

# Лекция 12

## Металлы и сплавы с высокой удельной прочностью

### Содержание

1. Титан и титановые сплавы
2. Алюминий и сплавы на его основе
3. Магний и магниевые сплавы
4. Бериллий и бериллиевые сплавы

# Удельная прочность материалов

**Прочность** конструкционных материалов, используемых в технике, изменяется в очень широком диапазоне— от 100 до 2000 МПа. Однако выбор материала только по значению показателей прочности  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ),  $\sigma_B$  и др. не дает правильной оценки возможностей материала. Для создания конструкции (машины) с минимальной массой большое значение имеет плотность материалов  $\rho$ . С учетом этого более правильно оценивать значение его удельной прочности отношением характеристик прочности  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$  и т. д. к плотности (удельному весу) материала, например  $\sigma_B/\rho$ ,  $\sigma_T/\rho$ , где  $\rho$  — плотность (удельный вес) материала, г/см<sup>3</sup>.

# Удельная прочность некоторых конструкционных материалов

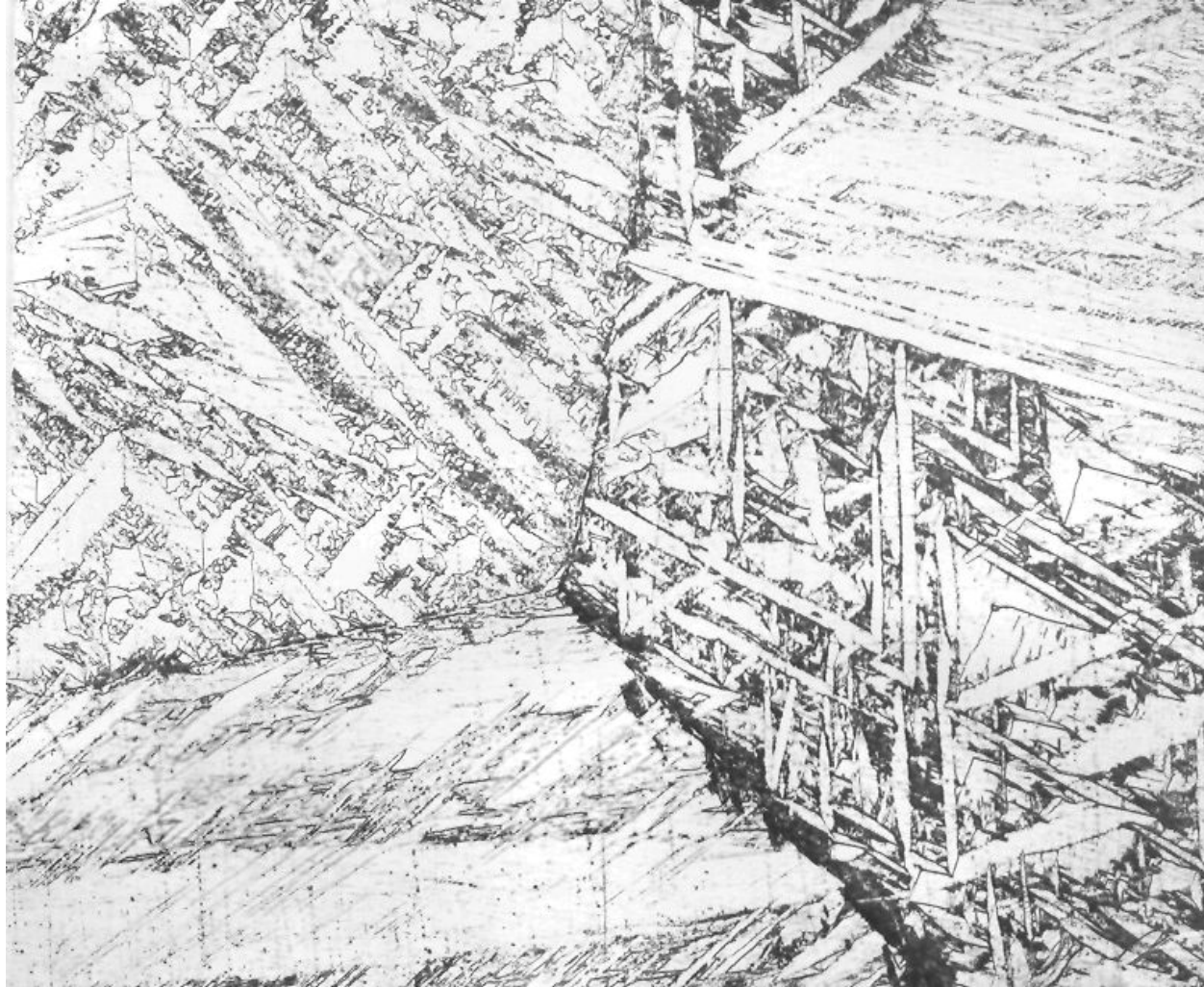
Материал	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B/\rho \cdot 10^5$ см
Углеродистая конструкционная сталь	45-110	7,8	6—15
Легированная конструкционная сталь	110-140	7,8	15—19
<b>Материалы с высокой удельной прочностью</b>			
Магниевые сплавы МА2, МА8	22—28	1,8	12—15
Алюминиевые сплавы Д16, В95	42—60	2,8	16—21
Титановые сплавы	120-140	4,5	26 -- 40
Стеклопластики	70	1.8	38 -- 50

# Титан и титановые сплавы

**Титан** - химический элемент IV группы периодической системы Менделеева; атомный номер 22, атомная масса 47,90; имеет серебристо-белый цвет, относится к легким металлам. Существует в виде двух аллотропических модификаций: ниже температуры 882,5 °С устойчива  $\alpha$ -Ti с гексагональной плотноупакованной решеткой ( $a = 0,2951$  нм,  $c = 0,4679$  нм), а выше этой температуры -  $\beta$ -Ti с кубической объемноцентрированной решеткой ( $a = 0,3269$  нм). Примеси и легирующие добавки могут существенно изменять температуру  $\alpha/\beta$  превращения и механические свойства.

Марка титана	Содержание примесей, %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	НВ
Иодистый	0,093	450-600	380-500	20-50	50	207
BTI-0	0,3	50-300	100-150	50-60	70-80	130

# Микроструктура титана ВТ1-0



# Основные свойства титана

**По плотности и удельной теплоемкости** титан занимает промежуточное место между алюминием и железом. Механическая прочность примерно вдвое больше, чем чистого железа, и почти в шесть раз выше, чем алюминия. Но титан может активно поглощать кислород, азот и водород, которые резко снижают пластичность.

**Титан обладает низкой теплопроводностью**, которая в 13 раз меньше теплопроводности алюминия и в 4 раза - железа. Коэффициент термического расширения при комнатной температуре сравнительно мал.

**Модули упругости титана невелики** и обнаруживают существенную анизотропию. Небольшое значение модулей упругости титана - существенный его недостаток, т.к. в некоторых случаях для получения достаточно жестких конструкций приходится применять большие сечения изделий.

**Титан коррозионноустойчив** в атмосферном воздухе, морской воде и морской атмосфере, во влажном хлоре, горячих и холодных растворах хлоридов.

