

**Материалы с высокой удельной прочностью**

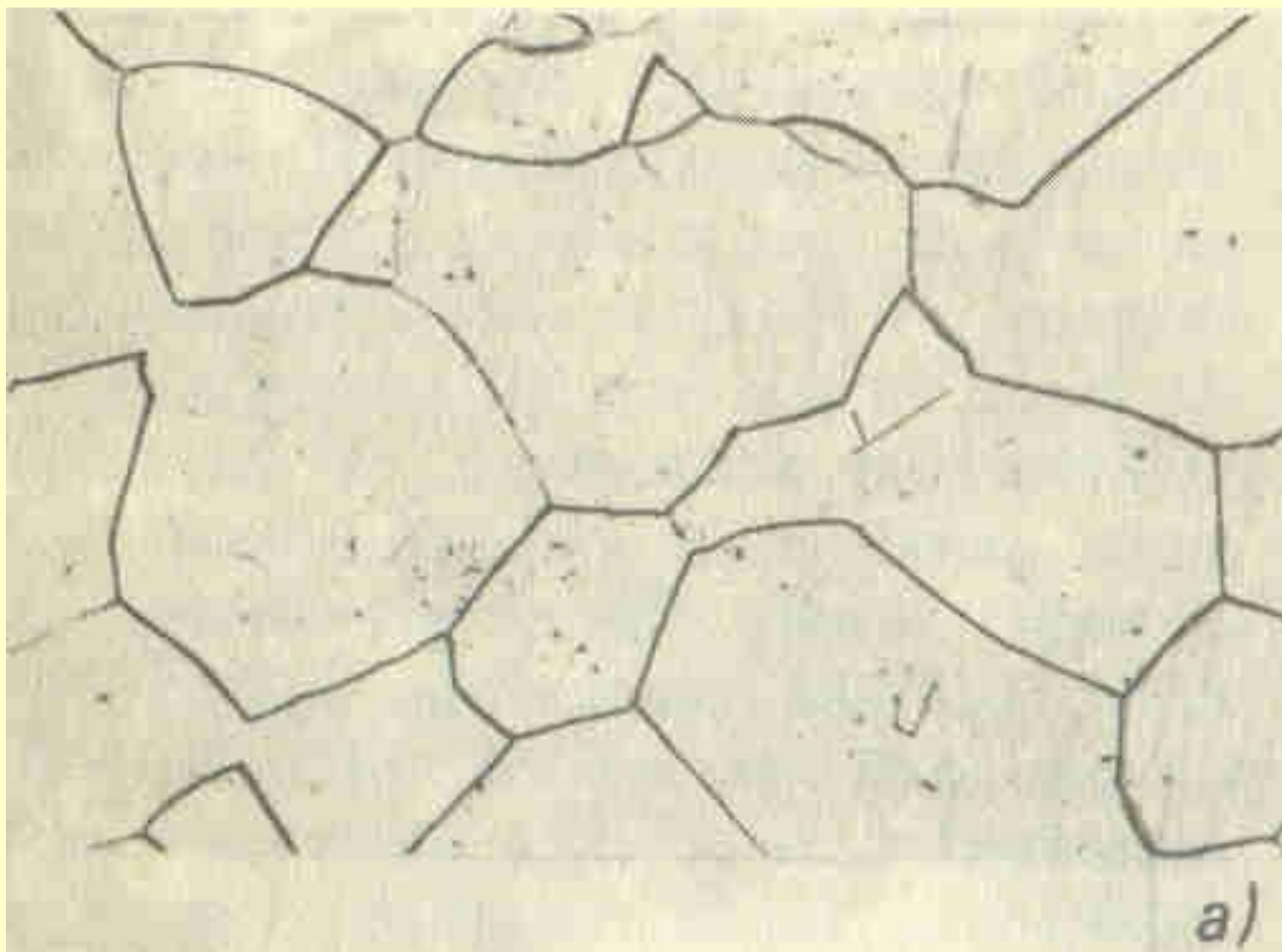
Титан – металл серого цвета. Имеет две полиморфные модификации:

1. Низкотемпературная (до 882 °С) модификация  $Ti_{\alpha}$  решетка ГП с периодами  $a=0,296$  нм,  $c=0,472$  нм
2. Высокотемпературная (900 °С) модификация  $Ti_{\beta}$  решетка ОЦК с периодом  $a=0,332$  нм.

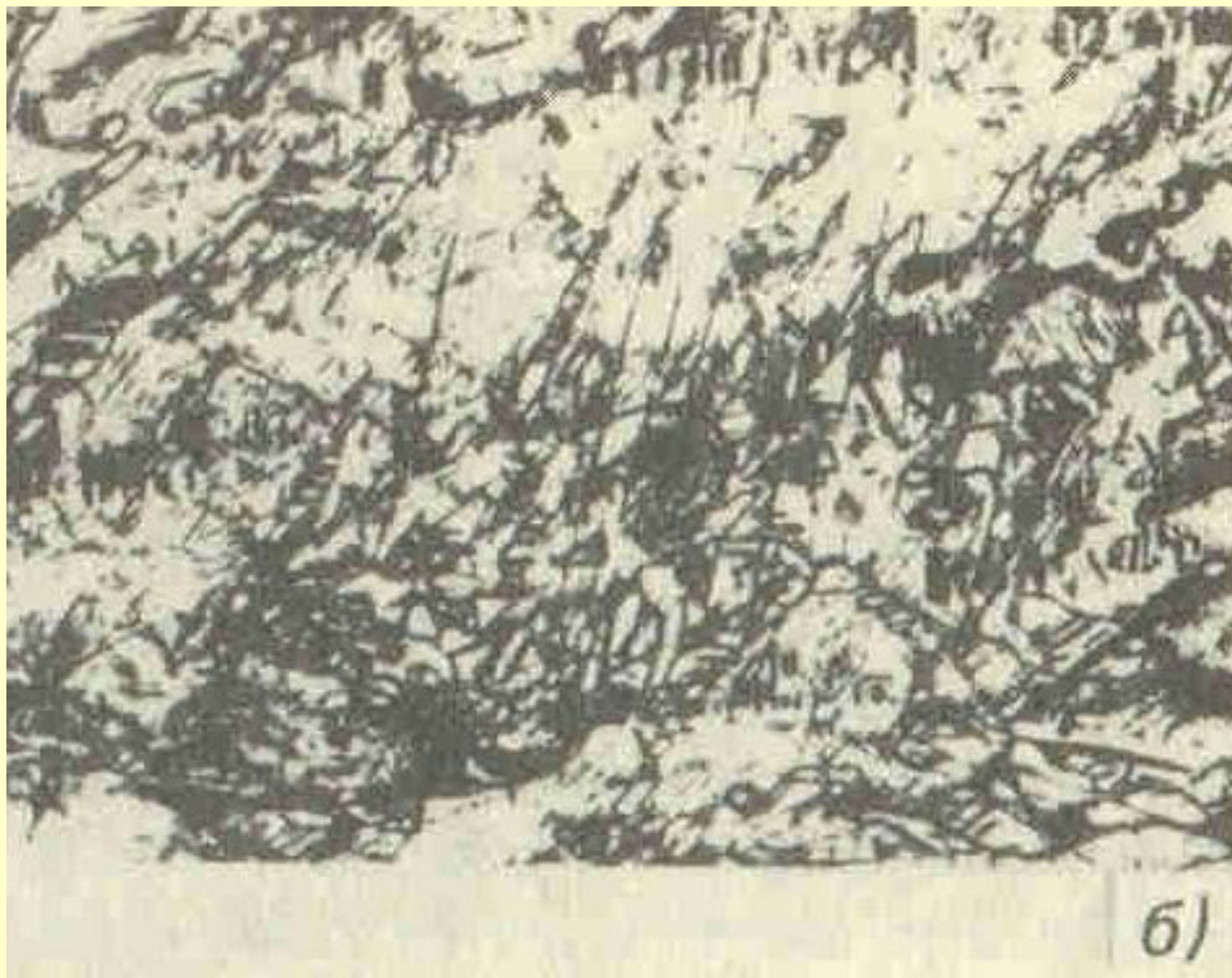
Полиморфное превращение при медленном охлаждении происходит по *нормальному механизму* с образованием полиэдрической структуры.

А при быстром охлаждении – по *мартенситному механизму* с образованием игольчатой структуры

# Микроструктура технического титана после отжига



# Микроструктура технического титана после закалки



Титан – производят обогащением и хлорированием титановой руды с последующим ее восстановлением из четыреххлористого титана металлическим магнием:

- Получают титановую губку.
- Маркируют по твердости ТГ-100, ТГ-110.
- Для получения монолитного титана губку размалывают в порошок, прессуют и спекают либо переплавляют в дуго-выпечках в вакууме или в атмосфере инертных газов

Для уменьшения количества примесей и более равномерного их распределения по сечению слитка проводят двух-трех-разовую переплавку.

Технический титан маркируют:

BT1-00 примесей до 0,1%

BT1-0 примесей до 0,3%

Крупнозернистую структуру измельчают модифицированием цирконием или бором

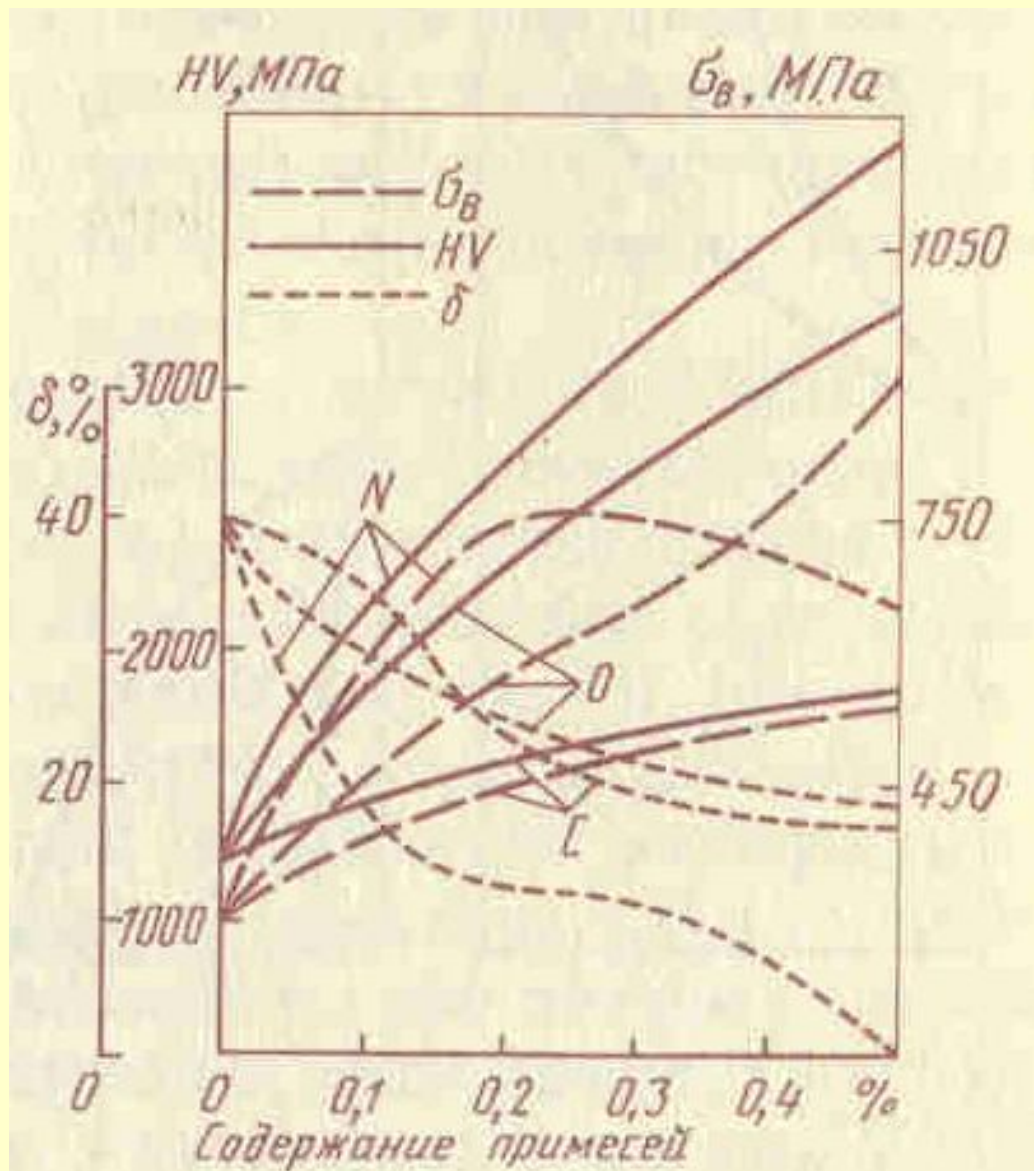
## Свойства титана:

