

Материалы с высокой удельной прочностью

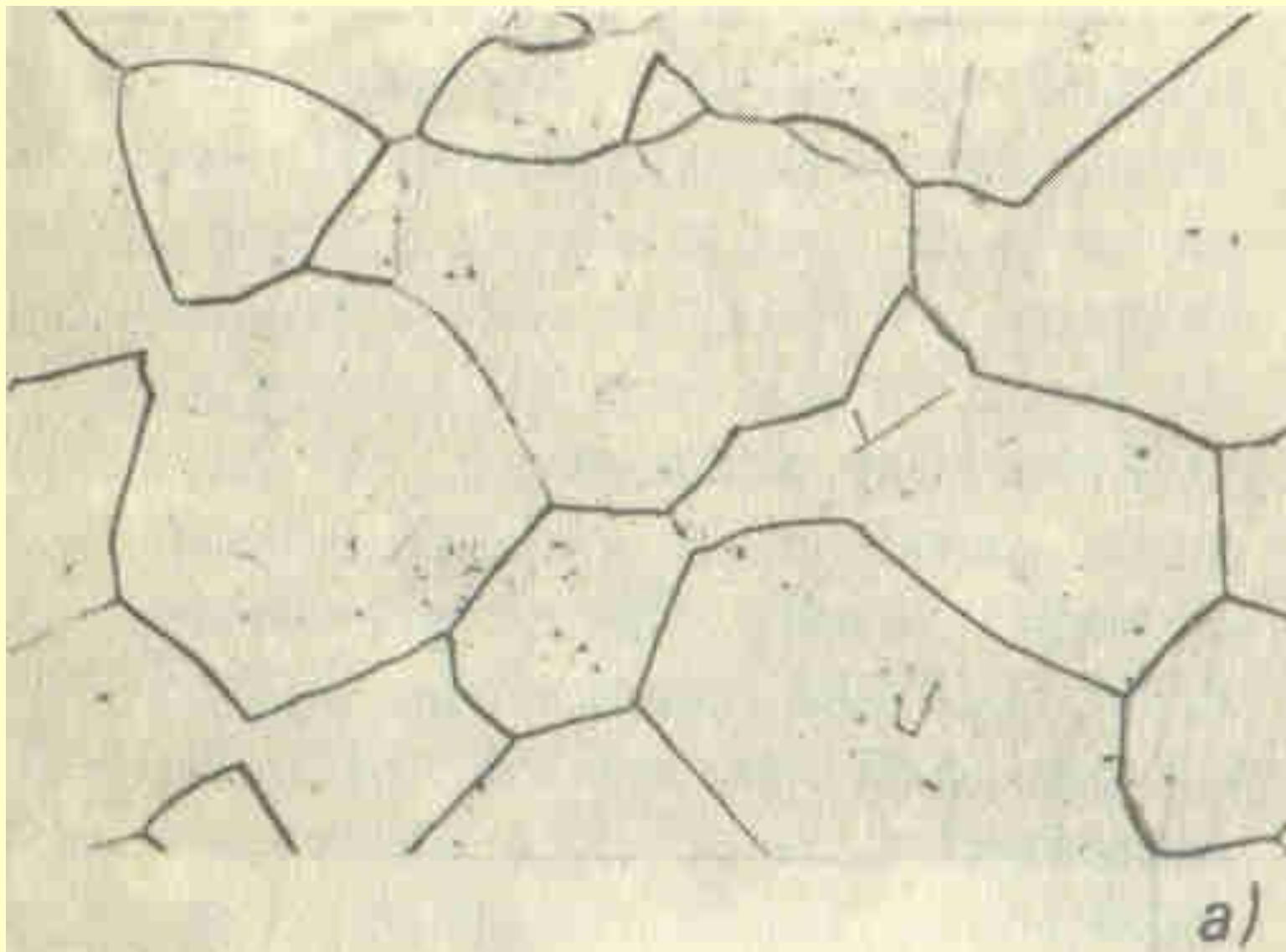
Титан – металл серого цвета. Имеет две полиморфные модификации:

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

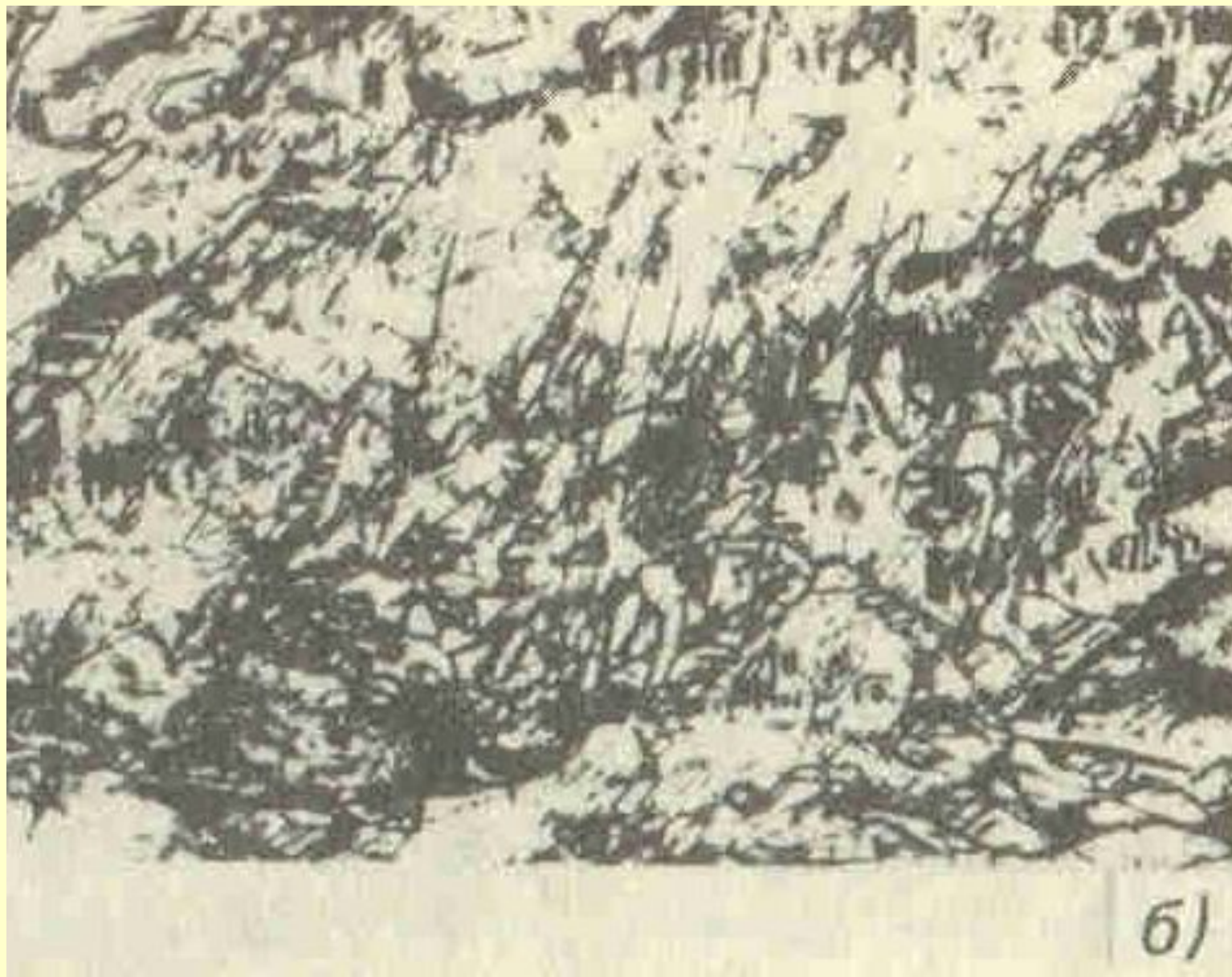
Полиморфное превращение при медленном охлаждении происходит по *нормальному механизму* с образованием полиэдрической структуры.