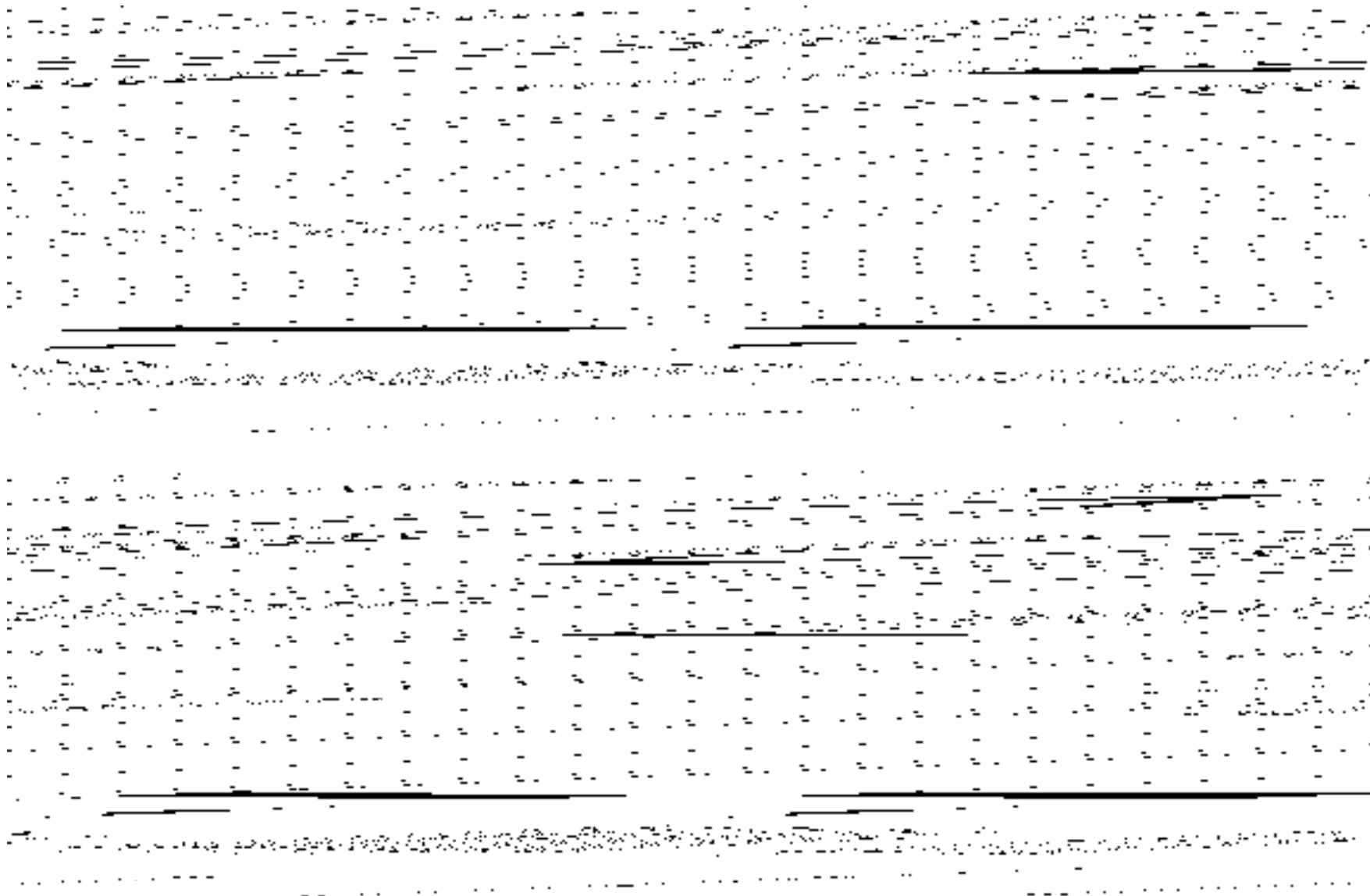
**Низкие антифрикционные свойства**, обусловленные налипанием титана на многие материалы, препятствует работе титана в паре с другими металлами на трение;

# Титановые сплавы

Для получения сплавов титан легируют Al, Mo, V, Mn, Cr, Sn, Zr, Nb, а также, в небольших количествах, и Si. Упрочнение титана ведет одновременно к снижению его пластичности. Титановые сплавы имеют высокую удельную прочность.

Легирующие элементы оказывают большое влияние на температуру полиморфного превращения. Такие элементы, как Al, O, N, повышают температуру полиморфного превращения и расширяют  $\alpha$ -область; их называют  $\alpha$ -стабилизаторами. Такие элементы, как Mo, V, Mn, Cr, Fe понижают температуру полиморфного превращения и расширяют область существования  $\beta$ -фазы; их называют  $\beta$ -стабилизаторами. При легировании титана Mn, Fe, Cr, Si и некоторыми другими элементами образуются химические соединения.

# Влияние легирующих элементов на температуру полиморфного превращения титана





# Состав и механические свойства титановых сплавов

Сплав	Содержание элементов, %				Структура	$\sigma_{B'}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
	Al	V	Mo	Прочие					
BT5	4,5-6,2	1,2	0,9	0,3Zr	$\alpha$ -сплавы	700-950	660-850	10-15	0,3-0,5
ЗМ	3,5-5	-	-	-		600-700	470-650	10	0,45
ПТЗВ	3,5-5	1,2-2,5	-	-	Псевдо- $\alpha$ -сплавы	636	588	10	0,5
OT4	3,5-5	-	-	0,8-2Mn		700-900	550-650	12-20	0,5
BT20	5,5-7,0	0,8-2,5	0,5-2,0	1,5-2,5Zr		950-1150	850-1000	8	0,4-0,5
BT6	5,3-6,8	3,5-5,3	-	-	$(\alpha+\beta)$ -сплавы	1100-1150	1000-1050	14-16	0,3
BT14	3,5-6,3	0,9-1,9	2,5-3,8	0,3Zr		1150-1400	1080-1300	6-10	0,3
BT16	1,6-3,8	4,0-5,0	4,5-5,5	-		1250-1450	1100-1200	4-6	0,4-0,6

## Микроструктура двухфазного титанового сплава



# Термическая обработка титановых сплавов

- **Отжиг** проводится для всех титановых сплавов с целью завершения формирования структуры, выравнивания структурной и концентрационной неоднородности, а также механических свойств. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации, но ниже температуры перехода в  $\beta$ -состояние ( $T_{\text{пп}}$ ) во избежание роста зерна. Применяют *обычный отжиг, двойной или изотермический* (для стабилизации структуры и свойств), *неполный* (для снятия внутренних напряжений).
- **Закалка и старение** (упрочняющая термообработка) применима к титановым сплавам с ( $\alpha + \beta$ )-структурой. Принцип упрочняющей термообработки заключается в получении при закалке метастабильных фаз  $\beta$  и последующем их распаде с выделением дисперсных частиц  $\alpha$  - и  $\beta$  -фаз при искусственном старении. При этом эффект упрочнения зависит от типа, количества и состава метастабильных фаз, а также дисперсности образовавшихся после старения частиц  $\alpha$  - и  $\beta$  -фаз.

## Области применения титановых сплавов

- авиация и ракетостроение (корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, детали крепежа);
- химическая промышленность (компрессоры, клапаны, вентили для агрессивных жидкостей);
- оборудование для обработки ядерного энергетика;
- морское судостроение (гребные винты, корпуса морских судов, подводных лодок);
- криогенная техника.

# Химико-термическая обработка титановых сплавов

- **Термическое оксидирование** осуществляется при нагреве при температуре 850 - 950°С и выдержке в течение 3÷4 часов. Термическое оксидирование поверхности является наиболее простой и действенной химико-термической обработкой, улучшающей антифрикционные свойства титановых сплавов. В результате термического оксидирования поверхностная зона титана состоит из трех основных слоев. Наружный слой представляет собой рутил  $TiO_2$ , средний слой состоит из переходных оксидов, в основном  $TiO$  под которым расположена зона твердого раствора кислорода (диффузионный слой).
- **Азотирование** титановых сплавов проводится при 850—950 °С в азоте высокой чистоты. При азотировании образуется верхний тонкий нитридный слой и твердый раствор азота в  $\alpha$ -титане. Глубина слоя за 30 ч — 0,08 мм с поверхностной твердостью  $HV = 800—850$  . Введение в сплав некоторых легирующих элементов (Al до 3%, Zr 3—5% и др.) повышает скорость диффузии азота, увеличивая глубину азотированного слоя. Азотирование широко применяют в промышленности, в том числе для деталей, работающих при температуре до 500—600 °С.