- Малая плотность
- Хорошие механические свойства
- Высокая удельная прочность
- Хорошие технологические свойства
- Отличная коррозионная стойкость
- Низкий модуль упругости
- Хладостоек
- Низкие антифрикционные свойства

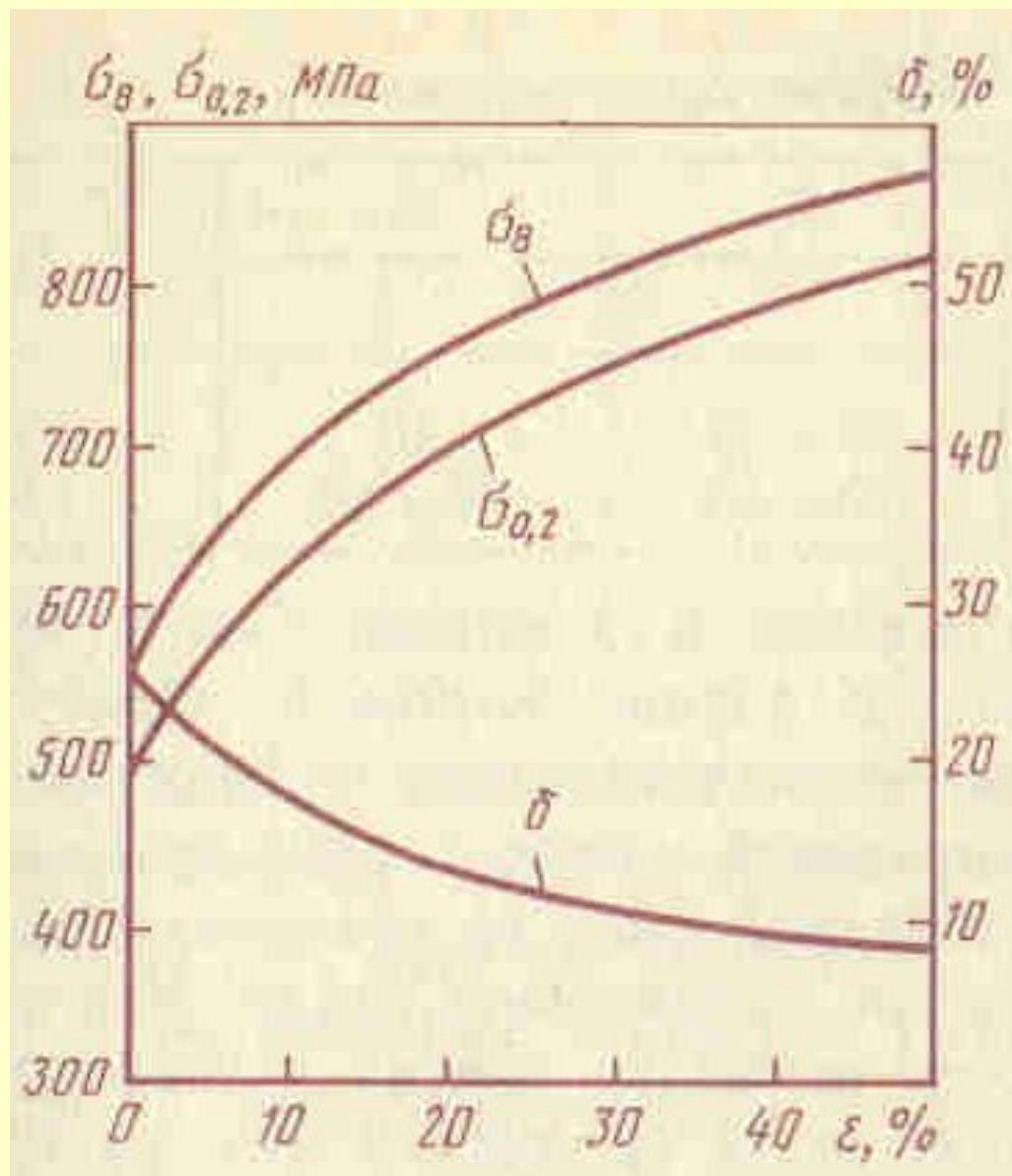
# Механические свойства иодидного и технического титана

| Титан    | Сумма примесей, % | $\sigma_B$ | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ | $\psi$ | HB   |
|----------|-------------------|------------|----------------|----------|--------|------|
|          |                   | МПа        |                | %        |        |      |
| BT1-0    | 0,3               | 450-600    | 380-500        | 20-25    | 50     | 2070 |
| Иодидный | 0,093             | 250-300    | 100-150        | 50-60    | 70-80  | 1300 |

# Зависимость механических свойств титана от содержания примесей



# Зависимость механических свойств титана от степени пластической деформации

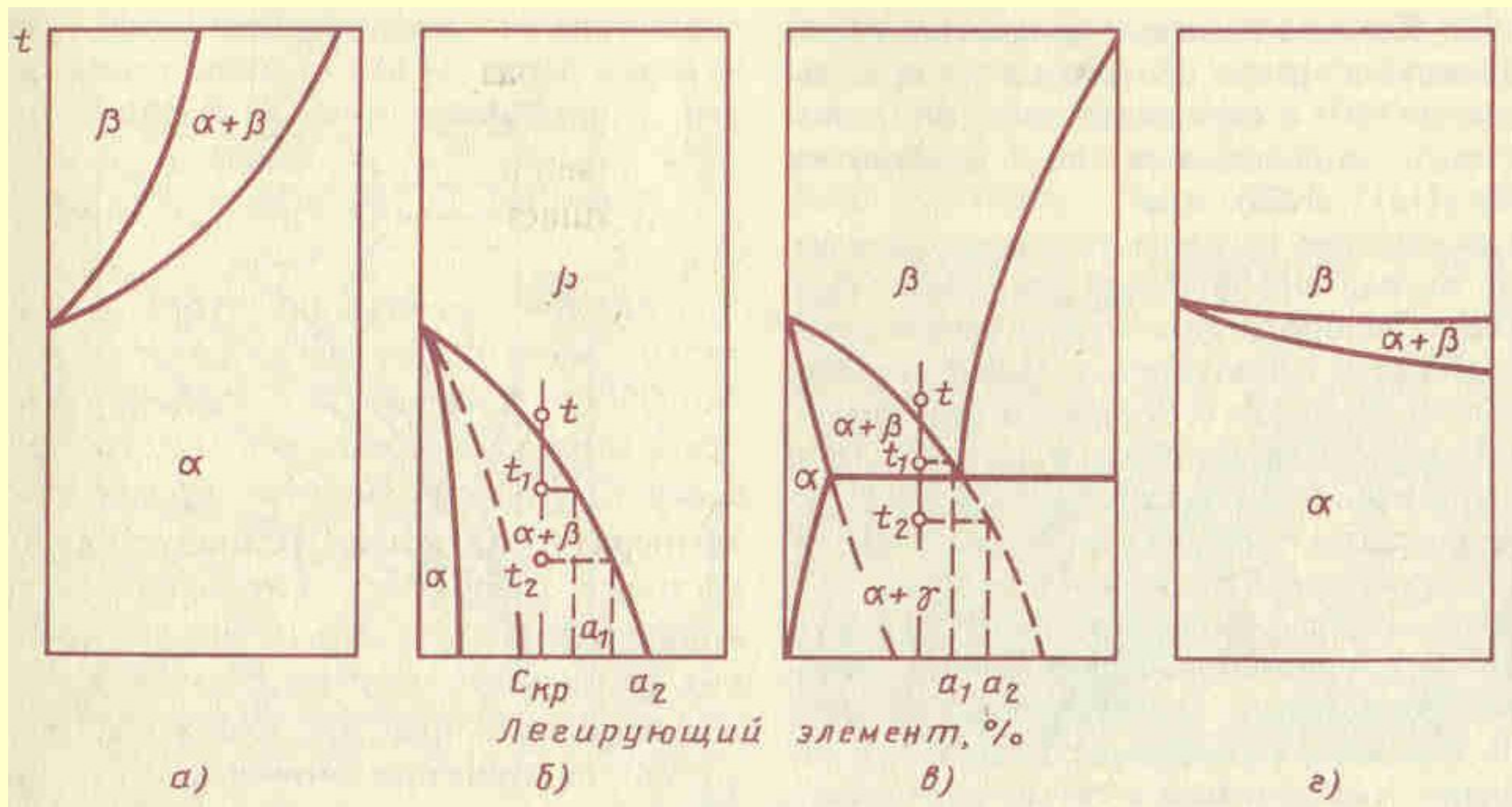


Легирующие элементы по характеру влияния на полиморфные превращения титана подразделяют на три группы:

1.  $\alpha$ стабилизаторы
2.  $\beta$ стабилизаторы
3. нейтральные

$\beta$

# Диаграммы состояния титан-легирующий элемент



а-Тi-  $\alpha$  -стабилизаторы ( $Al, O, N$ )

б-Тi-изоморфные  $\beta$ -стабилизаторы ( $Mo, V, Ta, Nb$ )

в-Тi-эвтектоидообразующие  $\beta$ -стабилизаторы ( $H, Cr, Mn, Fe, Ni, W, Cu$ )

г-Тi-нейтральные элементы ( $Sn, Zr, Hf, Th$ )

# **Термическая обработка титановых сплавов**

**Отжиг** — проводят главным образом после холодной пластической деформации для снятия наклепа

Температура отжига 670-800°C с выдержкой от 15 мин до 3 ч.

Отжиг проводят в вакууме для предотвращения насыщения газами и охрупчивания.