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

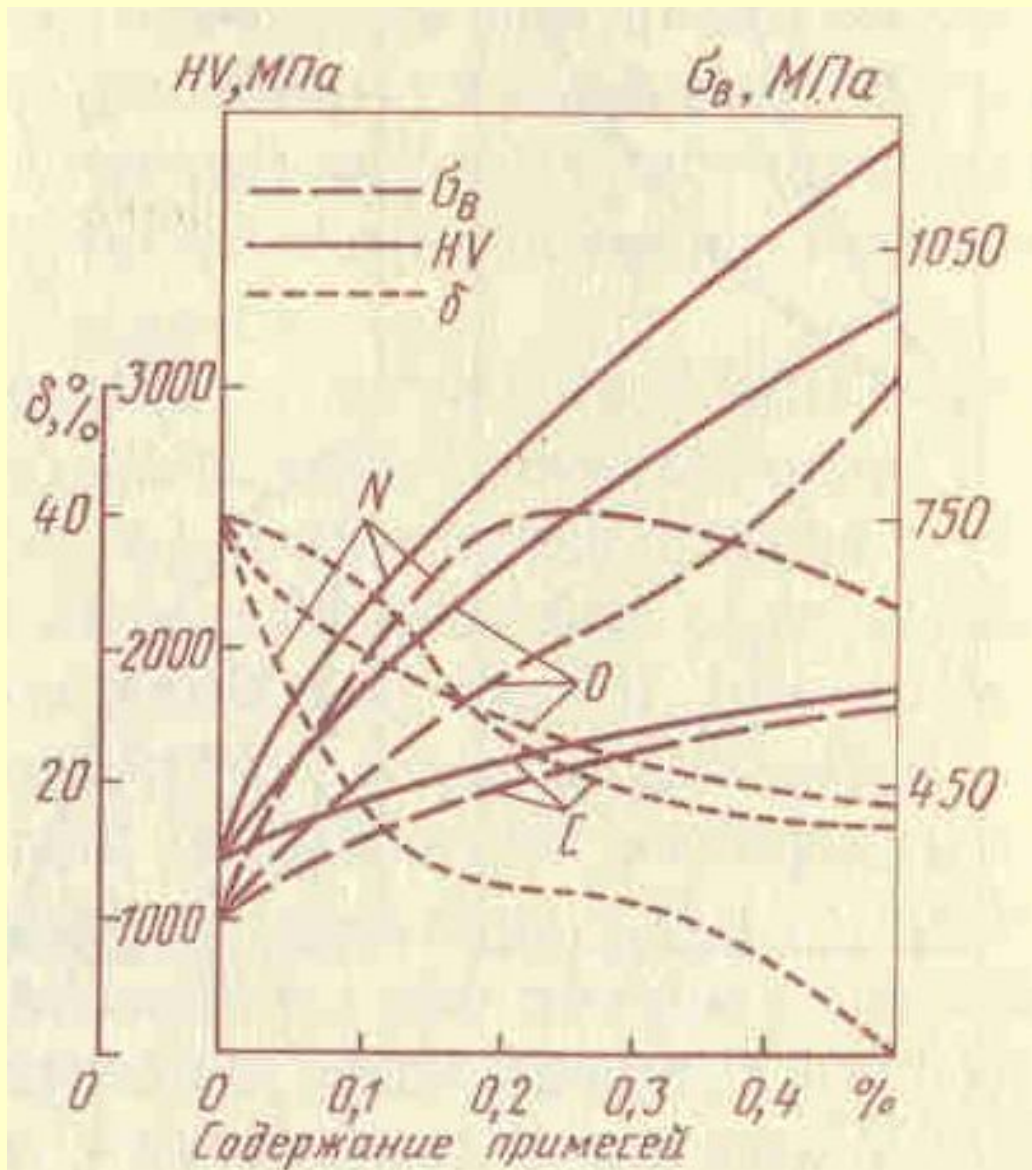
Свойства титана:

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

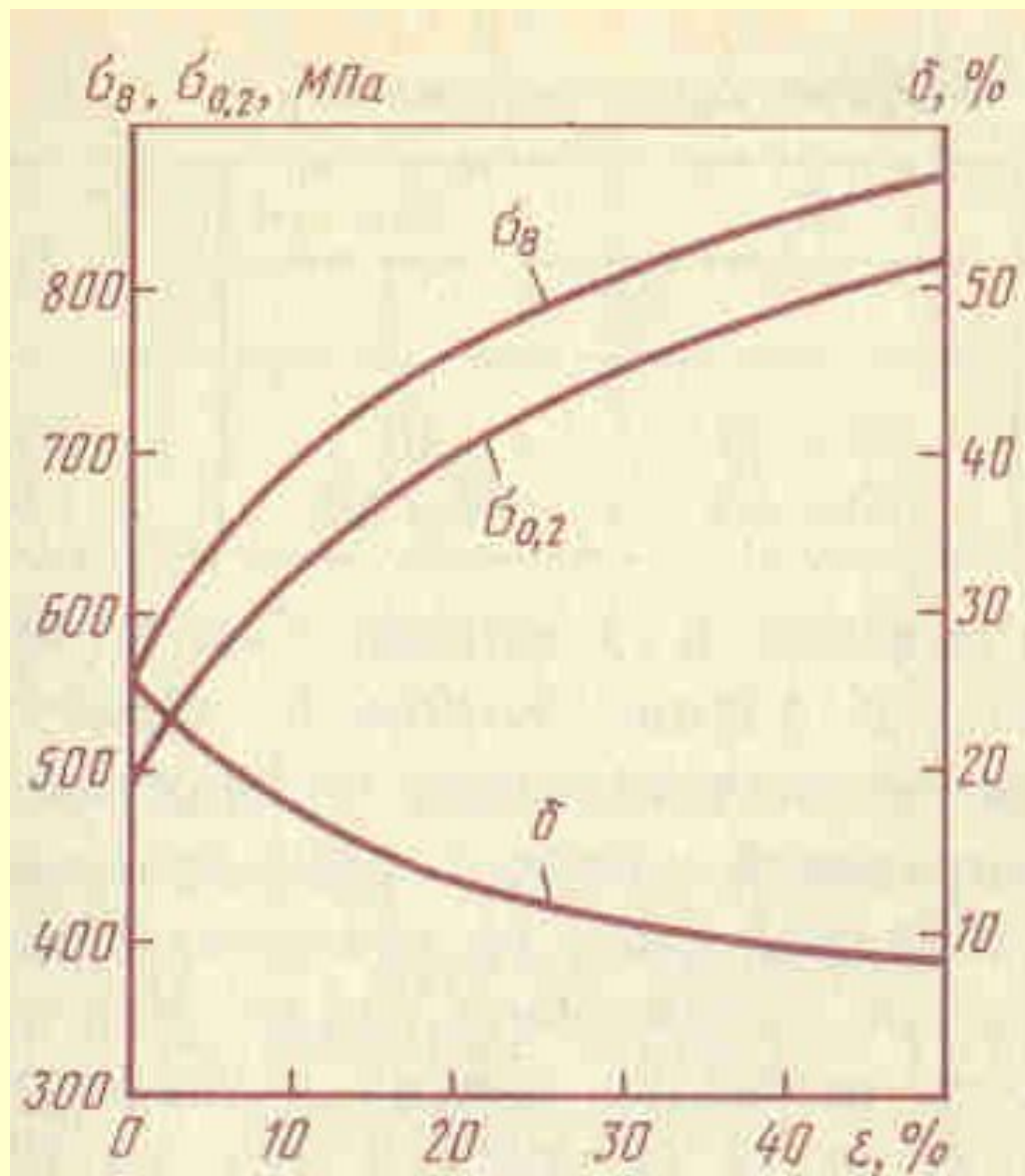
Механические свойства иодидного и технического титана

Титан	Сумма примесей, %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	НВ
		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

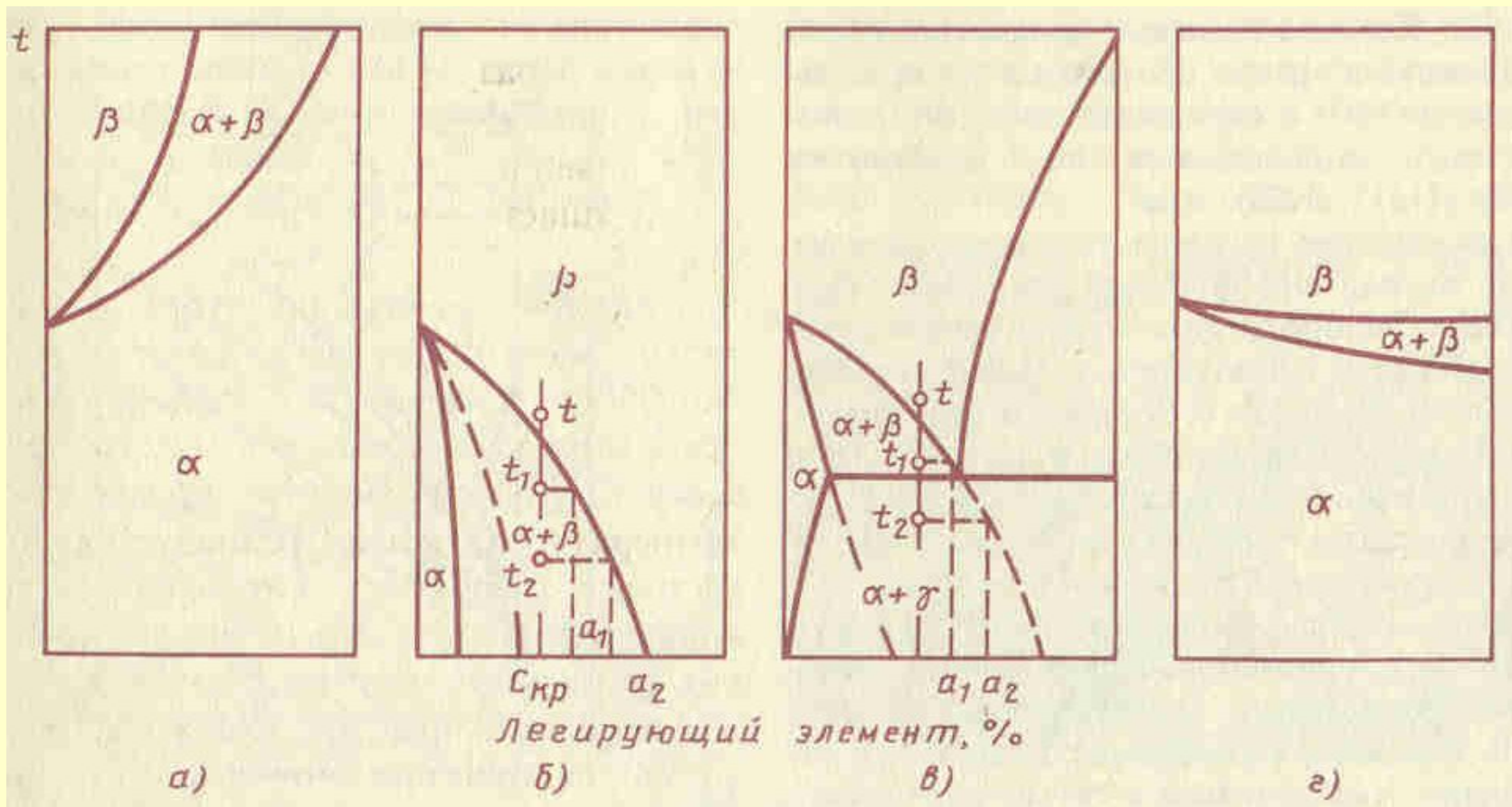


Легирующие элементы по характеру влияния на полиморфные превращения титана подразделяют на три группы:

1. α стабилизаторы
2. β стабилизаторы
3. нейтральные

β

Диаграммы состояния титан-легирующий элемент



а-Ті- α -стабилизаторы (*Al, O, N*)

б-Ті-изоморфные β -стабилизаторы (*Mo, V, Ta, Nb*)

в-Ті-эвтектоидообразующие β -стабилизаторы (*H, Cr, Mn, Fe, Ni, W, Cu*)

г-Ті-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:

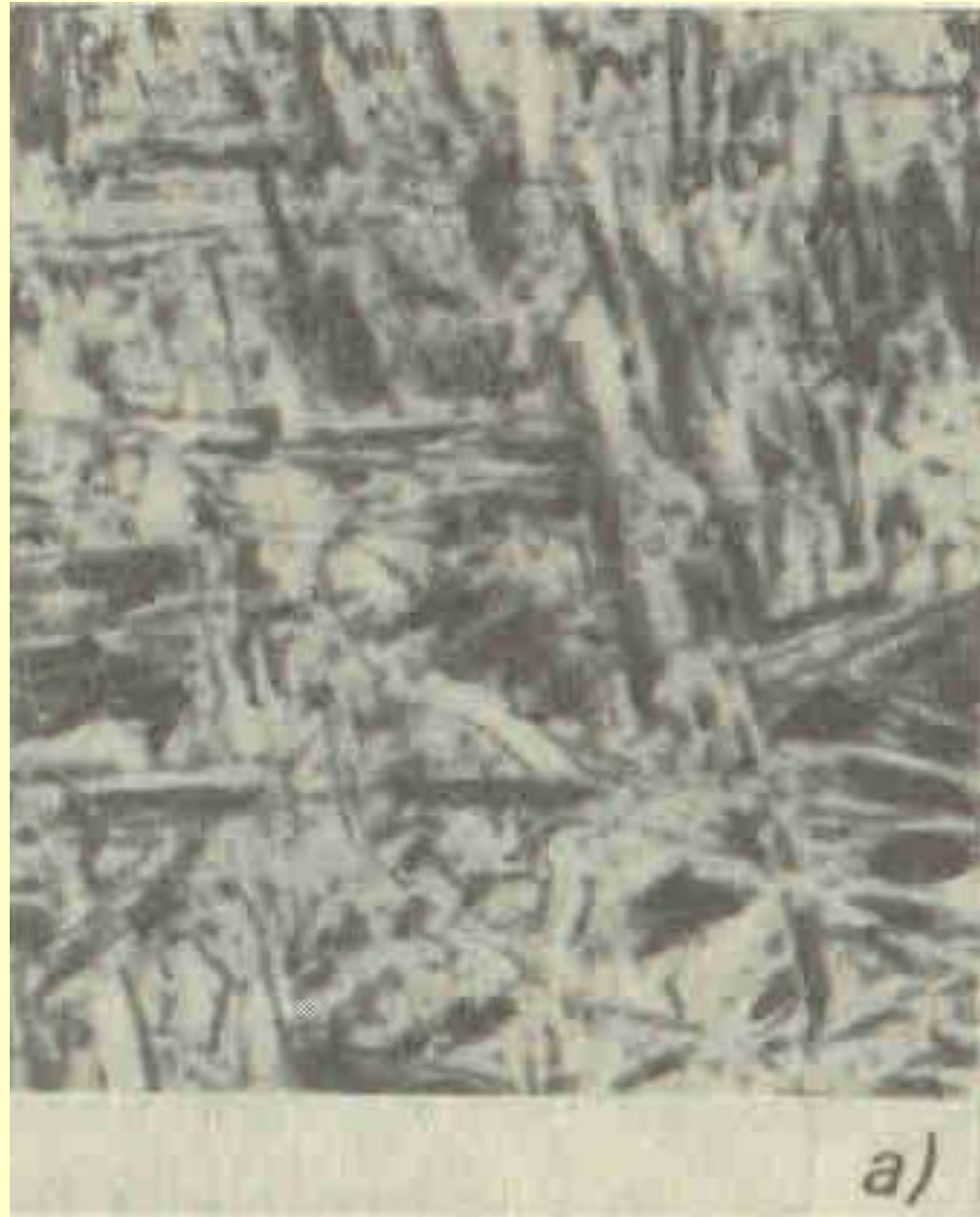
- Упрочняемые ТО
- Неупрочняемые ТО

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

Сплав	Содержание элементов (остальное Ti), %				Структура	Механические свойства		
	Al	V	Mo	Прочие		σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
						МПа		
BT5	4,3–6,2	—	—	—	α -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- α -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 0,8–1,2 Fe		1100–1250	—	9