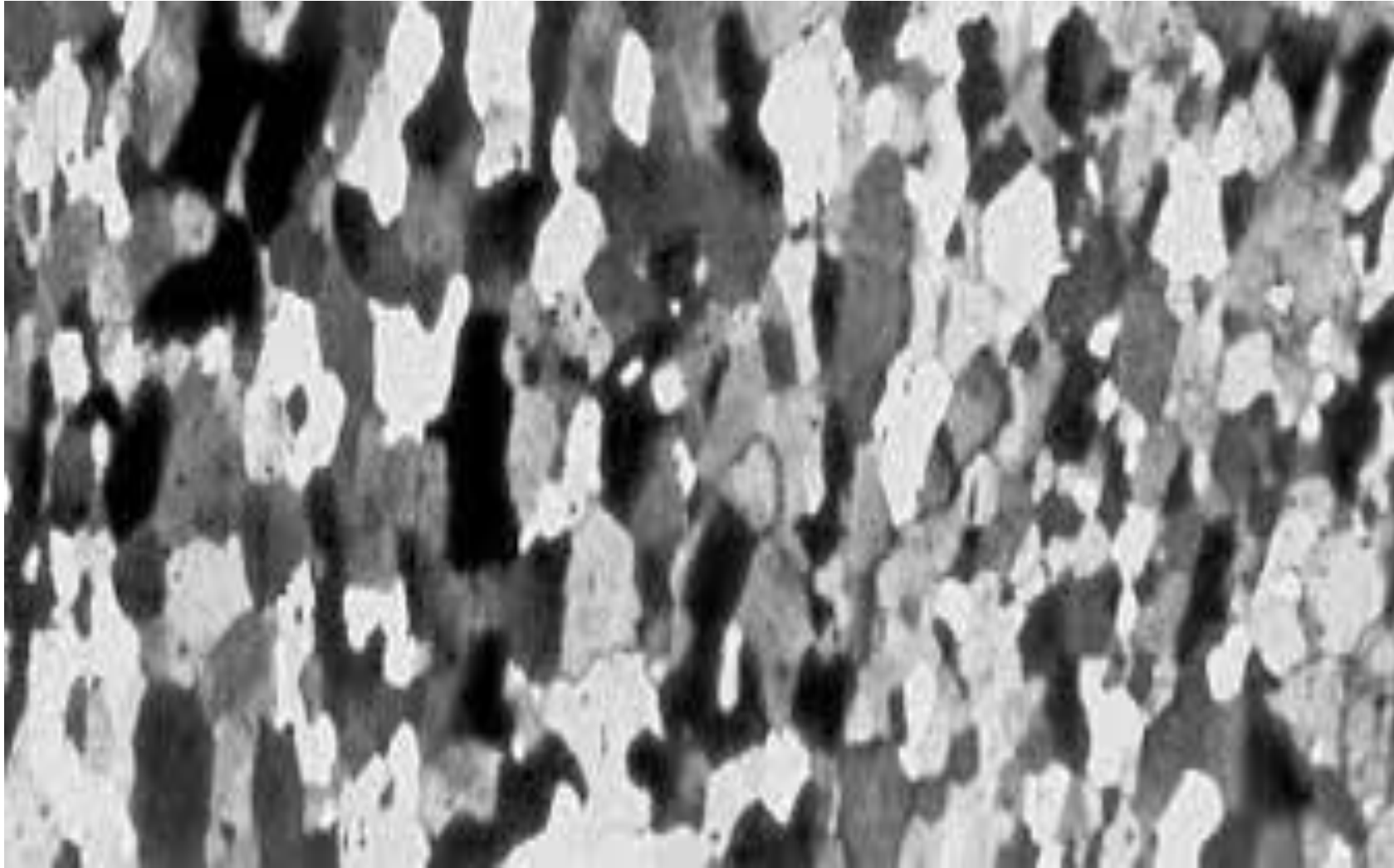
# Алюминий и сплавы на его основе

**АЛЮМИНИЙ** (Al), химический элемент III группы периодической системы, атомный номер 13, атомная масса 26,98. Радиус нейтрального атома алюминия 0,143 нм, радиус иона  $Al^{3+}$  0,057 нм. Практически во всех соединениях степень окисления алюминия +3 (валентность III).

**Алюминий** — типичный металл, кристаллическая решетка кубическая гранецентрированная, период  $a = 0,404$  нм. Температура плавления чистого металла  $660^{\circ}C$ , температура кипения около  $2450^{\circ}C$ , плотность  $2,7$  г/см<sup>3</sup>. Температурный коэффициент линейного расширения алюминия  $2,5 \cdot 10^{-5} K^{-1}$ .

**Алюминий** — мягкий легкий серебристо-белый металл. На воздухе его поверхность покрывается плотной пленкой оксида  $Al_2O_3$ , которая препятствует дальнейшему доступу кислорода и приводит к прекращению реакции, что обуславливает высокие антикоррозионные свойства алюминия. Защитная поверхностная пленка на алюминии образуется также, если его поместить в концентрированную азотную кислоту.

# Микроструктура алюминия



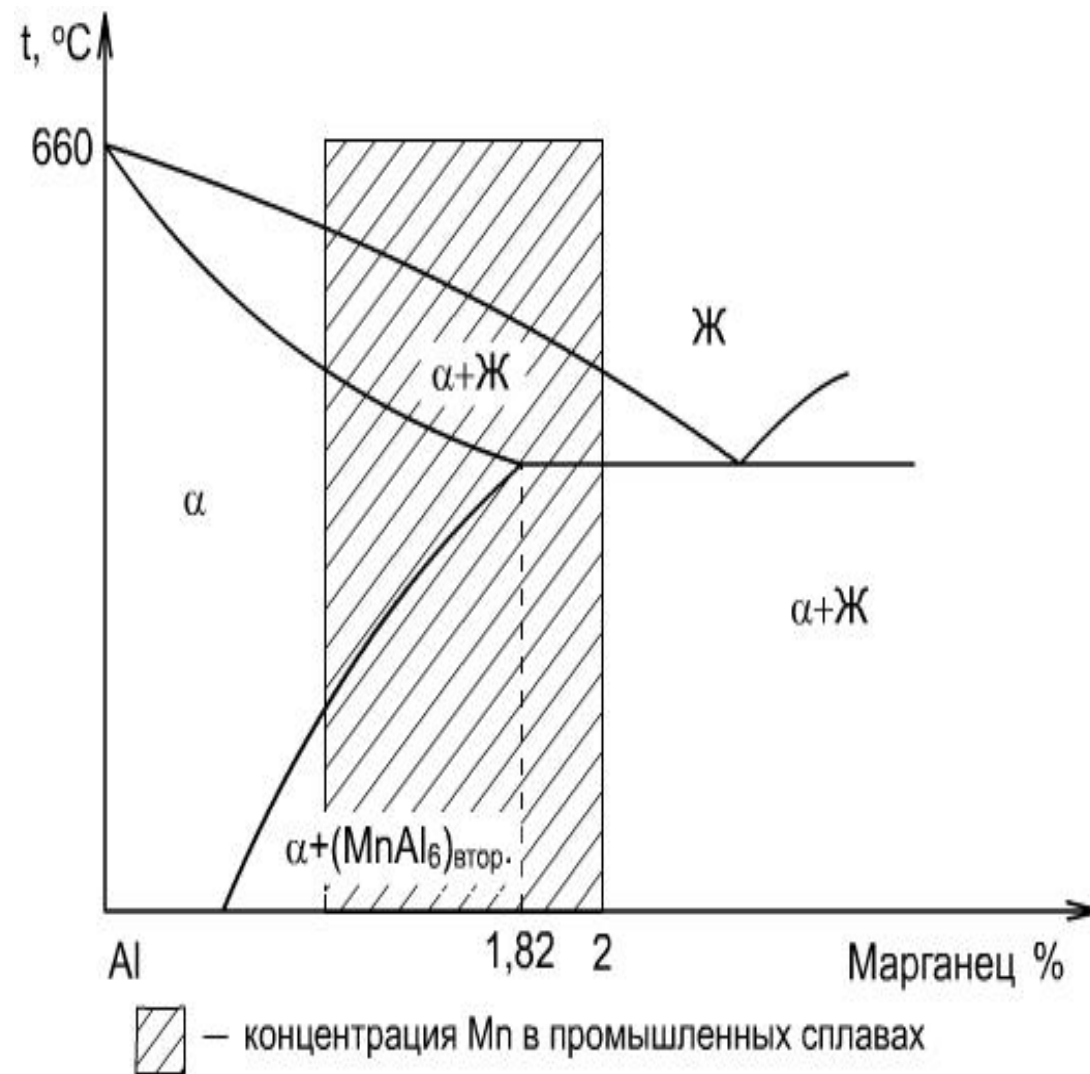
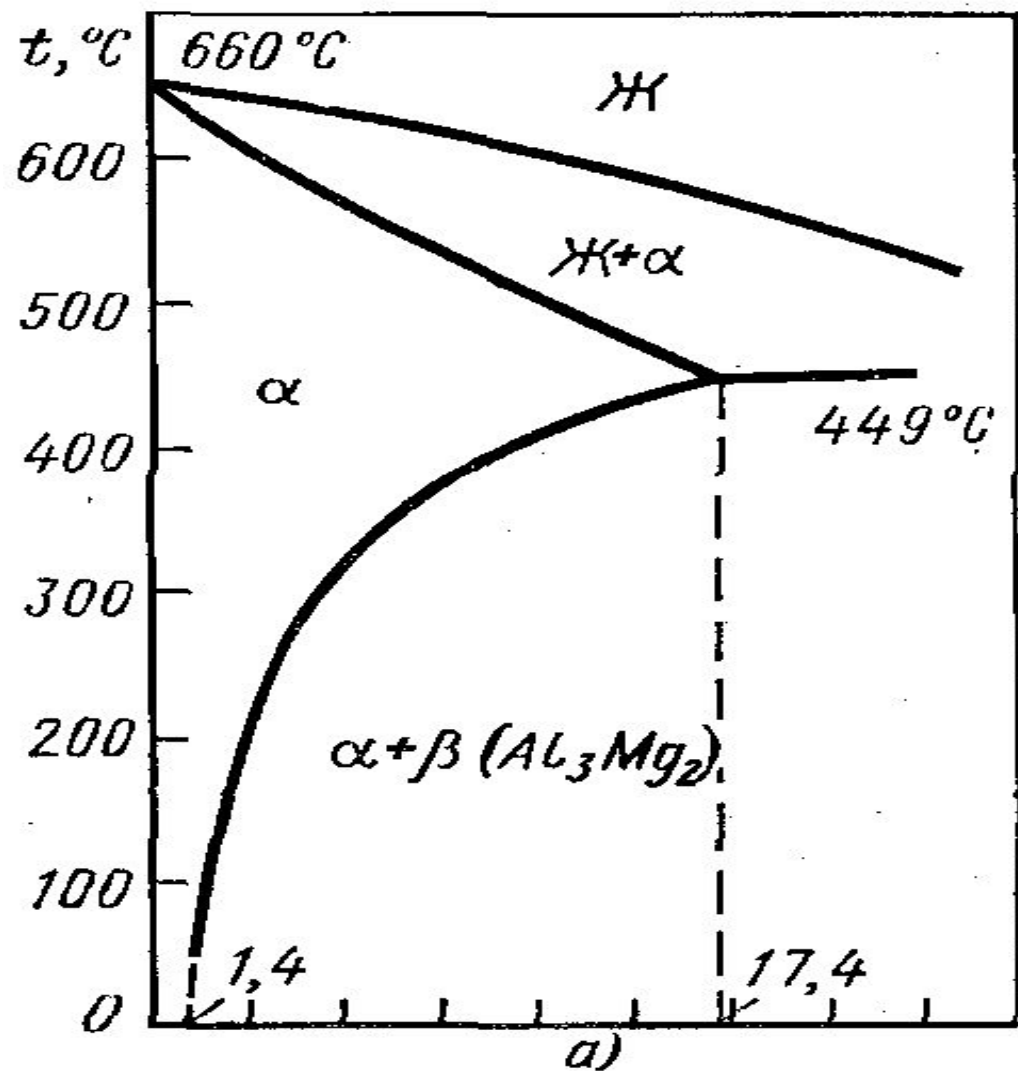
# Механические свойства алюминия