Упрочняющая термическая обработка (**закалка и старение**) применима только к сплавам с двухфазной структурой

Для повышения износостойкости титановые сплавы подвергают **азотированию**. Толщина нитридного слоя 0,06-0,2 мм, твердость 1200HV

# Промышленные титановые сплавы

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяют на:

- Деформируемые и
- Литейные

По механическим свойствам:

- Нормальной прочности
- Высокопрочные
- Жаропрочные
- Повышенной пластичности

По способности упрочняться с помощью термической обработки:

- Упрочняемые ТО
- Неупрочняемые ТО

# Химический состав (ГОСТ 19807-74), структура и механические свойства титановых сплавов

| Сплав | Содержание элементов<br>(остальное Ti), % |         |         |                          | Структура                  | Механические свойства |                |              |
|-------|-------------------------------------------|---------|---------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
|       |                                           |         |         |                          |                            | $\sigma_B$            | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ , % |
|       | Al                                        | V       | Mo      | Прочие                   |                            | МПа                   |                |              |
| BT5   | 4,3—6,2                                   | —       | —       | —                        | $\alpha$ -сплавы           | 700—950               | 660—850        | 10—15        |
| BT5—1 | 4—6                                       | —       | —       | 2—3 Sn                   |                            | 750—950               | 650—850        | 10—15        |
| OT4—1 | 1—2,5                                     | —       | —       | 0,7—2 Mn                 | Псевдо- $\alpha$ -сплавы   | 600—750               | 470—650        | 20—40        |
| OT4   | 3,5—5                                     | —       | —       | 0,8—2 Mn                 |                            | 700—900               | 550—650        | 12—20        |
| BT20  | 5,5—7,0                                   | 0,8—2,3 | 0,5—1,8 | 1,4—2,5 Zr               |                            | 950—1150              | 850—1000       | 8            |
| BT6*  | 5,3—6,8                                   | 3,5—5,3 | —       | —                        | $(\alpha + \beta)$ -сплавы | 1100—1150             | 1000—1050      | 14—16        |
| BT14* | 3,5—6,3                                   | 0,8—1,9 | 2,5—3,8 | —                        |                            | 1150—1400             | 1080—1300      | 6—10         |
| BT16* | 1,6—3,8                                   | 4,0—5,0 | 4,5—5,5 | —                        |                            | 1250—1450             | 1100—1200      | 4—6          |
| BT22  | 4,8—5,2                                   | 4,5—5,5 | 4,5—5,5 | 0,8—1,2 Cr<br>0,8—1,2 Fe |                            | 1100—1250             | —              | 9            |

\* Свойства этих сплавов приведены после закалки и старения, остальных — в отожженном состоянии.

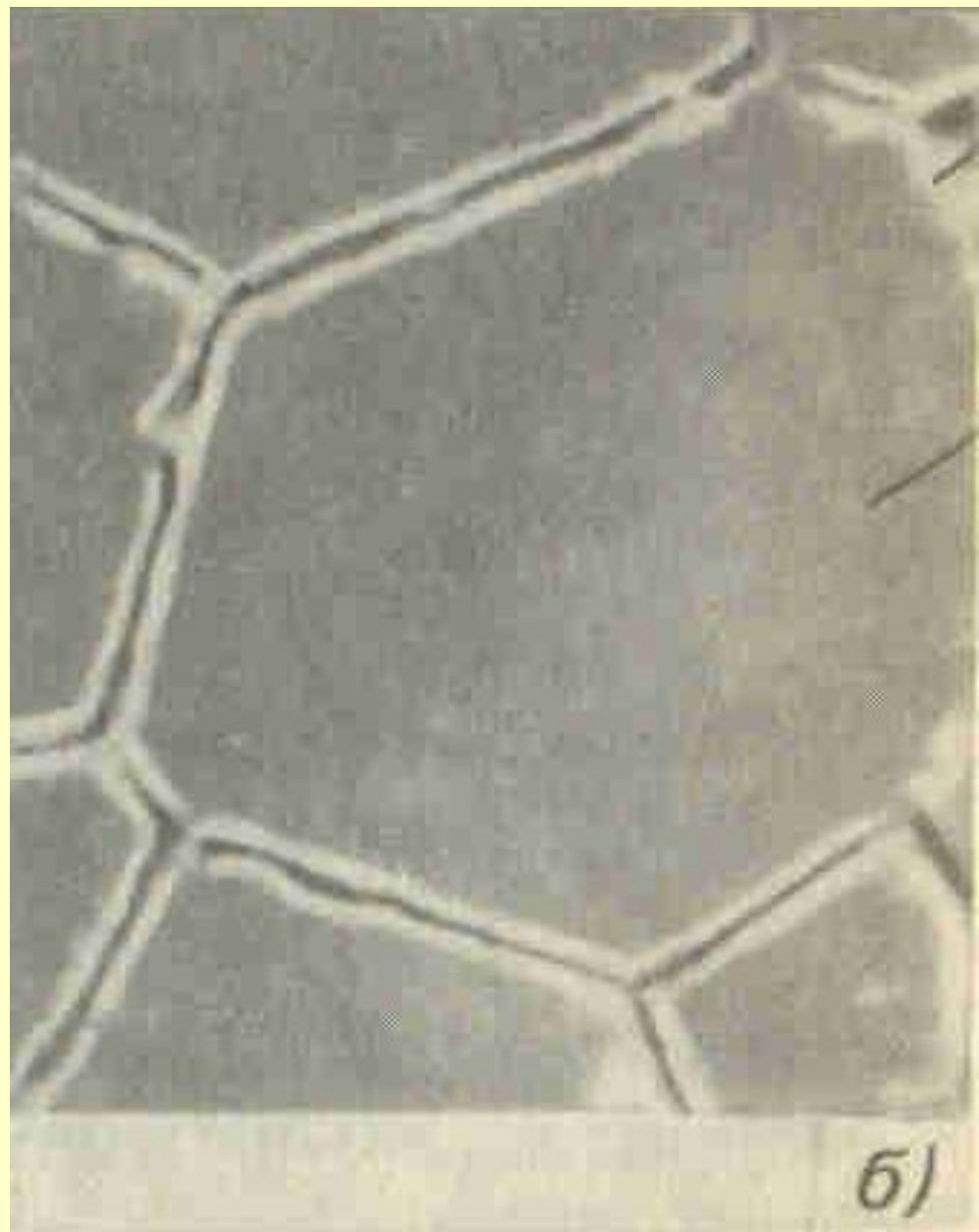
# Микроструктура титанового сплава, х340



*VT6* — после закалки

# Микроструктура титанового сплава, х340

*BT15* после закалки и старения



## **Литейные сплавы:**

- Имеют хорошие литейные свойства
- Высокая жидкотекучесть
- Хорошая плотность отливок
- Недостатками являются большая склонность к поглощению газов и взаимодействие с формовочными материалами

Применяют сплавы аналогичные по химическому составу с деформируемыми сплавами

Маркировка сплавов - ВТ5Л, ВТ3-1Л, ВТ14Л

## **Порошковые титановые сплавы**

Используют порошки технического титана и сплавов

Механические свойства зависят от многих факторов:

- Качества исходных порошков
- Режимов горячего компактирования
- Режимов прессования и спекания

Технологические трудности — активное взаимодействие титана при повышенных температурах с примесями внедрения

Современные технологии: распыление металла в вакууме, горячее компактирование гранул, горячее изостатическое прессование с последующим вакуумным отжигом - позволяют получать изделия со 100% плотностью

# Сплавы на основе интерметаллидов

Две группы:

- *Жаропрочные (Ti-Al)*. Жаропрочность сплавов превосходит все титановые сплавы и многие жаропрочные стали
- *Обладающие памятью формы*. Никелид титана - *TiNi*

Эффект памяти формы – это способность сплава устранять в процессе обратного мартенситного превращения деформацию, полученную им после прямого мартенситного превращения.

## Сплавы с памятью формы применяют:

- В космической технике для самораскрывающихся антенн
- При установке саморасклепывающихся заклепок в трудно-доступных местах конструкции
- Для самосрабатывающих соединительных муфт трубопроводов
- Для дистанционного ремонта обсадных труб нефтяных и газовых скважин
- В качестве материала изделий, многократно изменяющих свою форму при нагреве и охлаждении

# **Бериллий и сплавы на его основе**

Бериллий – металл серого цвета. Обладает полиморфизмом

1. Низкотемпературная (до 1250 °С) модификация ***Be<sub>α</sub>*** решетка ГП с периодами  $a=0,2286$  нм,  $c=0,3584$  нм

2. Высокотемпературная (1250-1284 °С) модификация ***Be<sub>β</sub>*** решетка ОЦК.

- Плотность бериллия 1,845 т/м
- Модуль нормальной упругости 309 Гпа
- Отражательная способность 55%
- Удельная жесткость 23 км
- Удельная прочность 37 км

## **Бериллий применяют:**

- В консолях крыльев, элеронах, тягах управления и др. деталях сверхзвуковых самолетов
- В ракетной технике изготавливают панели обшивки, промежуточные отсеки, соединительные элементы, приборные стойки
- Для армирования композиционных материалов на основе легких металлов.
- Теплозащитные экраны: головные части ракет, передние кромки крыльев сверхзвуковых самолетов, оболочки кабин космонавтов
- Для зеркал оптических приборов
- В инерциальных системах навигации для ракет, самолетов, подводных лодок; из него изготавливают детали гиростабилизирующих платформ и гироскопов
- Для легирования сплавов на основе меди, алюминия, никеля

## Недостатки бериллия:

- Малая распространенность в природе
- Сложная и дорогая технология извлечения из руд и получения полуфабрикатов, а поэтому его высокая стоимость
- Низкая пластичность и анизотропия свойств
- Токсичность. Соединения бериллия (аэрозоли, дисперсные частицы) попадая в легкие, вызывают тяжелое заболевание – бериллиоз. Бериллиевая пыль вызывает на коже зуд, а попадая в ранки – язвы и опухоли. ***В компактном виде бериллий безвреден.***
- Металлургия бериллия сложна вследствие его химической инертности. Слитки после вакуумной переплавки обрабатывают давлением или перерабатывают в порошок
- При изготовлении на металлорежущих станках вследствие плохой обрабатываемости резанием необходимо использовать твердосплавный инструмент
- Сваривается бериллий дуговым методом в аргоне, гелии или вакууме

Литой бериллий крупнозернистый и хрупкий. Для улучшения пластичности прокатку ведут при нагреве. Однако при температурах выше 700°C бериллий «схватывается» с инструментом. Поэтому его прокатывают в стальной оболочке.

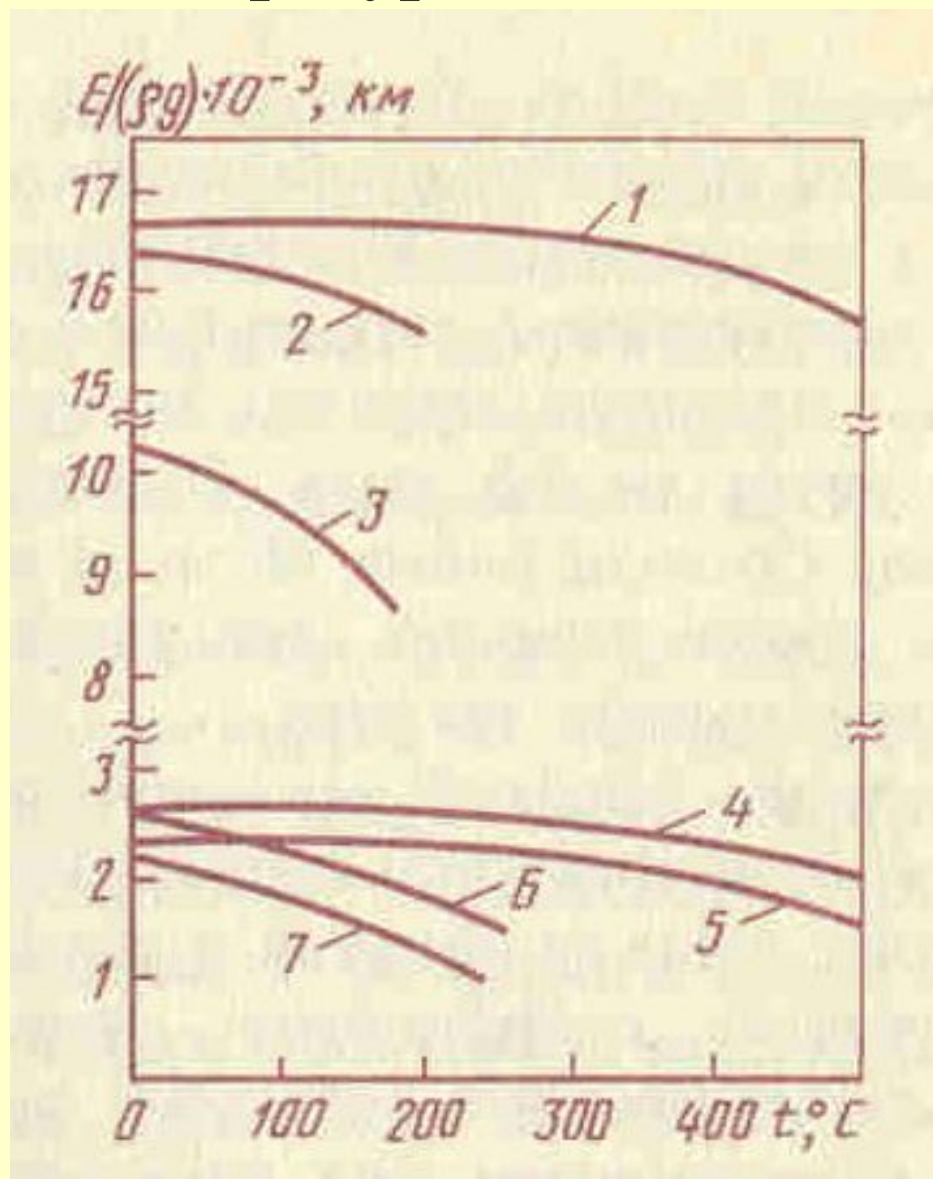
Механические свойства бериллия зависят

- от степени чистоты
- от технологии производства
- от размера зерна
- от наличия текстуры
- горячекатаный полуфабрикат, полученный из слитка, обладает также

низкими свойствами

- бериллий, полученный порошковой технологией, имеет мелкозернистую структуру и более высокие механические свойства, в том числе и пластичность. Чистый спеченный бериллий с чрезвычайно мелкозернистой структурой 1-3 мкм обладает склонностью к сверхпластичности до 300%.

