – Франция – Германия – Великобритания – Италия – Япония.

Международное		Канада / Canada	Франция / France	Германия / Germany		Великобритания / GB	Италия / Italy	Япония / Japan
Международная аббревиатура алюминевой ассоциации (AA) США	ИСО/ISO R209	Аббревиатура Alcan	Аббревиатура NF A02-004	Аббревиатура ДИН - DIN 1700	Аббревиатура ДИН - DIN 17007	Аббревиатура BS, BS-L, DTD	Аббревиатура UNI	Аббревиатура JIS
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1050A	Al99,5	1S	A-5	Al99,5	3.0255	1B	P-AlP99,5	.
1070A	Al99,7	99.70	A-7	Al99,7	3.0275	.	P-AlP99,7	.
1080A	Al99,8	99.80	A-8	Al99,8	2.0285	1A	P-Al99,8	.
(1199)	.	99.99	A-99	Al99,98 R	3.0385	1	.	.
1200	Al99	2S	A-4	Al99	3.0205	1C	P-AlP99,0	.
2007	.	.	A-U4Pb	AlCuMgPb	3.1645	.	.	.
2011	Al-Cu6BiPb	28S	A-U5PbBi	AlCuBiPb	3.1655	FC1	P-AlCu5,5PbBi	.

Продолжение прил. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2014	Al-Cu4SiMg	.	A-U4SG	AlCuSiMn	3.1255	H15	P-AlCu4,4SiMnMg	.
2017A	Al-Cu4Mg	17S	A-U4G	AlCuMg1	3.1325	H14	P-AlCu4MgMn	A2017
2024	Al-Cu4Mg1	24S	A-U4G1	AlCuMg2	3.1355	2L97/98	P-AlCu4,5MgMn	.
2117	Al-Cu2Mg	16S	A-U2G	AlCu2,5Mg0,5	3.1305	2L69	P-AlCu2,5MgSi	.
3003	Al-Mn1Cu	D3S	A-M1	AlMnCu	3.0517	.	P-AlMn1,2Cu	.
3004	.	4S; D4S	A-M1G	AlMn1Mg1	3.0526	.	P-AlMn1,2Mg	.
3005	.	.	A-MG0,5	AlMn1Mg0,5	3.0525	.	.	.
3103	Al-Mn1	3S	.	AlMn1	3.0515	N3	P-AlMn1,2	.
3105	.	4S; D4S	.	AlMn0,5Mg0,5	3.0505	N31	.	.
5005A	Al-Mg1	B57S	A-G0,6	AlMg1	3.3315	N41	P-AlMg0,9	.
5049	.	B4S	A-G2,5MC	AlMg2Mn0,8	3.3527	.	.	.
5050B	Al-Mg1,5	A57S	A-G1,5	AlMg1,5	3.3316	.	P-AlMg1,5	.
5052	Al-Mg2,5	57S	(5052)	AlMg2,5	3.3523	.	P-AlMg2,5	A5052
5056A	Al-Mg5	56S; A56S	.	AlMg5	3.3355	N6	P-AlMg5	A5056
5082	Al-Mg4	.	.	AlMg4,5	3.3345	.	P-AlMg4,4	.
5083	Al-Mg4,5Mn	D54S	A-G4,5MC	AlMg4,5Mn	3.3547	N8	P-AlMg4,5	.
5086	.	B54S	A-G4MC	AlMg4Mn	3.3545	(N5/6)	P-AlMg4,4	.
5251	Al-Mg2	M57S	A-G2M	AlMg2Mn0,3	3.3525	N4	P-AlMg2Mn	.
5454	Al-Mg3Mn	B53S	A-G3MC	AlMg2,7Mn	3.3537	N51	P-AlMg2,7Mn	.
5754	Al-Mg3	53S	A-G3M	AlMg3	3.3535	.	(P-AlMg3,5)	.
6005A	(Al-SiMg)	(51S)	A-SG0,5	AlMgSi0,7	3.3210	(H10)	.	.
6012	.	.	A-SGPb	AlMgSiPb	3.0615	.	P-AlSiMgMn	.
6060	Al-MgSi	50S	A-GS	AlMgSi0,5	3.3206	H9	P-AlMgSi	.
6061	Al-Mg1SiCu	65S; CS5S	(6061)	AlMg1SiCu	3.3211	H20	P-AlMg1SiCu	.
6082	Al-Si1Mg	B51S	A-SGM0,7	AlMgSi1	3.2315	H30	P-AlMgSi	.