Чистый алюминий выпускают следующих марок: особой чистоты А999 ( $\leq 0,001\%$  примесей), высокой чистоты А995, А99, А97, А95 (0,005-0,05% примесей) и технической чистоты А85, А8, А7, А6, А5, А0 (0,15 - 1,0% примесей). Промышленный алюминий выпускают в виде деформированных полуфабрикатов (профили, прутки и т.д.). Свойства полуфабриката зависят от содержания примесей и состояния поставки.

Марка алюминия	Состояние поставки	$\sigma_{в'}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
А995	литой	50	-	45	15
А5	литой	75	-	29	20
А0	литой	90	-	25	25
А0	Деформиров.	140	100	12	32
А0	Деформиров. и отожженный	90	30	30	25



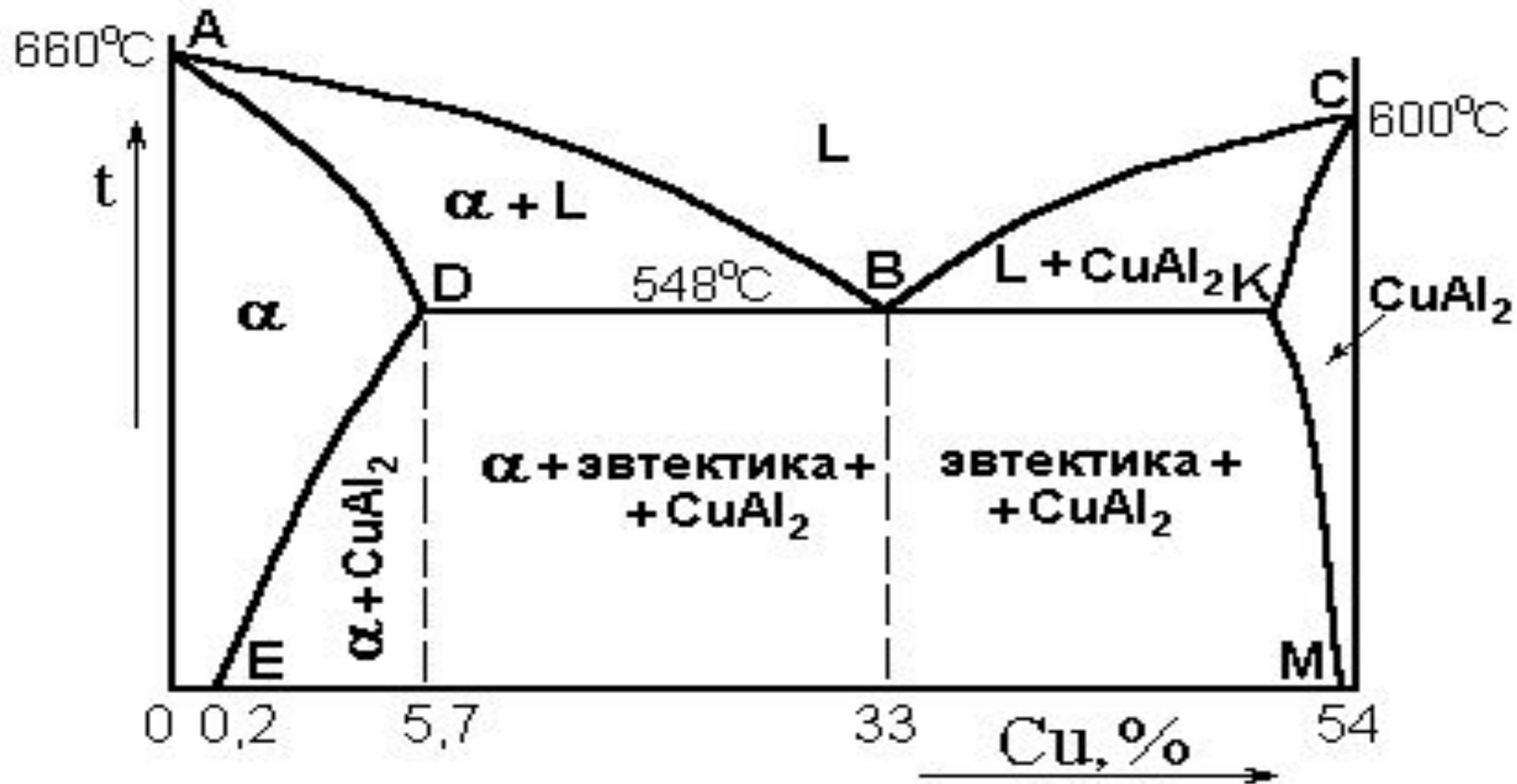
# Диаграммы состояния Al – Mg и Al - Mn



# Алюминиевые сплавы

- Алюминиево-магниевые Al-Mg (ANSI: серия 5xxx , ГОСТ: АМг) характеризуются сочетанием удовлетворительной прочности, хорошей пластичности и коррозионной стойкости. В сплавах этой системы образуется упрочняющая фаза-  $Al_3Mg_2$ . Наиболее широкое распространение в промышленности получили сплавы с содержанием магния от 1 до 5 %. Рост содержания Mg в сплаве существенно увеличивает его прочность. Каждый процент магния повышает предел прочности сплава на 30 МПа, а предел текучести — на 20 МПа
- Алюминиево-марганцевые Al-Mn (ANSI: серия 3xxx; ГОСТ: АМц). Сплавы этой системы обладают хорошей прочностью, пластичностью и технологичностью, высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью. Основными примесями в сплавах системы Al-Mn являются железо и кремний. Оба этих элемента уменьшают растворимость марганца в алюминии.