# Зависимость механических свойств горячепрессованного бериллия от размера зерна и температуры испытания



# **Бериллиевые сплавы**

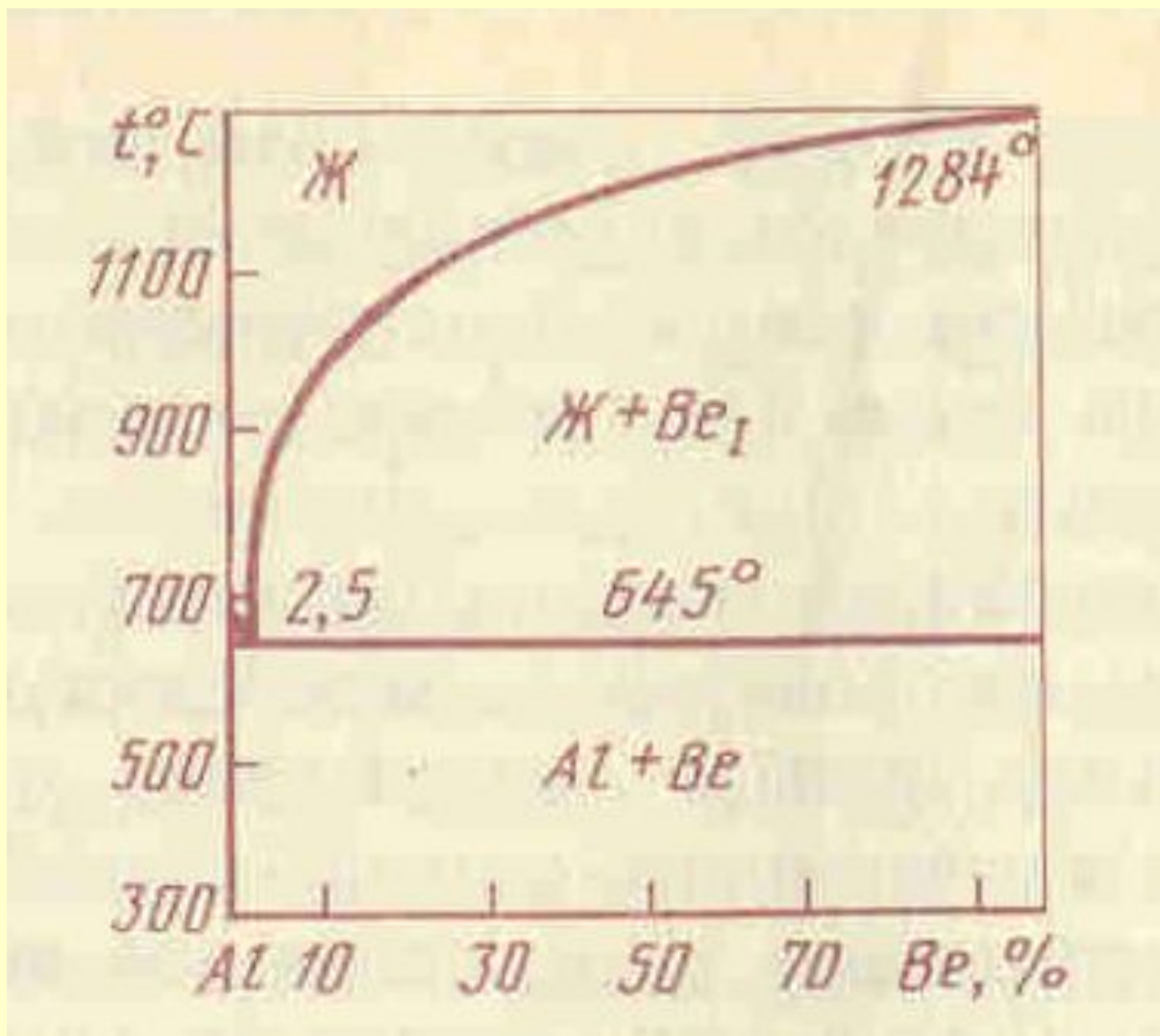
Основные трудности при получении бериллиевых сплавов связаны с его недостатками:

- Большая хрупкость
- Высокая стоимость

Сложность легирования бериллия заключается в небольшом размере атома бериллия. Большинство элементов, растворяясь в бериллии, искажают его кристаллическую решетку, в результате чего увеличивается его хрупкость

В связи с этим наибольшее распространение получили сплавы бериллия с практически нерастворимыми в нем алюминием.

## Диаграмма состояния *Al-Be*

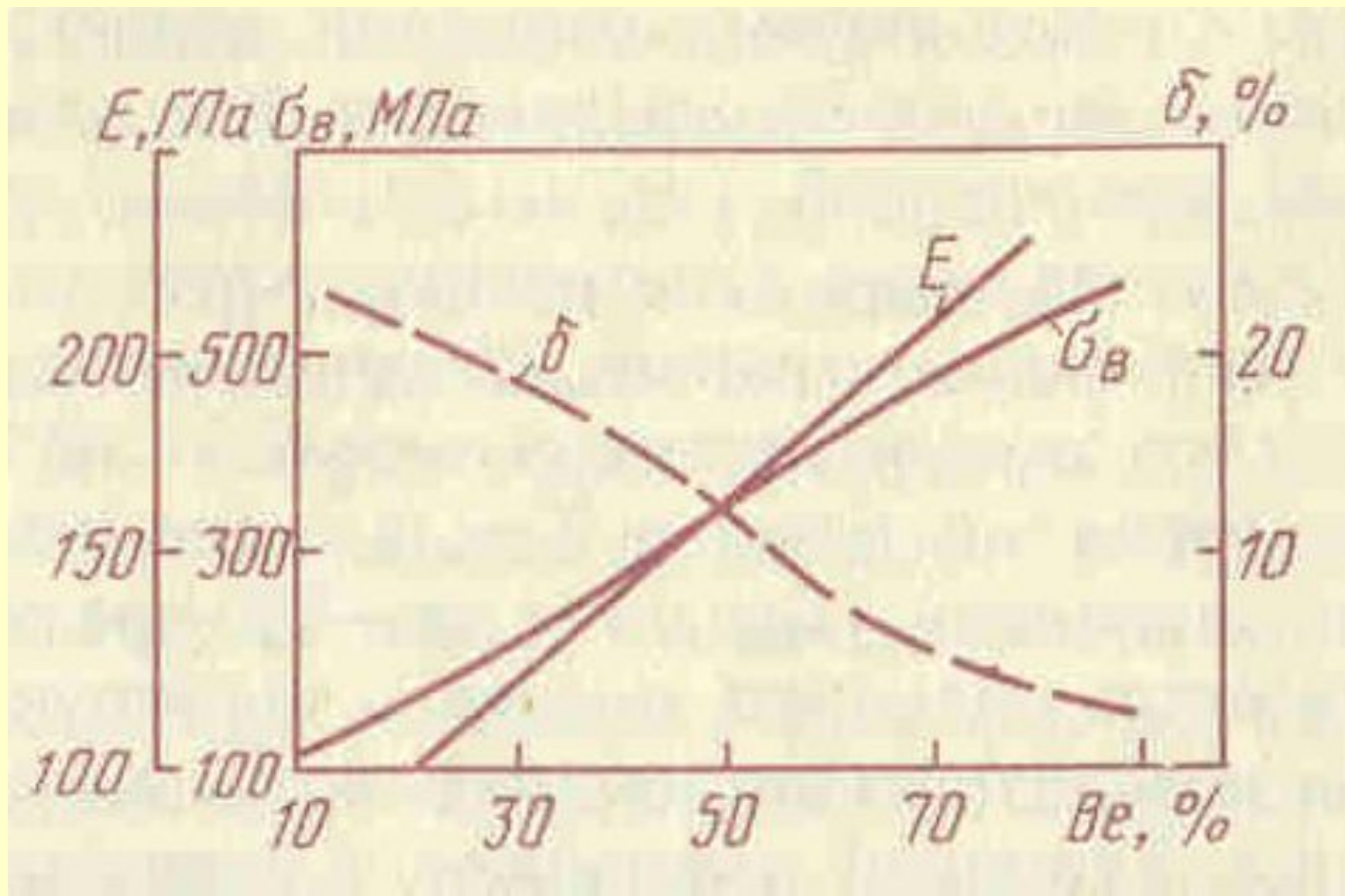


Чем больше содержится в сплавах *бериллия*, тем выше их прочность и жесткость.