Окончание прил.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7020	Al-Zn4,5Mg1	D74S	A-Z5G	AlZn4,5Mg1	3.4335	.	P-AlZn4,5Mg	.
7022	.	79S	A-Z4GU	AlZnMgCu0,5	3.4345	.	.	.
7075	Al-Zn6MgCu	75S	A-Z5GU	AlZnMgCu1,5	3.4365	2L95/96	P-AlZn5,8MgCu	A7075

* Международное обозначение - обозначение Алюминиевой ассоциации = Aluminium Association (AA), Вашингтон, США. Европейцы переходят на эти обозначения + продолжают использовать национальные.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Основные особенности и области применения российских и зарубежных магниевых литейных сплавов

Марка сплава	Основные особенности и области применения
1	2
МЛЗ	Применяется очень редко в связи с низкими прочностными свойствами
МЛ4	Для литья в землю (З) и оболочковые формы (О). Обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью.
МЛ4 п.ч.	Детали корпусов и систем управления самолетов, подвергающиеся статическим и динамическим нагрузкам. Корпуса приборов и переносных инструментов.
AZ63A	Вращающиеся детали (бобины) для текстильной промышленности, корпуса переносных инструментов, приборов.
МЛ1	Высокая прочность, хорошие пластичность и вязкость. Литейные свойства удовлетворительные. Отливки простой формы и небольших размеров
МЛ5	Удовлетворительная коррозионная стойкость
МЛ5 п.н.	Повышенная (в 5-10 раз) коррозионная стойкость по сравнению с МЛ5
МЛЗ о.н.	Пониженная коррозионная стойкость по сравнению с МЛ5. Малая склонность к образованию горячих трещин. Детали всех методов фасонного литья (З, К, О, И, Г, Д), в том числе сложной формы. Нагруженные детали, приборы, в т.ч. тормозные барабаны
AZ91C	Отливки с высокой прочностью, твердостью и хорошей пластичностью. Используется вместо сплава AZ63A, если не требуется высокая коррозионная стойкость
МЛ6	Хорошие литейные свойства и удовлетворительная герметичность при изготовлении отливок методами литья З, К, Д. Пониженная пластичность. Высоко- и средненагруженные детали - различные корпуса, детали приборов, аппаратуры. Целесообразно применять для деталей, требующих повышенного предела текучести

1	2
MAG3	Основной английский литейный сплав. Хорошие литейные свойства. Отливки герметичны. Применяется для литья под давлением (Д)
МЛ8	Высокие и однородные механические свойства при изготовлении отливок методами литья 3. К, 0. Микрорыхлота снижает свойства отливок в значительно меньшей степени, чем в случае сплава МЛ5. Литейные свойства удовлетворительные. Герметичность повышенная в сравнении с МЛ5. Высоконагруженные детали (кронштейны, фермы, детали управления, детали приборов, агрегатов и др.), в основном, простой конфигурации. Может заменять в конструкциях литейные и деформируемые алюминиевые сплавы АЛ9, АЛ4, АК4, АК6
МЛ 9	Детали с толщиной стенки 6 мм выдерживают пневмодавление более 15 МПа. Детали, работающие длительно при температуре до 250-300°C и кратковременно 350-400 °C
МЛ10	Хорошие литейные свойства (3, К). Рекомендуется для отливок сложной формы. Герметичность повышенная - отливки с толщиной стенки более 5 мм выдерживают пневмодавление до 25-30 МПа. Механические свойства отливок по сечению однородные, близкие к свойствам отдельно отлитых образцов. Детали характеризуются высокой стабильностью размеров, высокими значениями длительной прочности и сопротивления ползучести. Нагруженные детали, работающие длительно при температурах до 250 °C, кратковременно - до 350 °C
МЛ11	Детали двигателей, работающие при нагреве до 250-300°C, а также детали, от которых требуется повышенная герметичность. Недостаток сплава - пониженные прочностные свойства при комнатной температуре