# Диаграмма состояния Al - Cu



# Термическая обработка дуралюминов

- Термическая обработка дуралюмина состоит из двух этапов. Сначала его нагревают выше линии предельной растворимости (обычно приблизительно до 500 С). При этой температуре его структура представляет собой гомогенный твердый раствор меди в алюминии. Путем закалки химический состав фиксируют при комнатной температуре. При этом раствор получается пересыщенным. В состоянии закалки, дуралюмин очень мягок и пластичен.
- Закаленный дуралюмин имеет малую стабильность и даже при комнатной температуре самопроизвольно происходят изменения. Эти изменения сводятся к тому, что атомы избыточной меди группируются в растворе, образуя кластеры – зоны ГП. За счет неравномерности распределения атомов в кристаллической решетке твердого раствора в ней возникают искажения, которые приводят к значительному повышению твердости и прочности с одновременным снижением пластичности сплава. Изменения структуры закаленного сплава при комнатной температуре носит название **естественного старения**.
- Если сплав подогреть до 100-150 С, то произойдет **искусственное старение**. В этом случае процесс совершается быстро, но упрочнение происходит меньшее. Объясняется это тем, что при более высокой температуре диффузионные перемещения атомов меди осуществляются более легко, поэтому происходит завершено образование фазы  $\text{CuAl}$  и выделение ее из твердого раствора. Упрочняющее же действие полученной фазы оказывается меньшим, чем действие искаженности решетки твердого раствора, возникающей при естественном старении.

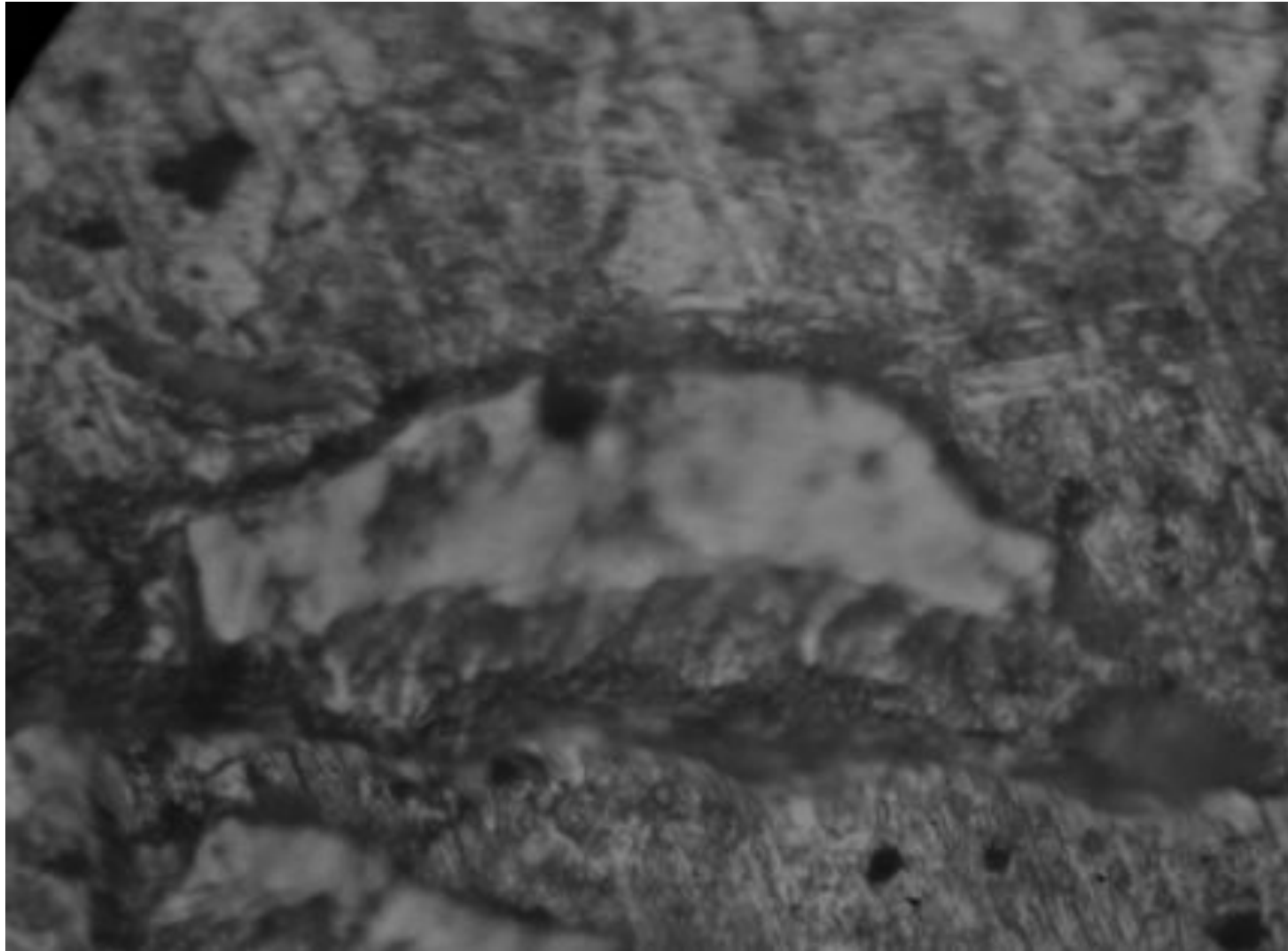
# Старение дуралюминов

Процессы при старении дуралюмина развиваются в несколько этапов. Вначале образуются только обогащенные медью участки в твердом растворе. Их называют *зонами Гинье-Престона (ГП)*. Они представляют собой диски диаметром 4-6 нм и толщиной несколько атомных слоев (зоны ГП-1). При естественном старении этим все и заканчивается. Но при повышенной температуре или длительной выдержке эти зоны растут, и размещение атомов в них становится упорядоченным (зоны ГП-2). Более высокие температуры приводят к образованию на месте этих зон тонких пластин промежуточной фазы  $\theta'$  состава  $\text{CuAl}_2$ , но с другим типом кристаллической решетки. Наконец, при 200-250 °С образуется стабильная  $\theta$ -фаза  $\text{CuAl}_2$ .