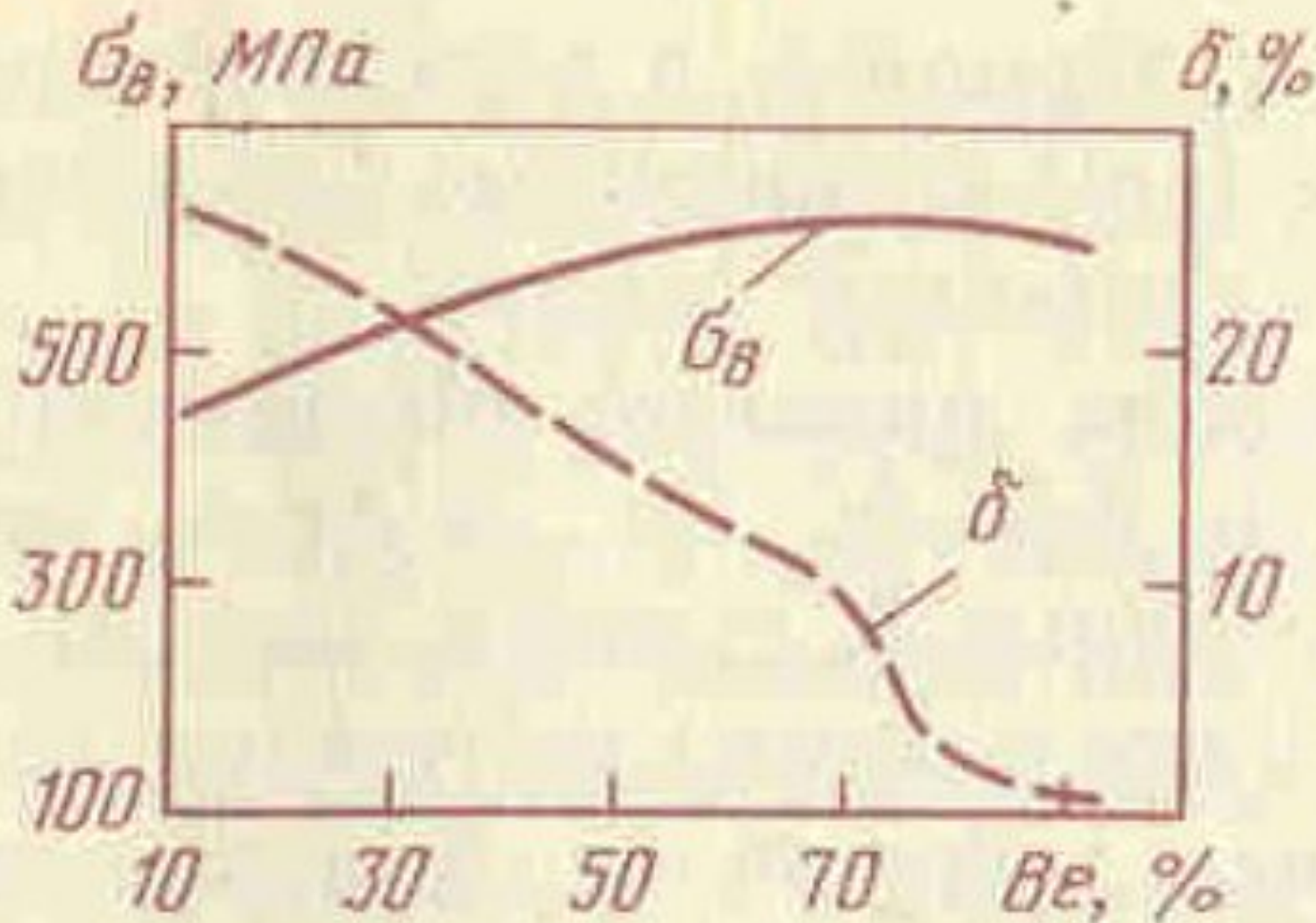
Сплавы *Al-Be* по сравнению с чистым бериллием:

- Пластичнее
- Технологичнее
- Обладают высокими прочностными свойствами
- Имеют высокую жесткость

# Зависимость механических свойств сплавов *Al-Be* от содержания бериллия



# Зависимость механических свойств сплавов *Al-Be-Mg* (5% *Mg*) от содержания бериллия



Сплавы системы **АБМ** поставляют в виде деформированных или отожженных полуфабрикатов, они хорошо свариваются и рекомендуются для сварных конструкций

Более высокими показателями обладают сплавы полученные порошковой технологией с повышенным содержанием оксида **BeO** (до 4%)

Еще более высокую прочность при высокой температуре имеют **бериллиды**. Это интерметаллидные соединения бериллия с переходными металлами (**Ta, Nb, Zr** и др.). Бериллиды имеют:

- температура плавления до 2000°C
- твердость 500-1000 HV
- жесткость 300-350 ГПа
- плотность 2,7-5 т/м<sup>3</sup>
- хрупкие

Применяют бериллиды для гироскопов и систем управления

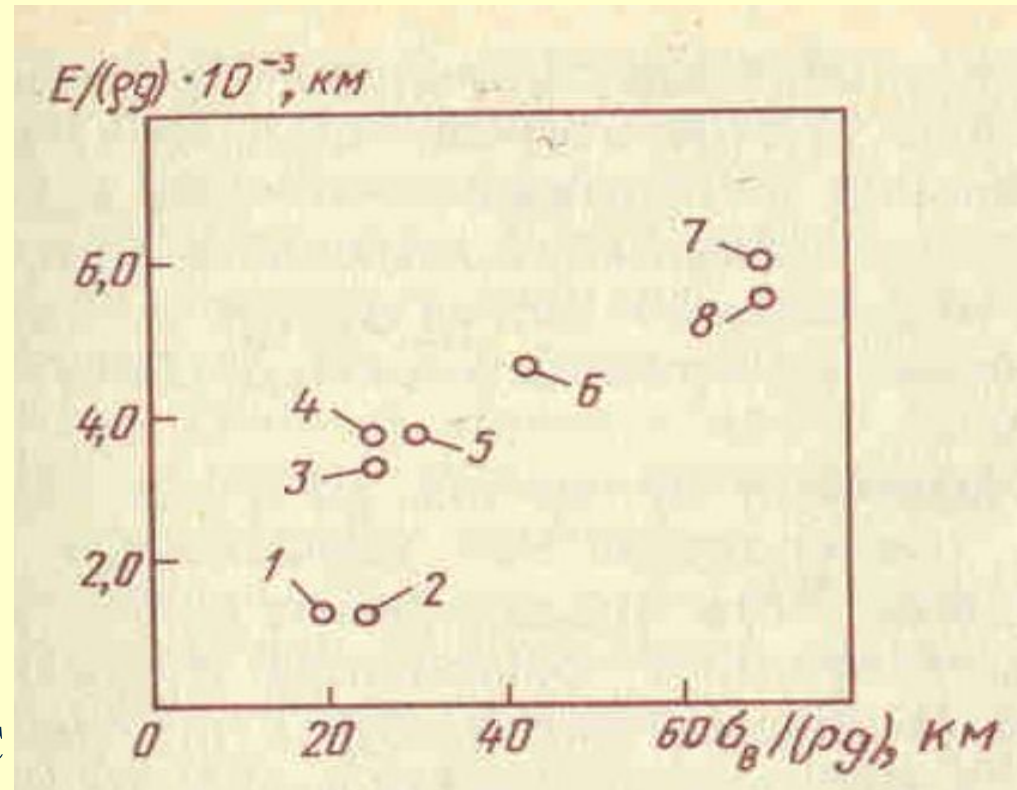
# Композиционные материалы

Композиционными называют сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые один в другом компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей

Композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы.

Уровень заданного комплекса свойств проектируется заранее и реализуется в процессе изготовления материала.

# Удельная прочность и удельный модуль упругости некоторых неармированных и композиционных материалов



1-алюминий

2-титан и сталь

3-титан, армированный бериллиевой проволокой

4-титан, армированный волокнами SiC

5-титан, армированный волокнами борсика

6-алюминий, армированный борными волокнами

7-эпоксидная смола, армированная волокнами графита

8-эпоксидная смола, армированная борными волокнами

Принцип создания КМ заимствован у природы.

- Стволы деревьев
- Стебли растений
- Кости человека и животных

В дереве волокна целлюлозы соединены пластичным лигнином, в костях тонкие прочные нити фосфатных солей – пластичным коллагеном

Свойства КМ в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними.

В КМ проявляются *достоинства* компонентов

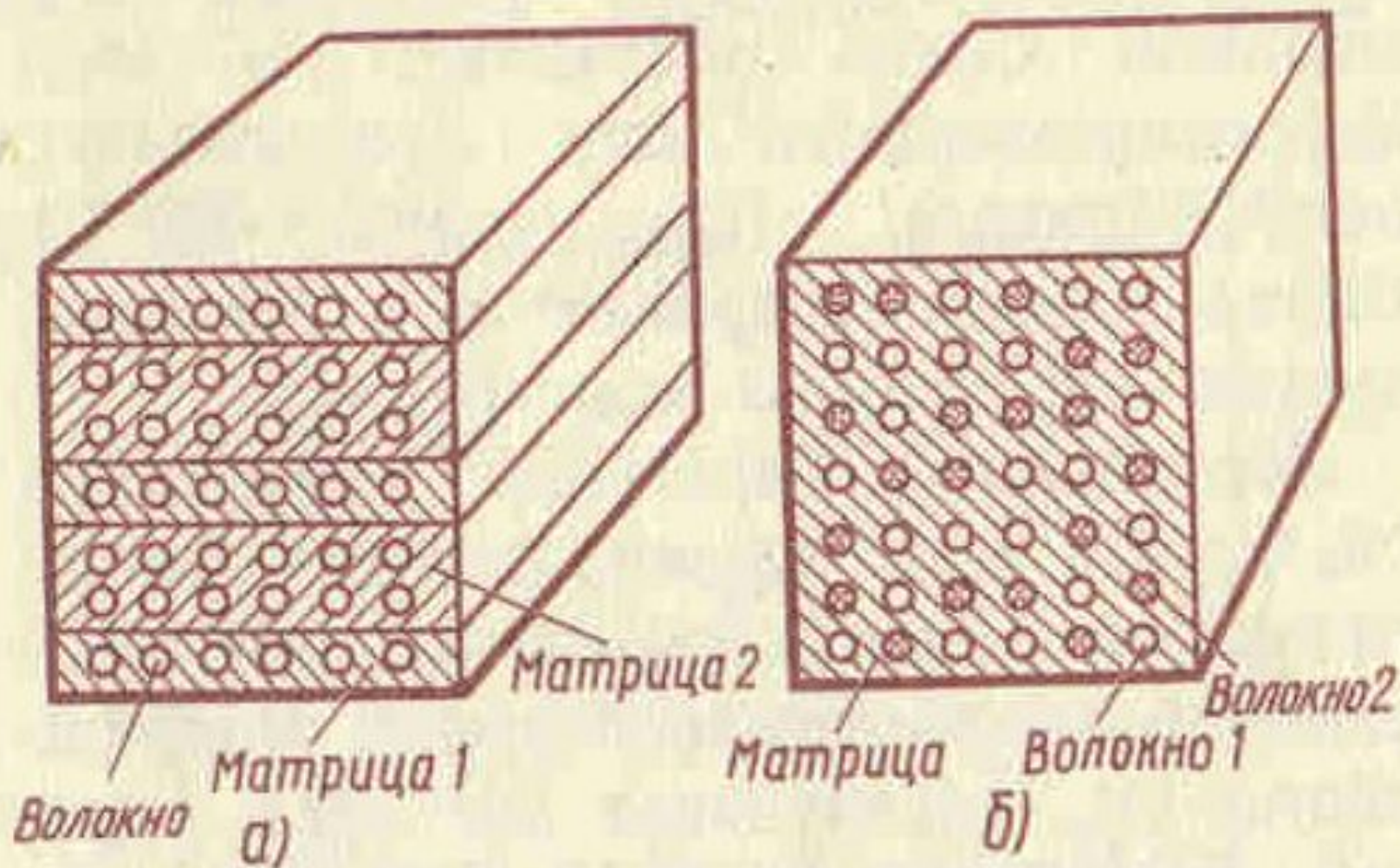
Основой (матрицей) КМ могут служить:

- Металлы или сплавы
- Полимеры, углеродные, керамические материалы

Матрица связывает композицию, придает ей форму. От свойств матрицы в значительной степени зависят:

- Технологические режимы получения КМ
- Эксплуатационные характеристики
- Рабочая температура
- Сопротивление усталостному разрушению
- Сопротивление воздействию окружающей среды
- Плотность
- Удельная прочность

# Схемы полиматричного (а) и полиармированного (б) композиционных материалов



Свойства КМ зависят от формы, размера, количества и характера распределения наполнителя.