1	2
МЛ12	Фасонные отливки сравнительно простой конструкции почти всеми методами литья - З, К, О, В, Г. Литейные свойства удовлетворительные. Отливки обладают высокими и однородными механическими свойствами. Герметичность повышенная по сравнению со сплавом МЛ15. Детали (колеса, реборды и др.), длительно работающие при температурах до 200 °С и кратковременно - до 250°С. Сплав обладает хорошими характеристиками усталостной прочности
MAG4	Детали двигателей и самолетов
МЛ15	Герметичность отливок повышенная. Детали с толщиной стенки 3 мм выдерживают гидростатическое давление более 15 МПа и пневмодавление более 10 МПа. Механические свойства по всему сечению отливок однородные. Сплав рекомендуется для изготовления отливок методами литья З, К, Г, В, в том числе отливок сложной формы. Нагруженные детали, длительно работающие при температурах до 200 °С, кратковременно - до 350°С. Нагруженные детали двигателей
E233A MAG8	Сплав работает при температурах 150-260 °С. Корпуса двигателей
MC8	Применяется как материал с высокой герметичностью для работы при повышенных температурах
ZE41A	Многоцелевое применение, где требуются литейные свойства, хорошие усталостные свойства и сопротивление ползучести. Отливки имеют хорошую герметичность и однородность свойств. Применяется до температуры 160 °С
NZ32A	Используется для деталей авиационных двигателей , работающих при температурах до 343 °С. Обладает высокой жаропрочностью
K1A	Пониженная прочность, но хорошие демпфирующие характеристики

Окончание прил.2

OE22A	Высокопрочный сплав для работы при температурах до 316 °C
OE21A	Применяется в деталях, где требуется высокий предел текучести при температурах до 250 °C
ZE63A	Хорошие литейные свойства, высокая прочность, хорошая пластичность и высокое сопротивление усталостным нагрузкам, не имеет тенденции к микропористости. Упрочняется при термообработке в среде водорода
ZK61A	Самая высокая удельная прочность в сочетании с хорошей пластичностью. Барабаны авиационных колес

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Области применения магниевых деформируемых сплавов

Марка сплава	Основные особенности и области применения
1	2
MA1	Повышенная коррозионная стойкость. Сплав не склонен к коррозии под напряжением. Хорошая технологичность и свариваемость. Емкости для бензина, масла, детали трубопроводов, различные детали и сварные конструкции, подвергающиеся умеренным нагрузкам
MA1A	Наиболее высокие характеристики прессования
MAG-S-101MA-E - 101	Низкая прочность и хорошая свариваемость. Применяется в емкостях для топлива и масел
MA2	Удовлетворительная коррозионная стойкость, небольшая склонность к коррозионному растрескиванию. В интервале температур 275-400 °С - высокая пластичность. Кованные и штампованные детали сложной конфигурации для сварных конструкций. Плиты для полиграфической промышленности (клише)
AZ318 AZ31C	Сплавы общего назначения - свариваемые, средняя прочность и хорошая технологичность (при 20 °С). Высокая технологичность при прессовании.
MAG-S-111	Сплавы общего назначения
MP1, MB1, MS1	Хорошая технологичность, в том числе при горячей прокатке
MA2-1, MA2-1 п.ч.	Удовлетворительная коррозионная стойкость (MA2-1). Сплав MA2-1пч - более высокая коррозионная стойкость. Детали вертолетов, оперения, люки, дверцы, сидения, детали внутреннего набора самолетов, панели.