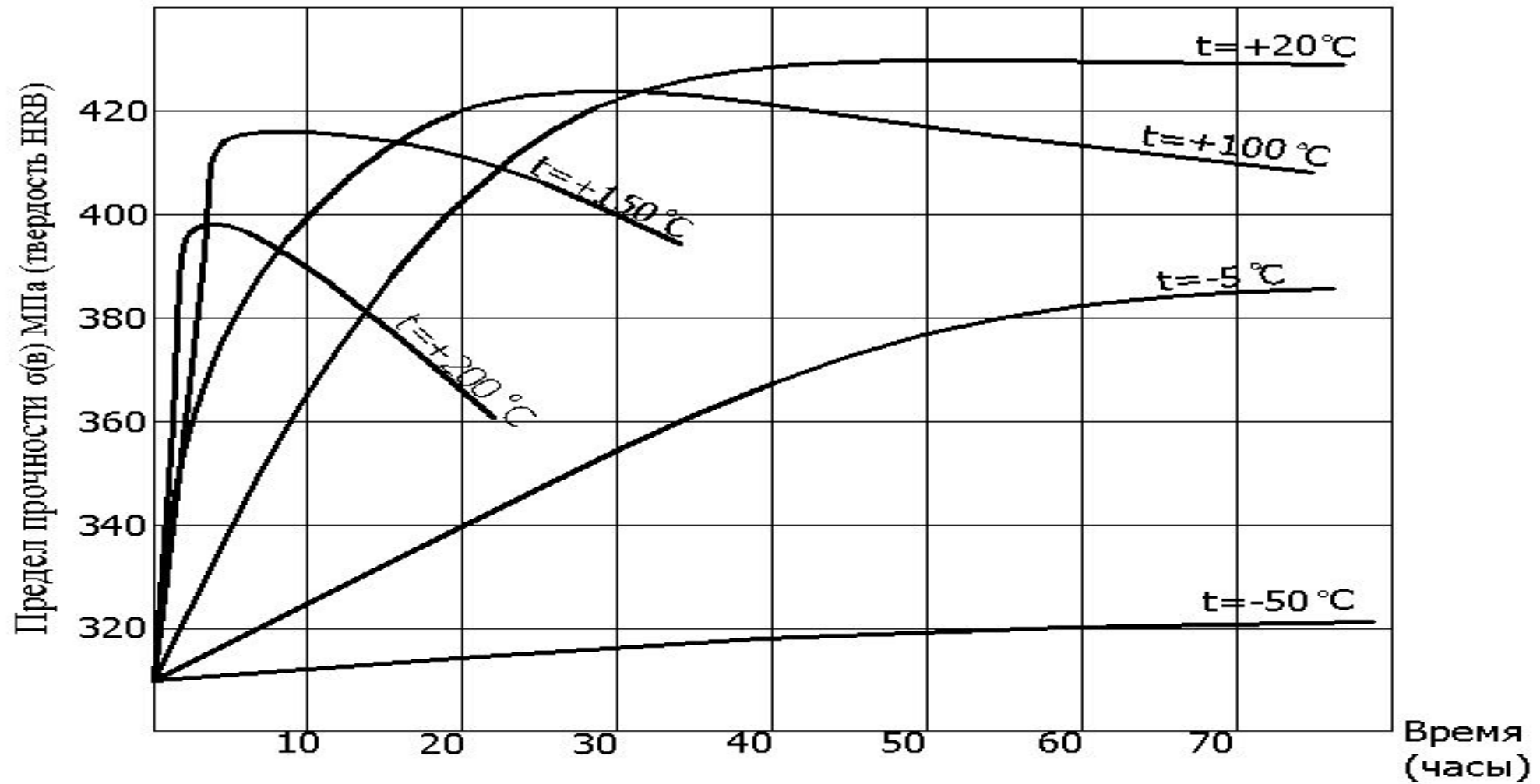
# Микроструктура алюминиевого сплава после закалки и старения



Θ – фаза в алюминиевом сплаве



# Зависимость прочности дуралюмина от температуры и времени старения





## Химический состав и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

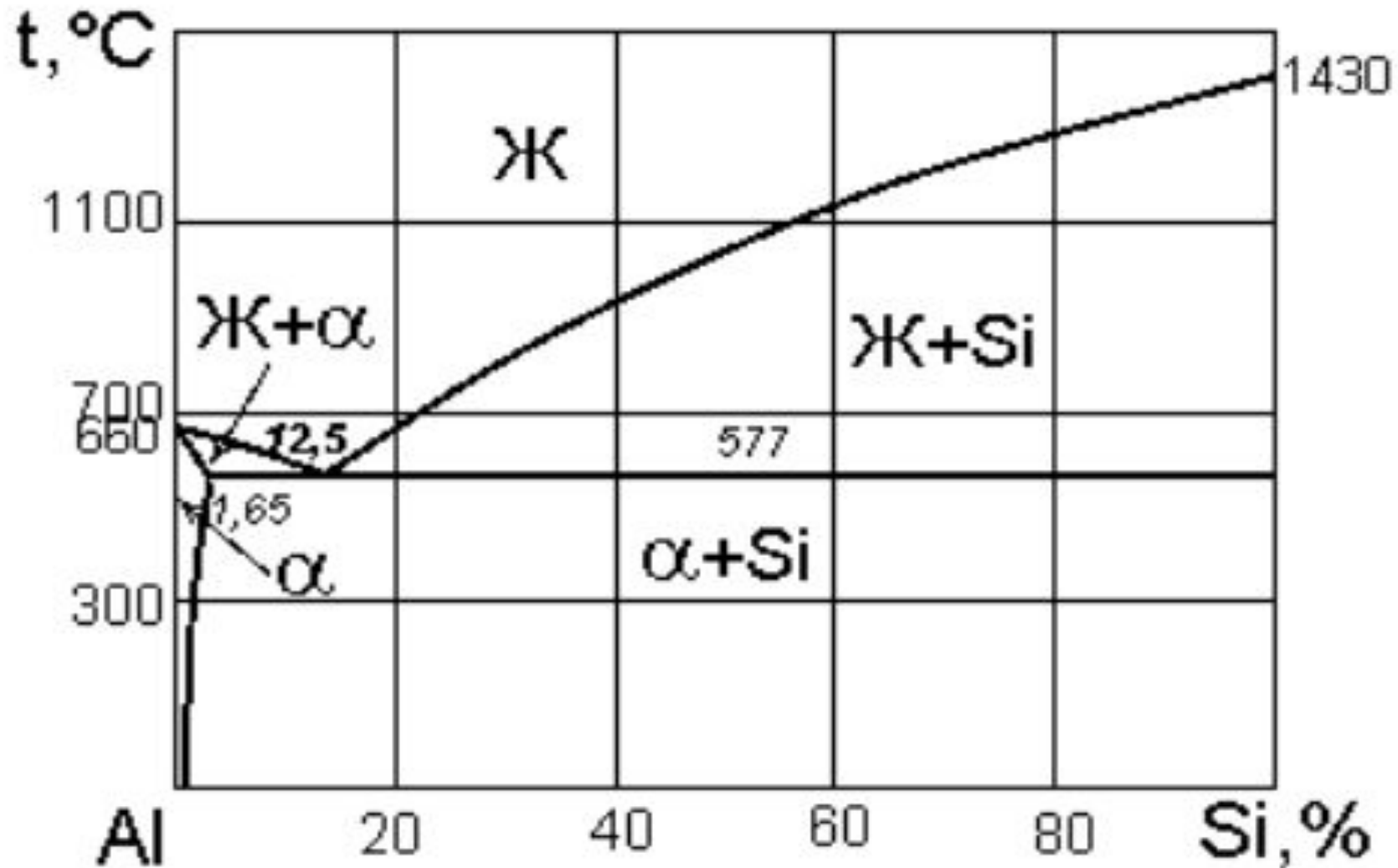
Марка сплава	Химический состав, %			Состояние поставки	Механические свойства			
	Cu	Mg	Mn		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
АМц	-	-	1-1,6	отжиг	130	50	20	300
АМг 2	-	1,3-2,6	0,2-0,6		190	100	23	450
АМг6	-	5,8-6,8	0,5-0,8		340	170	20	700
Д1	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8	Закалка + старение	400	240	20	950
Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9		440	330	18	1050
В95	1,4-2	1,8-2,8	0,2-0,6 5-7% Zn		540	470	10	1500
АК6	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8 0,7-1,2 Si		400	300	12	1000