По форме наполнители разделяют на три группы:

1. Нуль-мерные
2. Одномерные
3. Двумерные

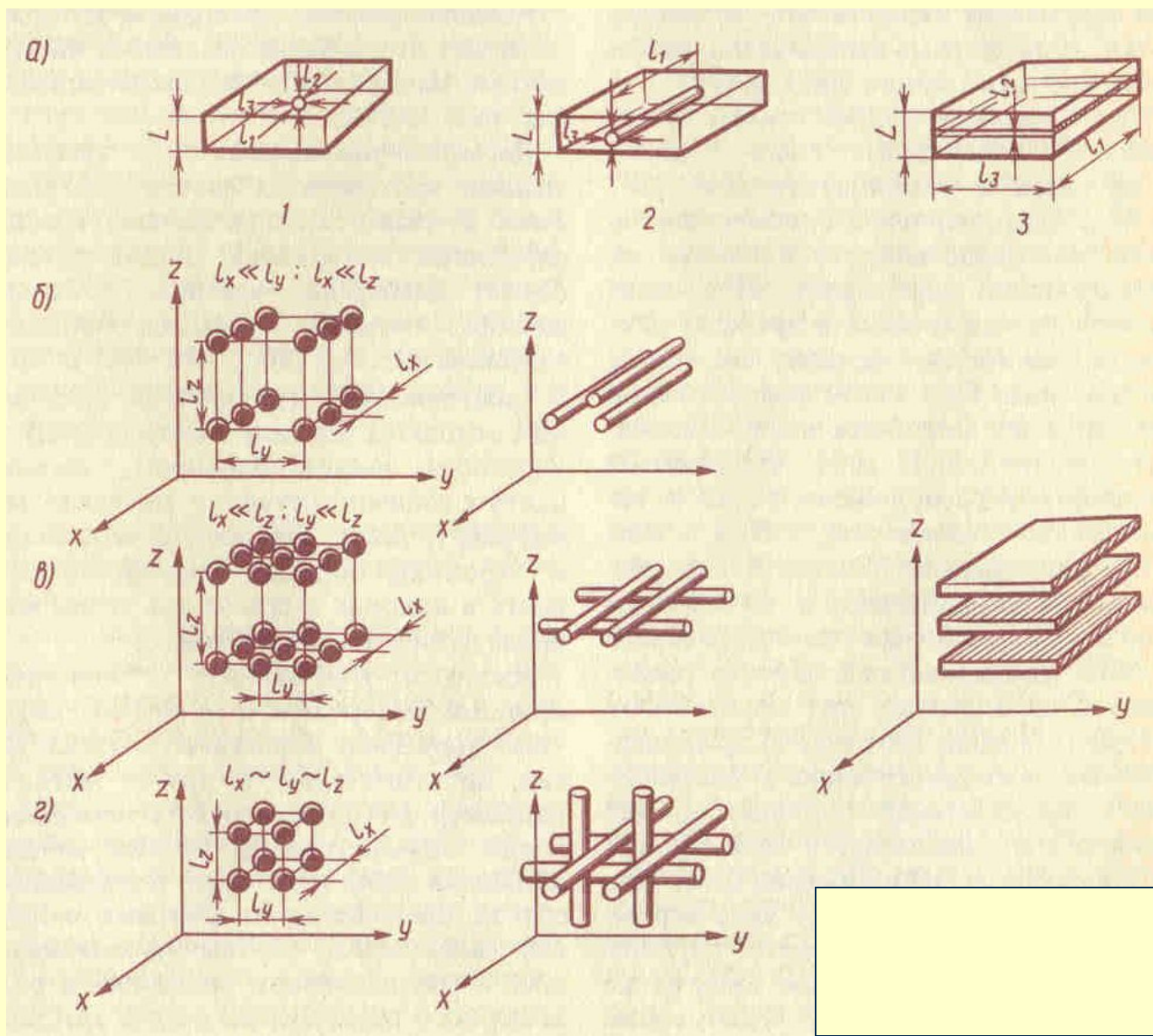
По форме наполнителя КМ разделяют:

1. Дисперсно-упрочненные
2. Волокнистые
3. Слоистые

По схеме армирования КМ подразделяют на три группы:

1. Одноосное
2. Двухосное
3. Трехосное

# Классификация композиционных материалов по форме наполнителя (а) и схемы армирования (б, в, г)



КМ применяют во многих отраслях промышленности:

- лопасти винтов вертолетов
- камер сгорания реактивных двигателей
- лопатки турбин
- детали двигателей
- корпуса лодок
- гребные винты
- электро-изоляционные материалы
- радиопрозрачные обтекатели
- подшипников скольжения и др.

# Дисперсионно-упрочненные композиционные материалы

Наполнителями служат дисперсные частицы тугоплавких фаз - оксидов, нитридов, боридов, карбидов ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $BN$ ,  $SiC$  и др.)

Достоинства соединений:

- Высокий модуль упругости
- Низкая плотность
- Пассивность к взаимодействию с материалами матриц
- Распространенность в природе
- Невысокая стоимость

В дисперсионно-упрочненных КМ основную нагрузку воспринимает матрица, а дисперсные частицы упрочнителя оказывают сопротивление движению дислокаций при нагружении материала, мешают развитию пластической деформации

Большое упрочнение достигается при размере частиц 0,01-0,1 мкм и расстоянии между ними 0,05-0,5 мкм

# Дисперсионно-упрочненные композиционные материалы на алюминиевой основе

Материал **САП** характеризуется:

- Высокой прочностью
- Жаропрочностью
- Коррозионной стойкостью
- Термической стабильностью свойств

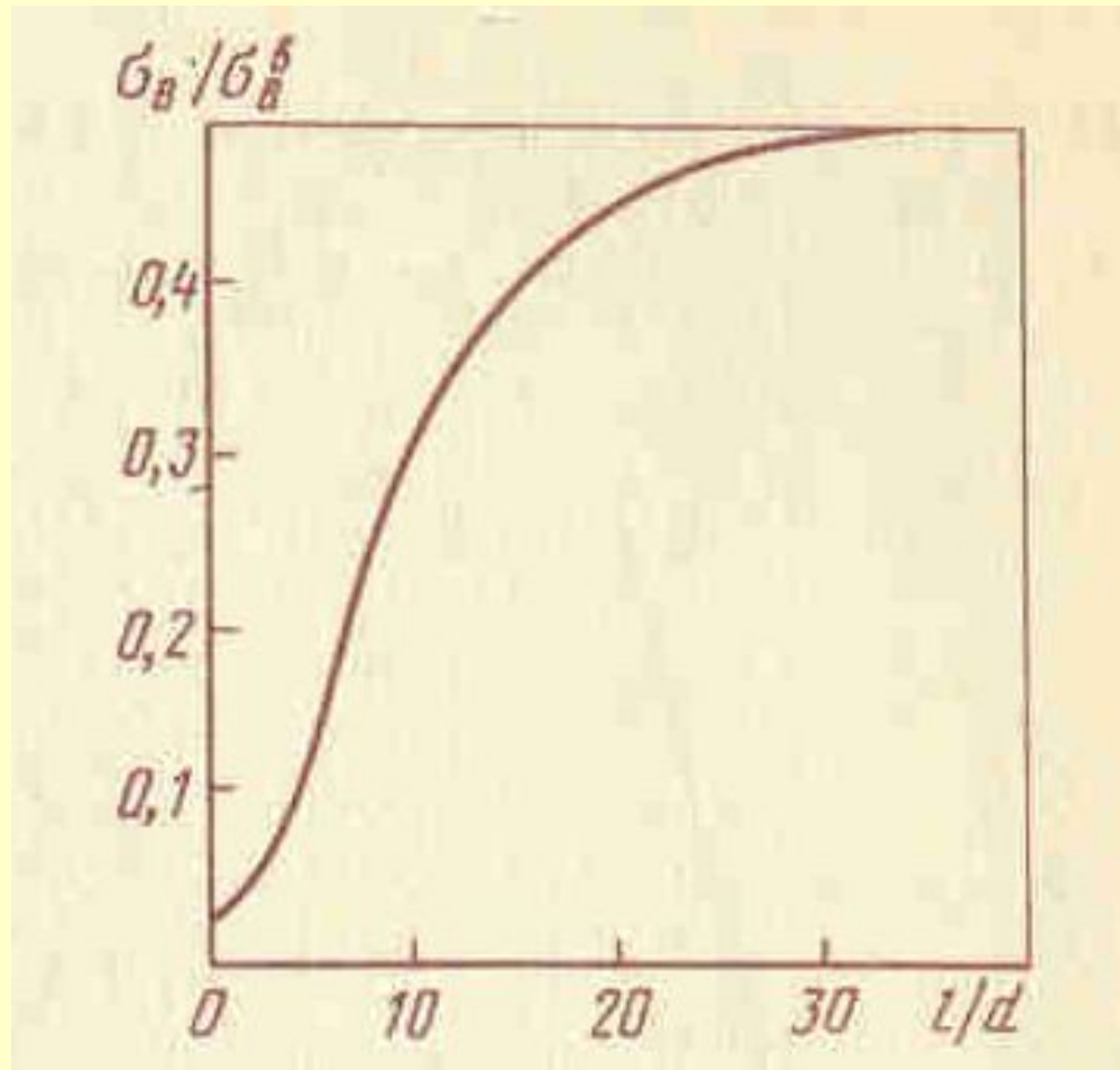
## Механические свойства САП

| Материал | Содержание<br>$Al_2O_3$ , % | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_B/(\rho g)$ , км | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | $E$ , ГПа | $E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$ ,<br>км |
|----------|-----------------------------|------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-----------|------------------------------------|
| САП-1    | 6—8                         | 300              | 11                       | 220                  | 7            | 67        | 2,1                                |
| САП-2    | 9—12                        | 350              | 13                       | 280                  | 5            | 71        | 2,6                                |
| САП-3    | 13—17                       | 400              | 15                       | 320                  | 3            | 76        | 2,8                                |
| САП-4    | 18—22                       | 450              | 17                       | 370                  | 1,5          | 80        | 2,9                                |

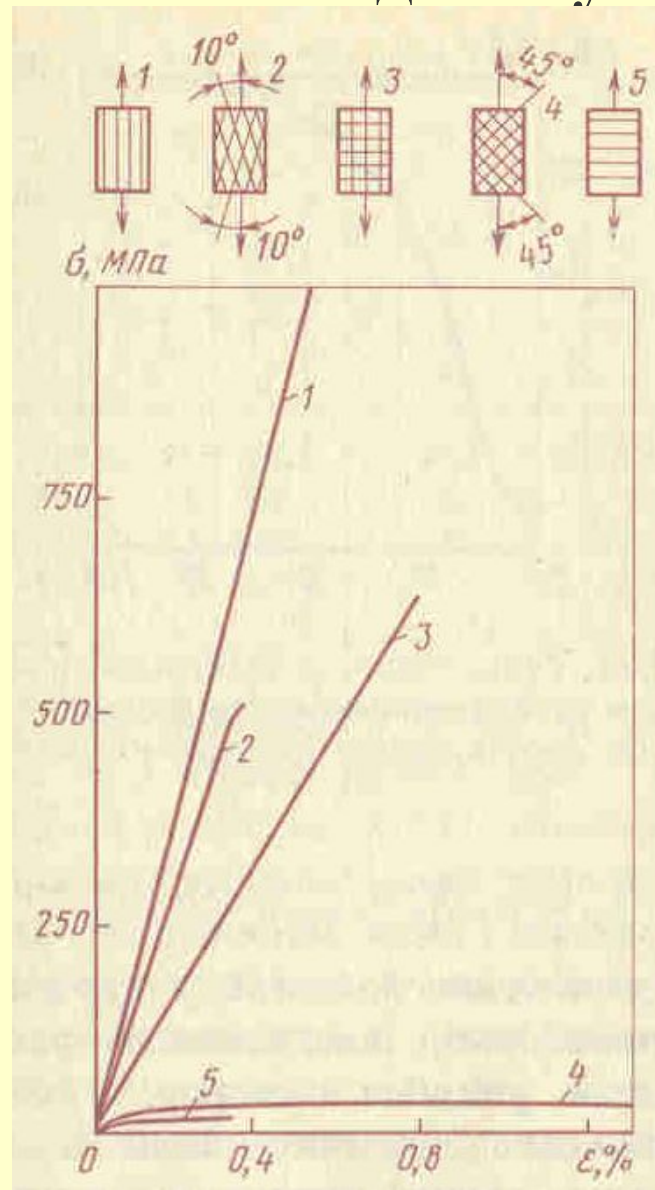
# Волокнистые композиционные материалы

Упрочнителями служат волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (*B, C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC* и др.), а также проволока из металлов и сплавов (*Mo, W, Be*, высокопрочная сталь и др.)