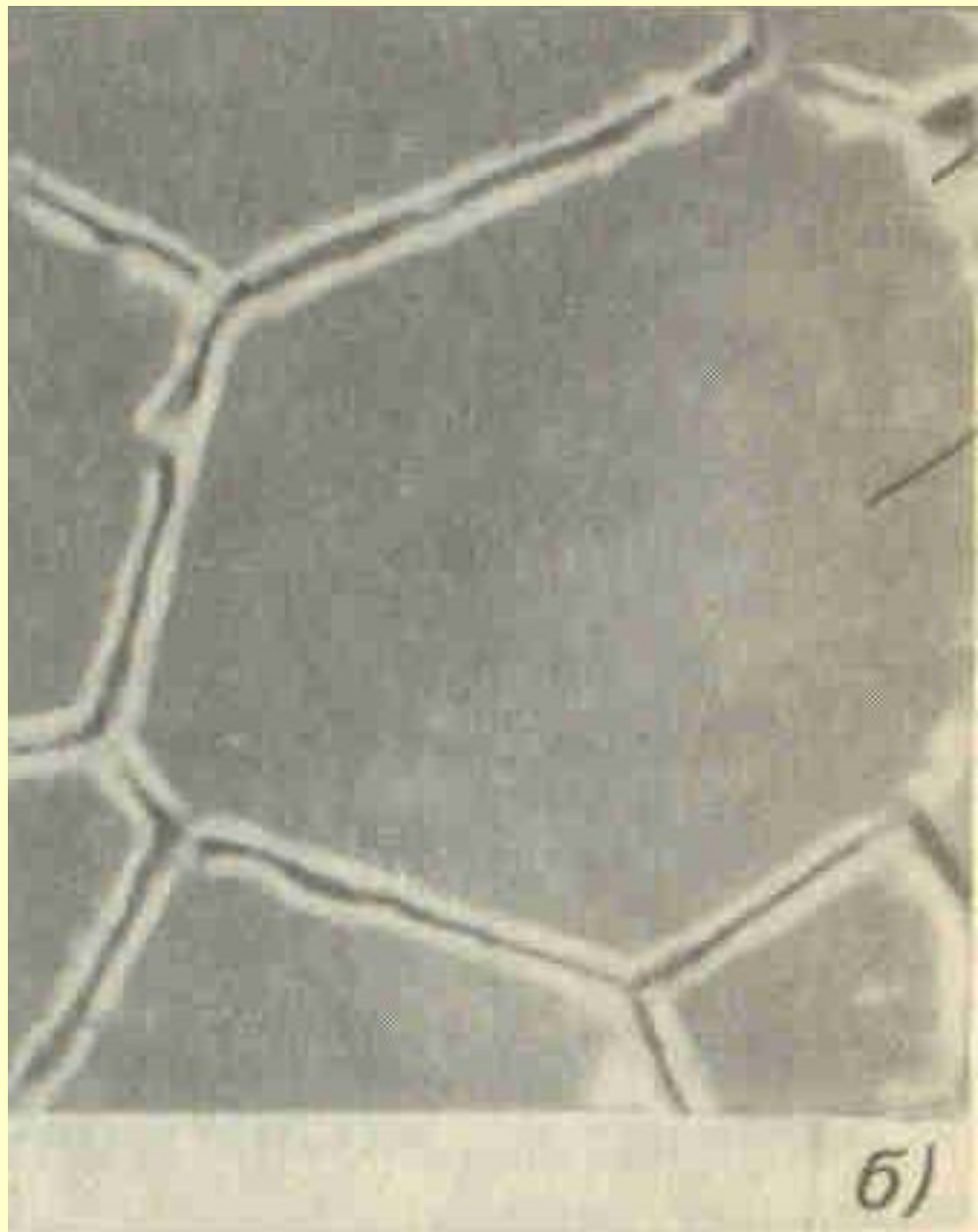
* Свойства этих сплавов приведены после закалки и старения, остальных — в отожженном состоянии.

Микроструктура титанового сплава, х340



VT6 – после закалки

Микроструктура титанового сплава, х340



VT15 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 труднодоступных 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_{α} решетка ГП с периодами $a=0,2286$ нм, $c=0,3584$ нм

2. Высокотемпературная (1250-1284 °С) модификация Be_{β} - 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 гиросtabilизирующих 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.