## Сплавы алюминия с кремнием - силумины

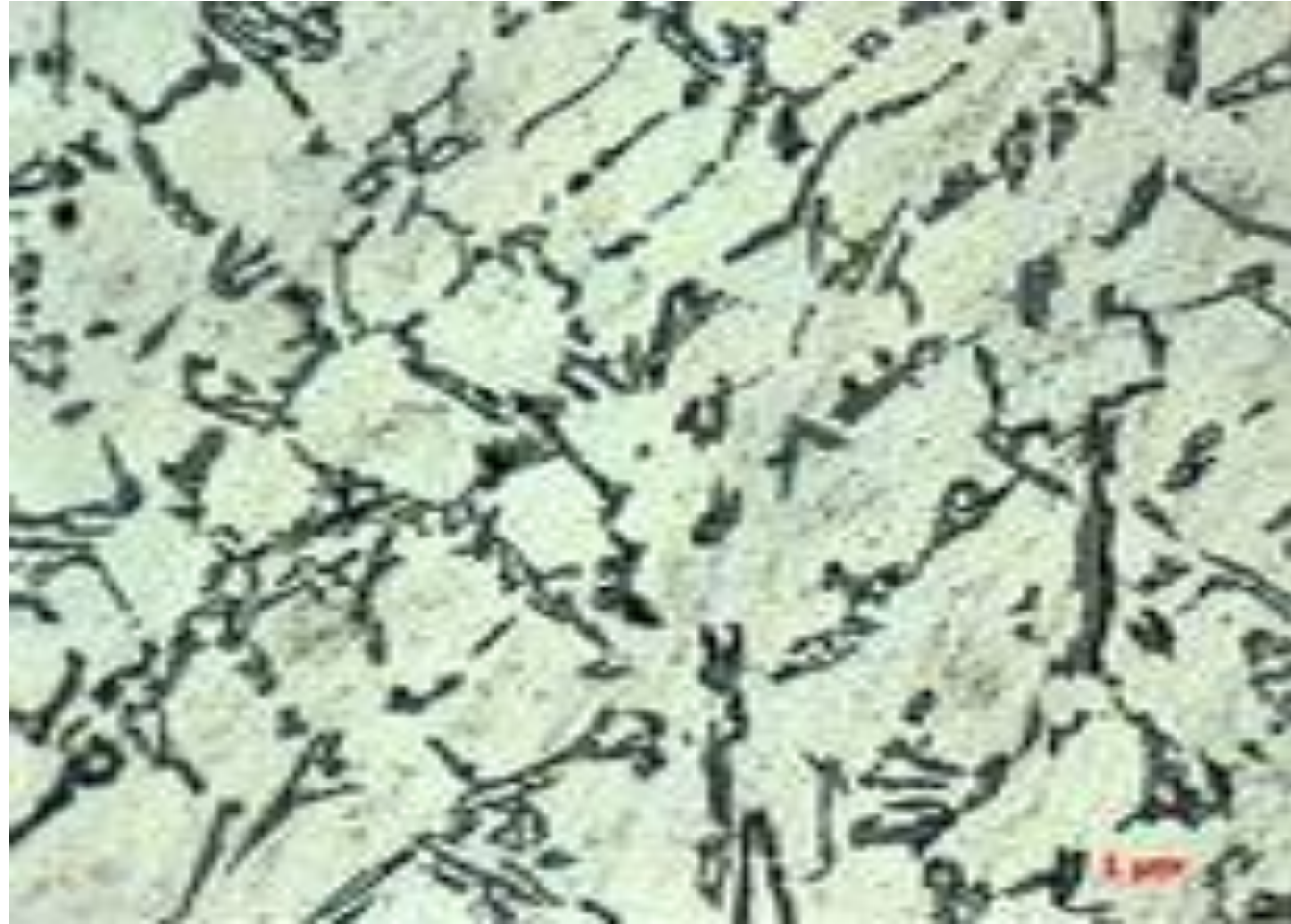
Силумины - это общее название группы литейных сплавов на основе алюминия, содержащих кремний (4—13%). В зависимости от желательного сочетания технологических и эксплуатационных свойств силумины легируют Cu, Mn, Mg, иногда Zn, Ti, Be. Силумины обладают высокими литейными и достаточно высокими механическими свойствами. Важнейшим методом улучшения механических свойств является модифицирование. Модифицирование осуществляется обработкой жидкого силумина небольшими количествами металлического натрия или солями натрия. При модифицировании происходит значительное измельчение частичек эвтектической смеси.

К достоинствам силумина относится их повышенная коррозионная стойкость во влажной и морской атмосферах. Силумины применяются при изготовлении деталей сложной конфигурации, главным образом в авто - и авиастроении.

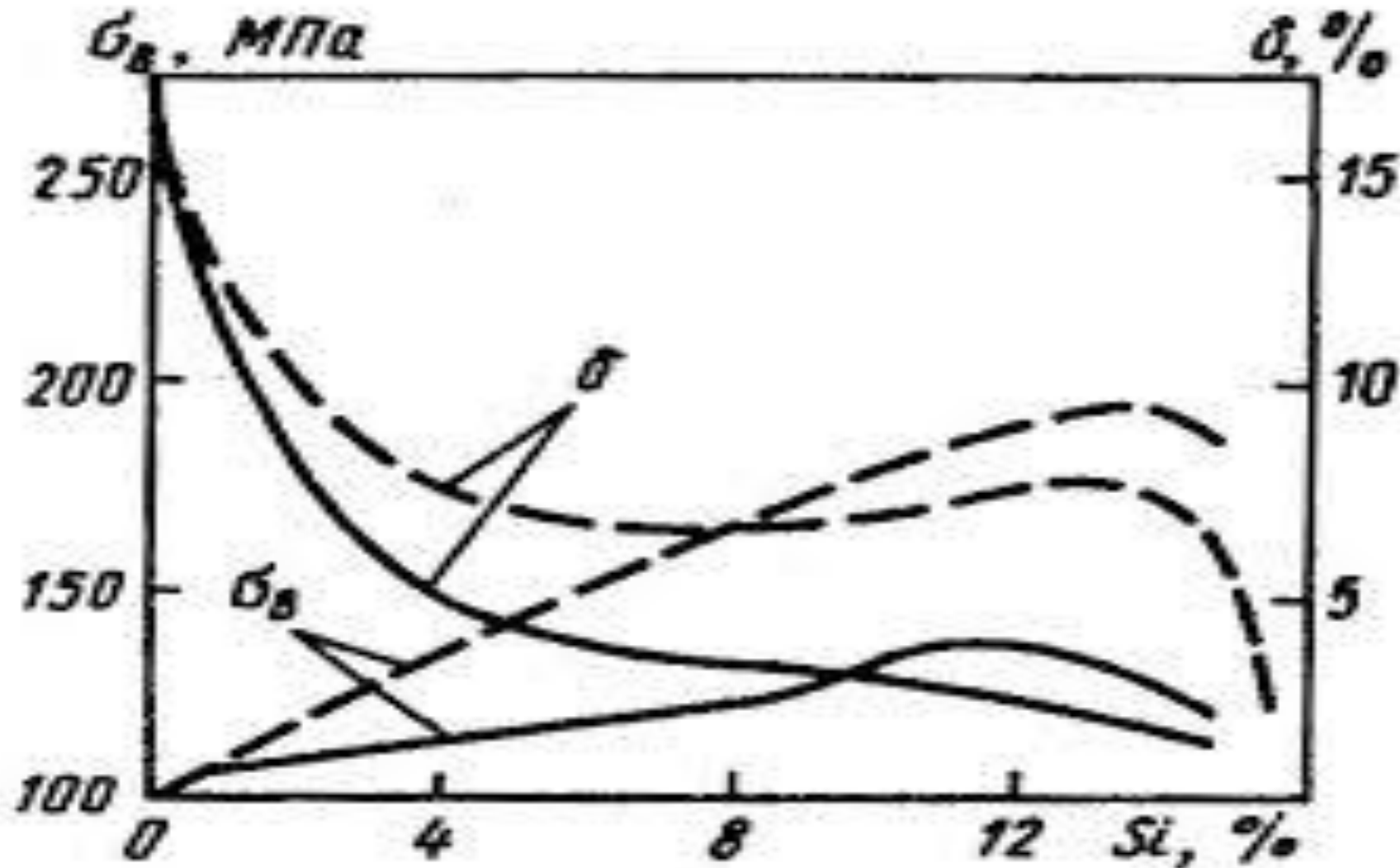
# Диаграмма состояния алюминий - кремний



# Микроструктура силумина



# Влияние кремния на механические свойства силумина (- - - - - модифицированный силумин)



## Магний и магниевые сплавы

Магний - металл светло-серого цвета, второй группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Среди промышленных металлов он обладает наименьшей плотностью (1,74 г/см<sup>3</sup>). Магний имеет невысокую температуру плавления: 651 °С. Он кристаллизуется с образованием решетки ГП и не претерпевает полиморфных превращений. В литом состоянии магний имеет низкие значения прочности ( $\sigma_B \geq 100$  МПа) и пластичности ( $\delta \geq 7$  %), в деформированном и отожженном состоянии  $\sigma_B \geq 180$  МПа и  $\delta \geq 15$  %. Сплавы магния характеризуются низкой плотностью, высокой удельной прочностью, способностью хорошо поглощать вибрации. Прочность сплавов при соответствующем легировании и термической обработке может достигать 350-400 МПа. Достоинством магниевых сплавов является их хорошая обрабатываемость резанием и свариваемость. К недостаткам относятся меньшая коррозионная стойкость, чем у алюминиевых сплавов, трудности при выплавке и литье и необходимость нагрева при обработке давлением.