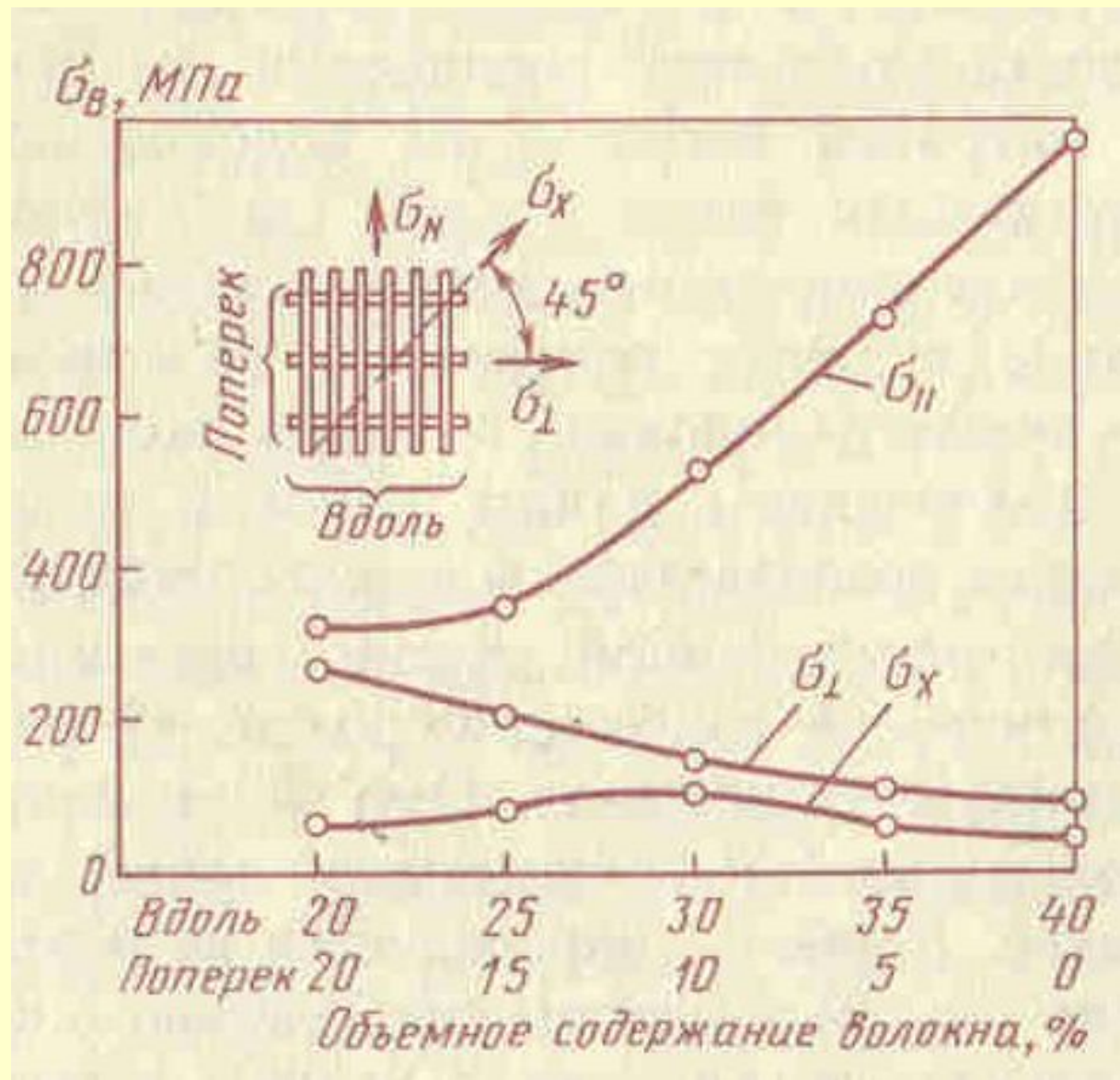
# Теоретическая зависимость эффективности упрочнения композиционного материала от соотношения $l/d$ упрочнителя



# Схемы армирования (1-5) композиционных материалов и их влияние на напряжения при растяжении эпоксидных углепластиков



# Зависимость временного сопротивления композиционных материалов ВКА-1 от содержания и ориентации волокон



# Механические свойства одноосно-армированных композиционных материалов с металлической матрицей

| Композиционный материал | Матрица  | Наполнитель        |               | $\rho$ , т/м <sup>3</sup> | $\sigma_B/(\rho g)$ , км | $E$ , ГПа | $E/(\rho g) \times 10^{-3}$ , км | $\sigma_B$ , МПа (20 °С) | $\sigma_{-1}$ , МПа (на базе 10 <sup>7</sup> циклов) |
|-------------------------|----------|--------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------|
|                         |          | Материал           | Количество, % |                           |                          |           |                                  |                          |                                                      |
| ВКА-1                   | Алюминий | Борное волокно     | 50            | 2,65                      | 45                       | 240       | 9                                | 1200                     | 600                                                  |
| ВКУ-1                   | »        | Углеродное волокно | 30—40         | 2,2—2,3                   | 42                       | 270       | 12                               | 900—1000                 | 200                                                  |
| КАС-1                   | »        | Стальная проволока | 40            | 4,8                       | 33                       | 120       | 2                                | 1600                     | 350                                                  |
| ВКМ-3                   | Магний   | Борное волокно     | 45            | 2,2                       | 57                       | 200       | 9                                | 1250                     | —                                                    |
| —                       | »        | Углеродное волокно | 30—40         | 1,8                       | 42                       | 130—150   | 8                                | 700—800                  | —                                                    |

# Структура излома композиционного материала *ВКА-1*



# Свойства волокон и нитевидных монокристаллов

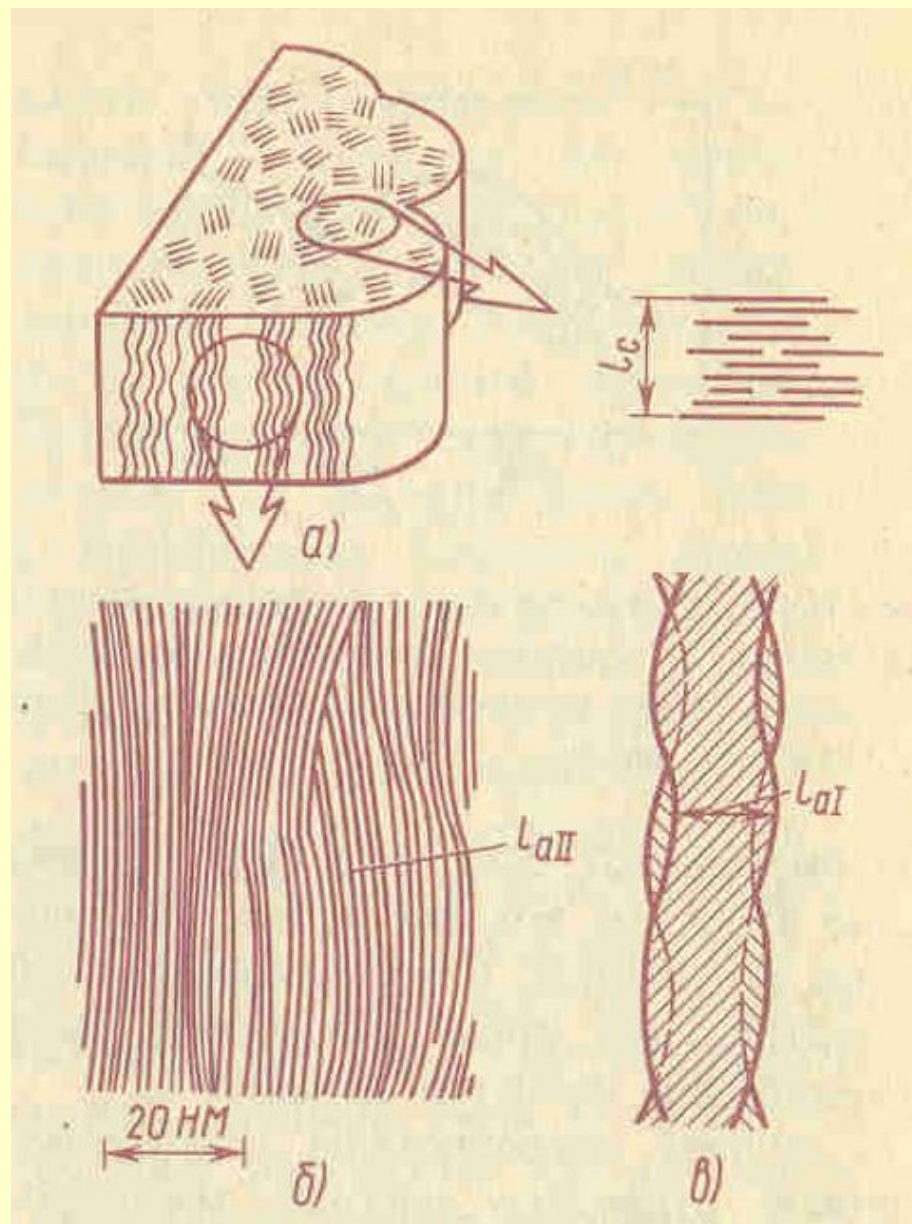
| Материал                                 | Температура плавления или размягчения, °С | $\rho$ , т/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_B/(\rho g)$ , км | $E$ , ГПа | Средний диаметр волокна, мкм |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------------|-----------|------------------------------|
| Волокна                                  |                                           |                           |                  |                          |           |                              |
| Углерод или графит                       | 3650                                      | 1,6–2                     | 1687–3374        | 110–210                  | 216–677   | 5,8–7,6                      |
| Бор на вольфрамовой проволоке            | 2300                                      | 2,63                      | 2707–4060        | 110–160                  | 373–402   | 102–142                      |
| Борсик на вольфрамовой проволоке         | 2300                                      | 2,77                      | 2707–4060        | 100–160                  | 373–412   | 104                          |
| Карбид кремния на вольфрамовой проволоке | 2200                                      | 3,35–3,46                 | 2236–3893        | 67–120                   | 492–471   | 102                          |
| Оксид алюминия $Al_2O_3$                 | 2040                                      | 3,14                      | 2030             | 66                       | 169       | 3                            |
| Стекло                                   | —                                         | 2,5                       | 4482             | 183                      | 89,3      | —                            |
| Бериллий                                 | 1284                                      | 1,85                      | 686–981          | 38–54                    | 295       | 125–1500                     |
| Вольфрам                                 | 3410                                      | 19,3                      | 1657–3207        | 9–17                     | 420       | 51–1270                      |
| Сталь ВНС9 (18Х15Н5АМЗ)                  | —                                         | 7,8                       | 3800             | 48                       | 200       | 150                          |
| Нитевидные монокристаллы                 |                                           |                           |                  |                          |           |                              |
| Сапфир, $Al_2O_3$                        | 2040*                                     | 3,96                      | 4021–23634       | 110–620                  | 402–1010  | 0,51–11                      |
| Карбид кремния                           | 2690*                                     | 3,22                      | 13533–40600      | 440–1320                 | 441–1010  | 0,51–11                      |

\* Температура разложения.