Продолжение прил.3

1	2
МА5	Коррозионная стойкость удовлетворительная, склонность к коррозионному растрескиванию. Технологическая пластичность ниже, чем у сплава МА2-1. Нагруженные детали
AZ80A	Высокопрочный сплав. Прессованные полуфабрикаты, штамповки и поковки (барабаны авиационных колес)
МА8, МА8п.ч.	Сплав МА8 п.ч. более коррозионностоек, чем сплав МА8. Оба сплава не склонны к коррозионному растрескиванию. Хорошая технологичность и удовлетворительная свариваемость. Емкости для бензина, масла и других не агрессивных по отношению к магнию жидкостей, детали трубопроводов, а также различные детали и сварные конструкции, подвергающиеся умеренным нагрузкам. Листы для обшивки, детали внутреннего набора, электрохимического назначения. Плиты для панелей самолетов. Штамповки для деталей сложной конструкции
МAM	Повышенная коррозионная стойкость. Сплав применяется только в виде прессованных полуфабрикатов и штамповок (невысокая технологическая пластичность). Высокое сопротивление ползучести до 250 °С
МА12	Преимущества перед сплавом МАП по технологической пластичности, свариваемости и коррозионной стойкости. Не склонен к коррозии под нагреванием.
МАИ	Коррозионная стойкость удовлетворительная. Не склонен к коррозионному растрескиванию. Сваривается только контактной сваркой. Детали узлов управления, штампованных барабанов авиационных колес и других нагруженных и высоконагруженных деталей и узлов конструкций
ZK60A	Высокий предел текучести и хорошая пластичность. Предел текучести при испытании не самый высокий по сравнению с другими сплавами для прессования. Прессованные и штампованные полуфабрикаты (барабаны авиационных колес)

1	2
MAG-E-161	Высокопрочный сплав с хорошим сопротивлением коррозии. Технологичность и свариваемость ограничены
MA15	Коррозионная стойкость удовлетворительная, не склонен к коррозии под напряжением. Технологическая пластичность при температурах деформации высокая. Нагруженные детали самолетов, в том числе сварные конструкции, требующие повышенного предела текучести при сжатии
MA17	Неконструкционный сплав. Плиты как материал со специальными свойствами для звукопроводов
MA18	Высокая пластичность при комнатной и криогенной температурах, повышенный модуль упругости (на 5-10 %). Сплав хорошо прокатывается, сваривается и подвергается листовой штамповке при комнатной температуре. Коррозионная стойкость удовлетворительная, не склонен к коррозии под напряжением. Детали приборов и аппаратов, работающих при комнатной и криогенных температурах
MA19	Наиболее высокопрочный деформируемый магниевый сплав, коррозионная стойкость удовлетворительная, не склонен к коррозии под напряжением. Применяется для тех же целей, что и сплав МАИ, но имеет более высокую прочность при комнатной и повышенных температурах
MA20	Удовлетворительная коррозионная стойкость, не склонен к коррозионному растрескиванию. Пластичность в горячем состоянии высокая. Возможна штамповка деталей несложной формы при комнатной температуре. После сварки не требуется отжиг для снятия напряжений. Сварные детали сложной геометрической формы
ZEI0A	Сплав общего назначения с хорошей свариваемостью, не требует отжига для снятия остаточных напряжений