Основными упрочняющими легирующими элементами в магниевых сплавах являются алюминий и цинк. Марганец слабо влияет на прочностные свойства. Его вводят главным образом для повышения коррозионной стойкости и измельчения зерна

# Химический состав и механические свойства магниевых сплавов

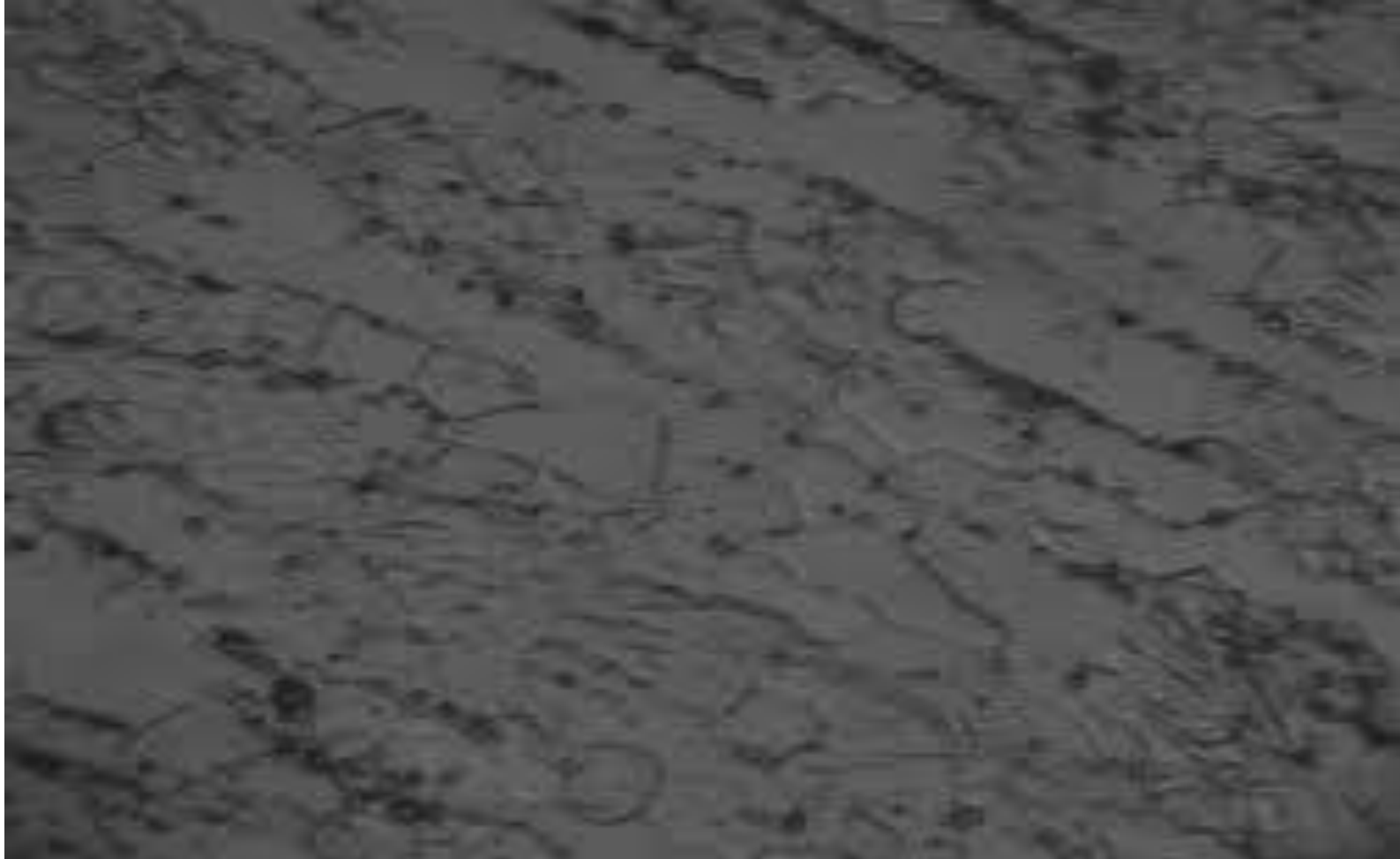
Марка	Химический состав, %			Механические свойства			
	Al	Zn	Mn	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	НВ	-
<b>МА1</b>	До 0,1	До 0,1	1,3-2,5	21	12	45	<b>Деформируемы</b>
<b>МА5</b>	7,8-9,5	0,2-0,8	1,5-2,5	32	22	55	
<b>МЛ4</b>	5-7	2-3	0,15-0,5	16	3	50	<b>Литейные</b>
<b>МЛ6</b>	9-10	0,6-1,2	0,15-0,5	24	9	60	

# Бериллий и бериллиевые сплавы

- **Бериллий** (Be), химический элемент II группы периодической системы Менделеева, атомный номер 4, атомная масса 9,0122; легкий светло-серый металл. Имеет один стабильный изотоп  ${}^9\text{Be}$ .
- **Физические свойства бериллия.** Кристаллическая решетка бериллия гексагональная плотноупакованная с периодами  $a = 0,285$  нм и  $c = 0,358$  нм. Бериллий легче алюминия, его плотность  $1847,7$  кг/м<sup>3</sup> (у Al около  $2700$  кг/м<sup>3</sup>),  $t_{\text{пл}} 1285^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{кип}} 2470^\circ\text{C}$ .
- **Бериллий обладает** наиболее высокой из всех металлов теплоемкостью,  $1,80$  кДж/(кг·К), высокой теплопроводностью,  $178$  Вт/(м·К). Эти свойства зависят от качества и структуры металла и заметно меняются с температурой. Модуль упругости  $300$  Гн/м<sup>2</sup>. Механические свойства Бериллия зависят от чистоты металла, величины зерна и текстуры, определяемой характером обработки. Предел прочности Бериллий при растяжении  $200\text{-}550$  Мн/м<sup>2</sup> ( $20\text{-}55$  кгс/мм<sup>2</sup>), удлинение  $0,2\text{-}2\%$ .



# Микроструктура бериллия



# Бериллиевые сплавы

Бериллиевые сплавы системы Ве—Ag, содержащие 1,9—3,7% Ag, обладают повышенной пластичностью; содержащие 20—40% Ag — повышенным сопротивлением ударным нагрузкам. Добавки к Ве 2,7—2,9% Sn существенно улучшают его механические свойства в выдавленном и прокатанном состоянии при комнатной температуре. При использовании в качестве пластичной матрицы Си и Ni в количестве 3% в процессе получения заготовок наблюдается образование хрупких бериллидов (например,  $\text{Be}_2\text{Si}$  и  $\text{Ni}_5\text{Be}_{21}$ ). Добавление к сплавам Ве — Си 0,25% P, замедляющего диффузию Си и Ве, предотвращает образование бериллида и повышает пластичность. Промышленными являются сплавы системы Ве—Al, содержащие от 24 до 43% Al.

## Применение бериллия

Бериллий и сплавы на его основе применяют в аэрокосмической технике для изготовления камер сгорания, сопел, антенн; элементов обшивок и тормозных дисков самолетов; корпусов управляемых снарядов и глубоководных торпед. Расчеты показывают, что бериллий обеспечивает трехкратный выигрыш по массе по сравнению с алюминиевыми и магниевыми сплавами, четырехкратный – по сравнению с титаном и пятикратный – по сравнению со сталью. Благодаря самому низкому из металлов поперечному сечению захвата нейтронов и самому высокому поперечному сечению их рассеяния, бериллий незаменим в атомной технике для изготовления отражателей, замедлителей и оболочек ТВЭЛов. Более широкое применение бериллия сдерживается дефицитностью исходного сырья, дороговизной и сложностью его переработки, а также очень высокой токсичностью бериллиевых паров и пыли. Бериллий и его сплавы примерно в 1000 раз дороже стали.