# Структура поверхности борного волокна



# Строение углеродных волокон



а-общий вид

б-продольное сечение фибриллы

в-поперечное сечение микрофибриллы

$l_a$  и  $l_c$ -поперечные размеры микрофибрилл

# Влияние добавок ионов *Ba* и *Ni* на свойства одноосно-армированных композиционных материалов

| Свойства                                                                           | Композиционный материал | Полиметилефенольная матрица |                |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|
|                                                                                    |                         | Без добавок                 | Ионы Ba (15 %) | Ионы Ni (7,6 %) |
| Модуль упругости при изгибе, МПа                                                   | —                       | 2 060 *                     | 2 580 *        | 3 100 *         |
|                                                                                    | Стекловолокнит          | 44 500                      | 45 000         | 45 600          |
|                                                                                    | Углевлокнит             | 106 000                     | 107 000        | 108 000         |
| Разрушающее напряжение, при изгибе, МПа                                            | —                       | 81 *                        | 87 *           | 90 *            |
|                                                                                    | Стекловолокнит          | 89                          | 1260           | 1330            |
|                                                                                    | Углевлокнит             | 87                          | 1370           | 1520            |
| Адгезионная прочность сцепления полиметилефенольной матрицы со стекловолокном, МПа | Стекловолокнит          | 1580                        | 2160           | 2280            |

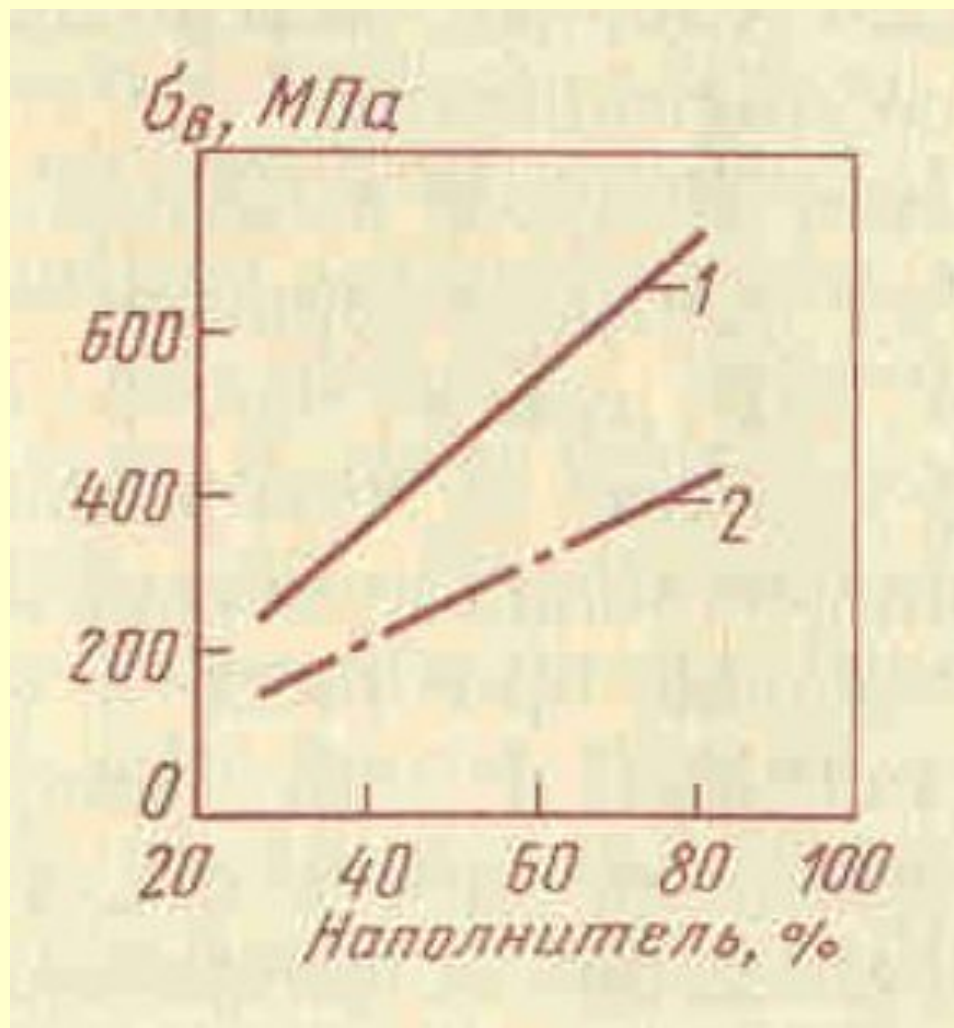
\* Свойства матрицы.

# Свойства одноосно-армированных композиционных материалов с полимерной матрицей

| Материал                           | $\rho$ , т/м <sup>3</sup> | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_B/(\rho g)$ ,<br>кМ | $\delta$ , % | $E$ , ГПа | $E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$ ,<br>кМ | $\sigma_{-1}^*$ ,<br>МПа |
|------------------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-----------|------------------------------------|--------------------------|
| Карбоволокниты:                    |                           |                  |                             |              |           |                                    |                          |
| КМУ-1л                             | 1,4                       | 650              | 46                          | 0,5          | 120       | 8,6                                | 300                      |
| КМУ-1у                             | 1,47                      | 1020             | 70                          | 0,6          | 180       | 12,2                               | 500                      |
| КМУ-1в                             | 1,55                      | 1000             | 65                          | 0,6          | 180       | 11,5                               | 350                      |
| КМУ-2в                             | 1,3                       | 380              | 30                          | 0,4          | 81        | 6,2                                | 135                      |
| Бороволокниты:                     |                           |                  |                             |              |           |                                    |                          |
| КМБ-1к                             | 2                         | 900              | 43                          | 0,4          | 214       | 10,7                               | 350                      |
| КМБ-2к                             | 2                         | 1000             | 50                          | 0,3          | 260       | 13                                 | 400                      |
| КМБ-3к                             | 2                         | 1300             | 65                          | 0,3          | 260       | 12,5                               | 420                      |
| Органоволокниты<br>с упрочнителем: |                           |                  |                             |              |           |                                    |                          |
| эластичным                         | 1,15—1,3                  | 100—190          | 8—15                        | 10—20        | 2,5—8,0   | 0,22—0,6                           | 100                      |
| жестким                            | 1,2—1,4                   | 650—700          | 50                          | 2—5          | 35        | 2,7                                | —                        |
| Стекловолокниты                    | 2,2                       | 2100             | 96                          | —            | 70        | 3,2                                | —                        |

\*  $\sigma_{-1}$  определен на базе  $10^7$  циклов.

# Зависимость прочности стекловолоконитов от содержания и вида наполнителя



1-непрерывное ориентированное волокно

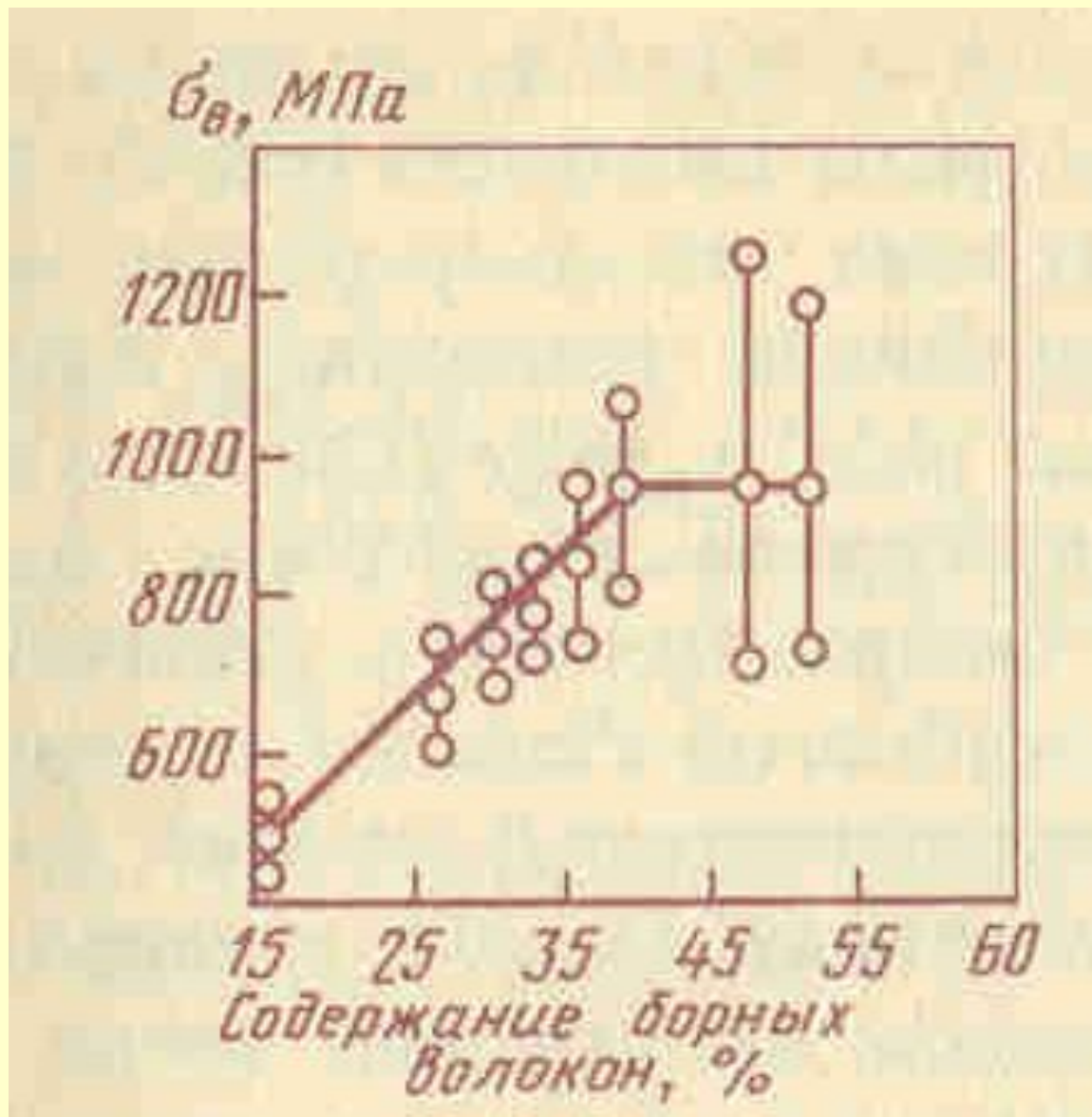
2-короткое неориентированное волокно

# Механические свойства композиционного материала алюминиевый сплав – борные волокна (50 об. %)

| Направление<br>нагружения | $\sigma_B$ , МПа |       | $E$ , ГПа    |       |
|---------------------------|------------------|-------|--------------|-------|
|                           | без<br>т. о.     | т. о. | без<br>т. о. | т. о. |
| Вдоль волокон             | 1580             | 1670  | 232          | 239   |
| Поперек волокон           | 137              | 259   | 141          | 148   |

Примечание. Временное сопротивление матрицы (Al – 1 % Mg – 0.6 % Si – 0.2 % Cr) до термической обработки (т. о.) – 130 МПа, после – 320 МПа.

# Зависимость прочности бороалюминиевых листов от объемного содержания борных волокон



# Механические свойства композиционного материала на основе ВТ6

| Упрочнитель |                     |                   | Композиционный материал  |                   |                           |          |                                   |
|-------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|----------|-----------------------------------|
| Название    | Объемная<br>доля, % | $\sigma_{в},$ МПа | $\rho,$ т/м <sup>3</sup> | $\sigma_{в},$ МПа | $\sigma_{в}/(\rho g),$ км | $E,$ ГПа | $E/(\rho g) \cdot 10^{-3},$<br>км |
| Mo          | 30                  | 2300              | 6,25                     | 1400              | 22                        | 200      | 3,2                               |
| Be          | 33                  | 1050              | —                        | 1050              | —                         | 168      | —                                 |
| SiC*        | 25                  | 2550              | 4,3                      | 910               | 23                        | 210      | 5                                 |

\* Матрица — технический титан.