1	2
MA21	Пониженная плотность и высокая технологическая пластичность. Крупногабаритные штамповки и поковки (предел сравним с аналогичными полуфабрикатами из алюминиевого сплава АМгб
MP7	Невысокая прочность, но хорошая пластичность и технологичность при обработке давлением
MAG-E-121	Средняя прочность с прекрасной обрабатываемостью резанием. Технологичность удовлетворительная. Свариваемость ограниченная
ZK40	Высокий предел текучести и более высокие характеристики прессования по сравнению со сплавом ZK60A
MAQ-S-151, MAG-E-151	Высокопрочный сплав с высоким сопротивлением коррозии
MAG-S-141, MAG-E-141	Сплавы средней прочности с высоким сопротивлением коррозии и хорошей свариваемостью
HP4	Невысокая прочность, но высокие пластичность и технологичность при прокатке, в т.ч. при холодной прокатке
HK3IA	Работает при температурах от 204 до 316 °С. Хорошие коррозионные свойства, высокая технологичность и хорошая свариваемость
HK21A	Работает при температурах 260 – 317 °С. Коррозионностойкий свариваемый сплав с хорошей технологичностью
LA141A	Наиболее легкий магниевый сплав с высокими характеристиками технологической пластичности и свариваемости. Для деталей приборов, работающих на сжатие или срез при температурах ниже 93 °С

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ	4
1.1. Свойства алюминия	4
1.2. Классификация алюминиевых сплавов	9
1.3. Двойные диаграммы алюминиевых сплавов	27
1.3.1. Диаграмма состояния системы алюминий – литий (Al – Li)	27
1.3.2. Диаграмма состояния системы алюминий – кремний (Al – Si)	28
1.3.3. Диаграмма состояния системы алюминий – никель (Al – Ni)	29
1.3.4. Диаграмма состояния системы алюминий – бериллий (Al – Be)	31
1.3.5. Диаграмма состояния системы алюминий – кальций (Al – Ca)	32
1.3.6. Диаграмма состояния системы алюминий – кобальт (Al-Co)	34
1.3.7. Диаграмма состояния системы алюминий – титан (Al – Ti)	35
1.3.8. Диаграмма состояния системы алюминий – цинк (Al – Zn)	36
1.4. Сплавы тройных систем алюминия	38
1.4.1. Сплав системы Al – Mg – Si	38
1.4.2. Сплав системы Al – Cu – Mg	40
1.4.3. Сплав системы Al-Zn-Mg	41
1.4.4. Сплав системы Al – Cu – Si	42
2. МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ	43
2.1. Свойства магния	43
2.2. Сплавы на основе магния	45
2.3. Классификация магниевых сплавов	50
2.4. Международная маркировка магниевых сплавов	53
2.5. Системы двойных диаграмм	61
2.5.1. Диаграмма состояния системы кальций –	61

магний (Ca – Mg)	
2.5.2. Диаграмма состояния системы кобальт – магний (Co – Mg)	62
2.5.3. Диаграмма состояния системы висмут – магний (Bi – Mg)	63
2.5.4. Диаграмма состояния системы германий – магний (Ge – Mg)	64
2.5.5. Диаграмма состояния системы серебро – магний (Ag – Mg)	65
2.5.6. Диаграмма состояния системы никель – магний (Ni – Mg)	67
2.5.7. Диаграмма состояния системы кадмий – магний (Cd – Mg)	68
2.5.8. Диаграмма состояния системы магний – галлий (Mg – Ga)	69
2.5.9. Диаграмма состояния системы церий – магний (Ce – Mg)	70
2.5.10. Диаграмма состояния системы мышьяк – магний (As – Mg)	71
2.5.11. Диаграмма состояния системы литий – магний (Li – Mg)	72
2.5.12. Диаграмма состояния системы магний – иридий (Mg – Ir)	73
2.5.13. Диаграмма состояния системы магний – индий (Mg – In)	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	77
Примерное сравнение обозначений для чистого алюминия и алюминиевых сплавов	79
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Основные особенности и области применения российских и зарубежных магниевых литейных сплавов	82
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Области применения магниевых деформируемых сплавов	86

Учебное издание

Жиляков Дмитрий Геннадьевич
Горожанкина Ольга Владимировна
Федорова Елена Николаевна
Юрьева Валентина Александровна

**ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ
И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ
ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Компьютерная верстка Е.Н. Федорова

Подписано к изданию _____.2018.

Объем данных Мб.

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»**

394026 Воронеж, Московский просп., 14
Отдел оперативной полиграфии ВГТУ
394006 Воронеж, ул.20 лет Октября, 84