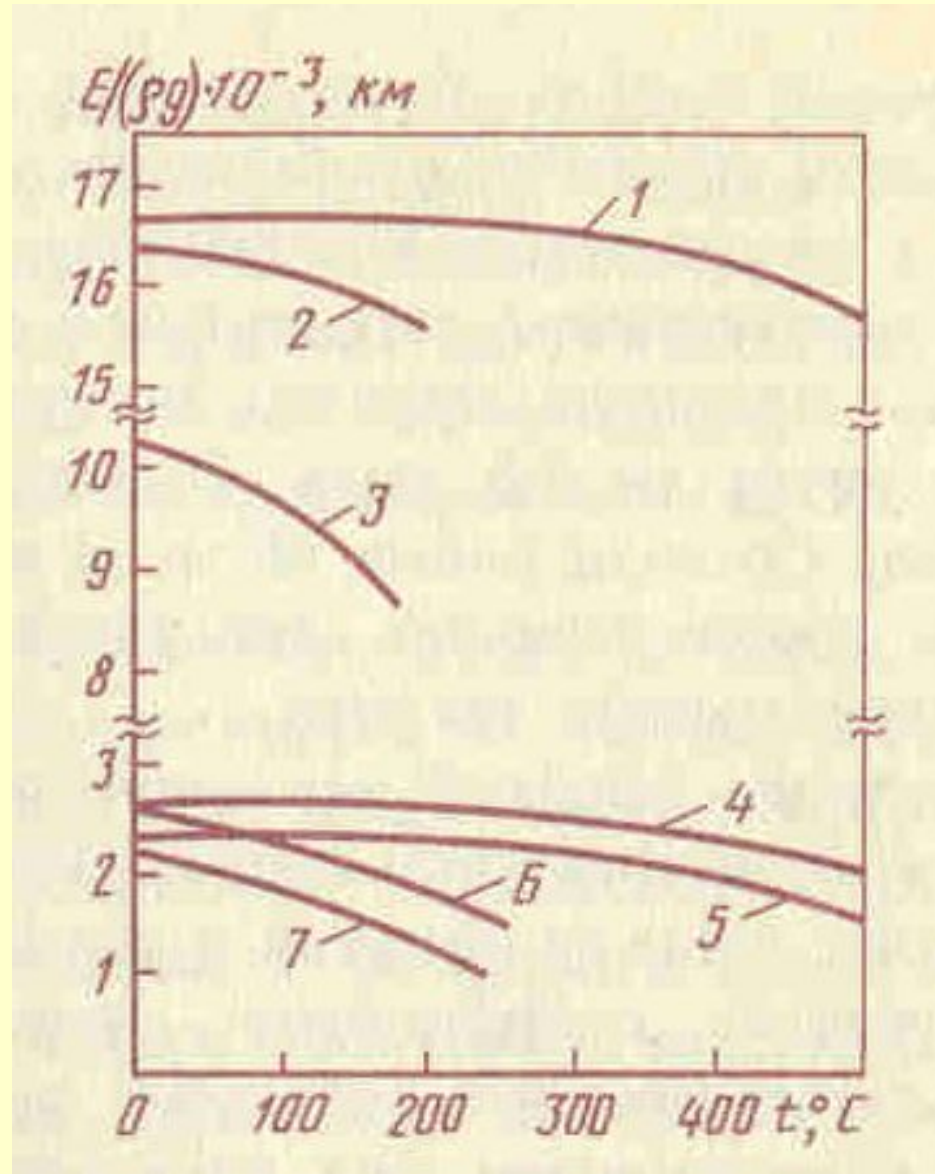
Механические свойства бериллия зависят

- 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

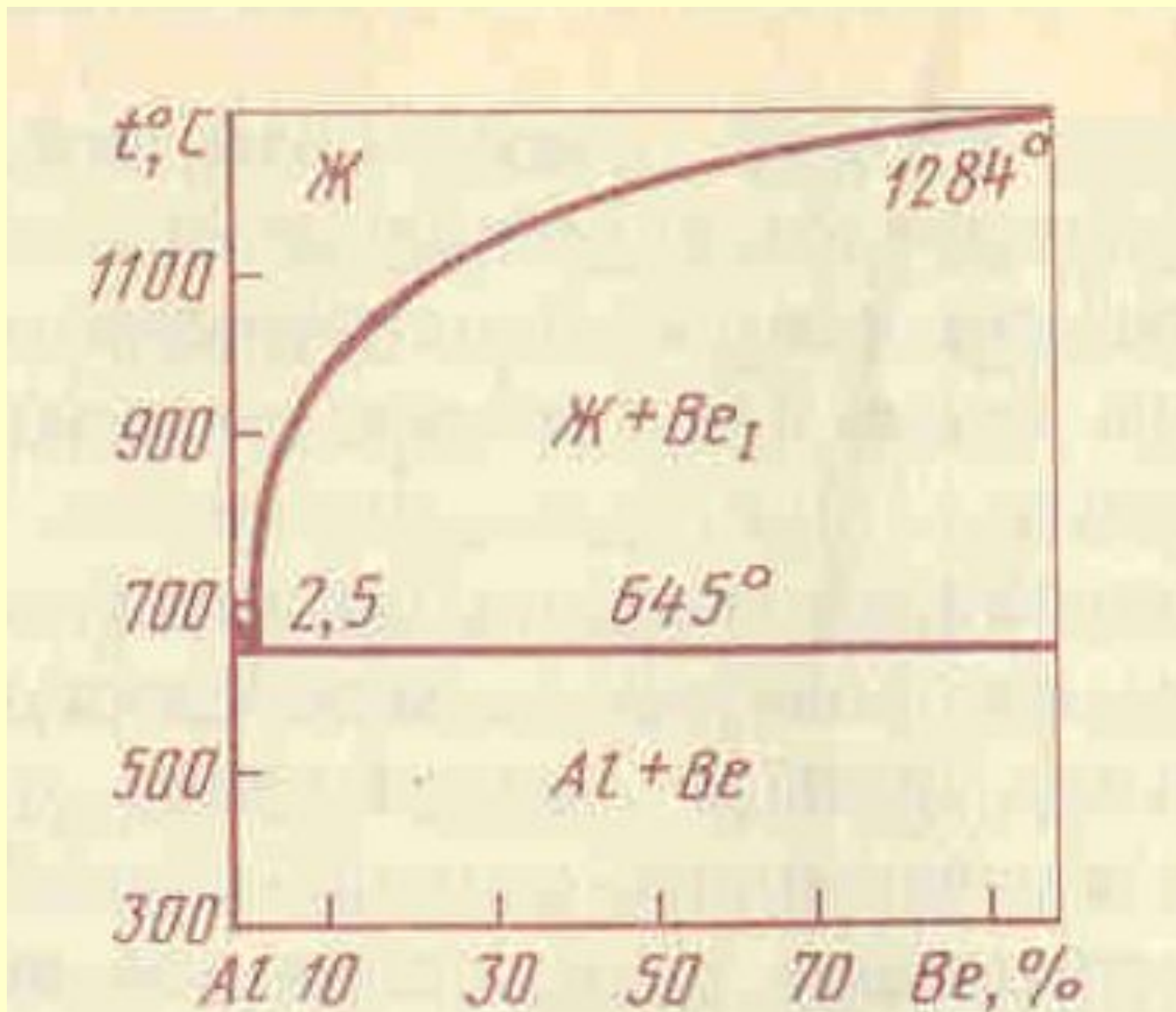
Основные трудности при получении бериллиевых сплавов связаны с его недостатками:

- 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*

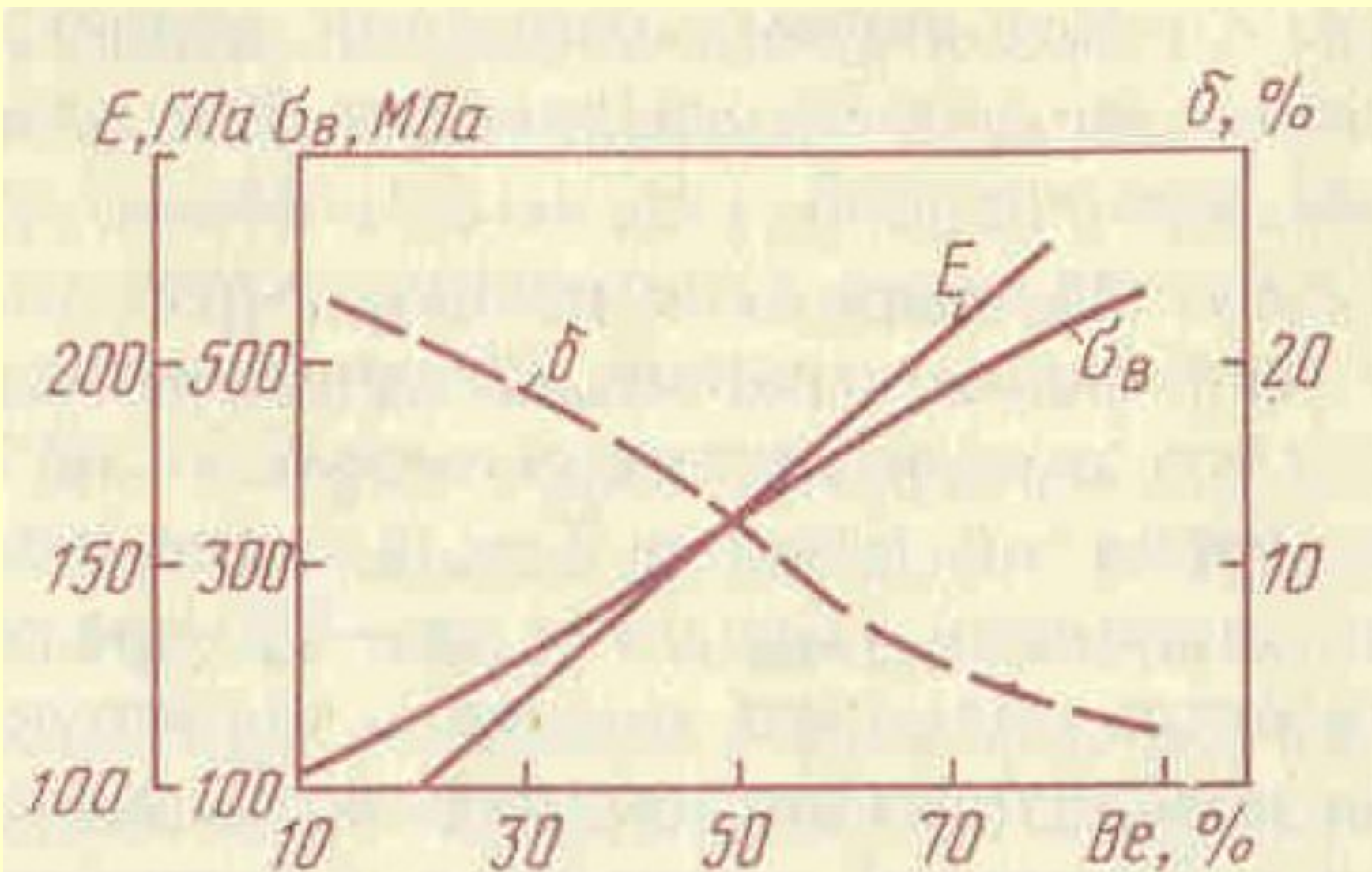


Чем больше содержится в сплавах *бериллия*, тем выше их прочность и жесткость.

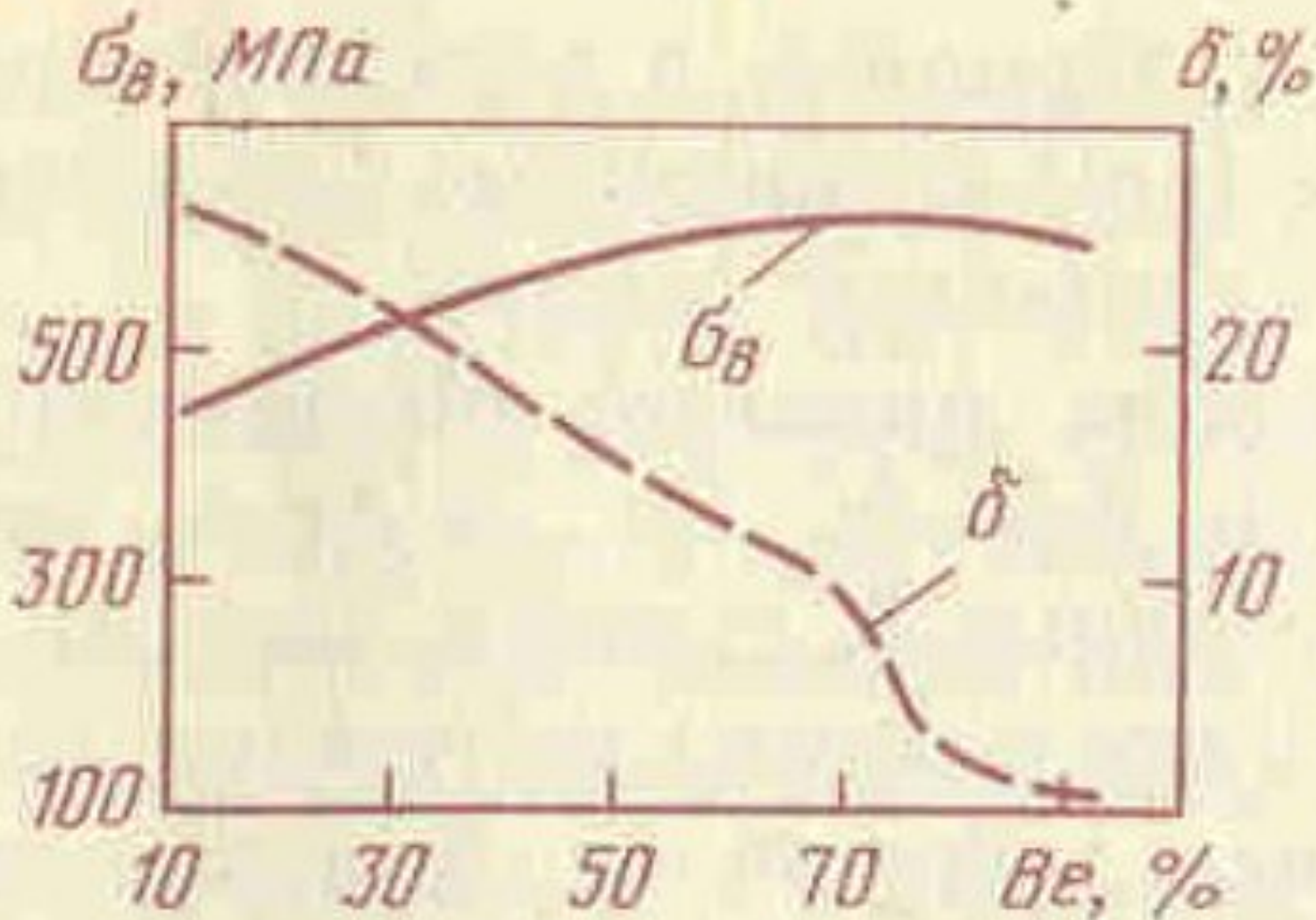
Сплавы *Al-Be* по сравнению с чистым бериллием:

- 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/м³
- хрупкие

Применяют бериллиды для гироскопов и систем управления

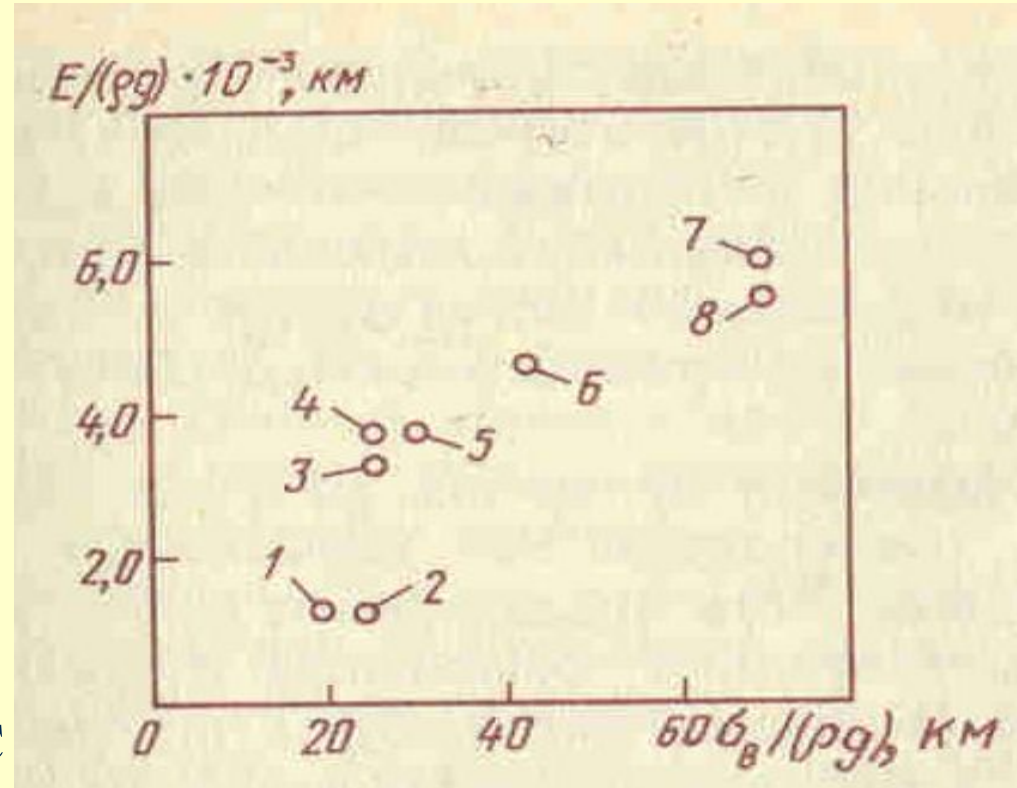
Композиционные материалы

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

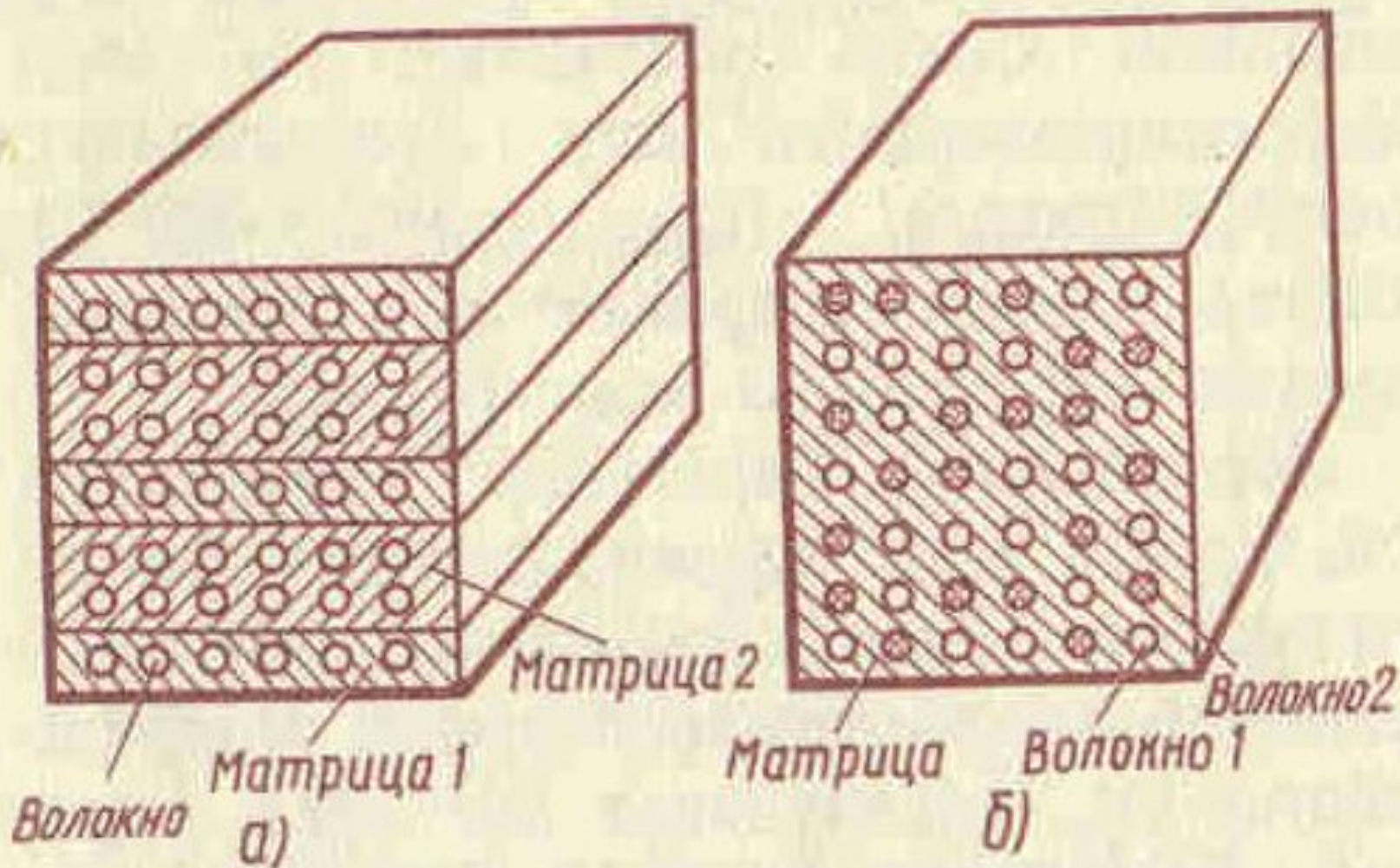
Основой (матрицей) КМ могут служить:

- 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

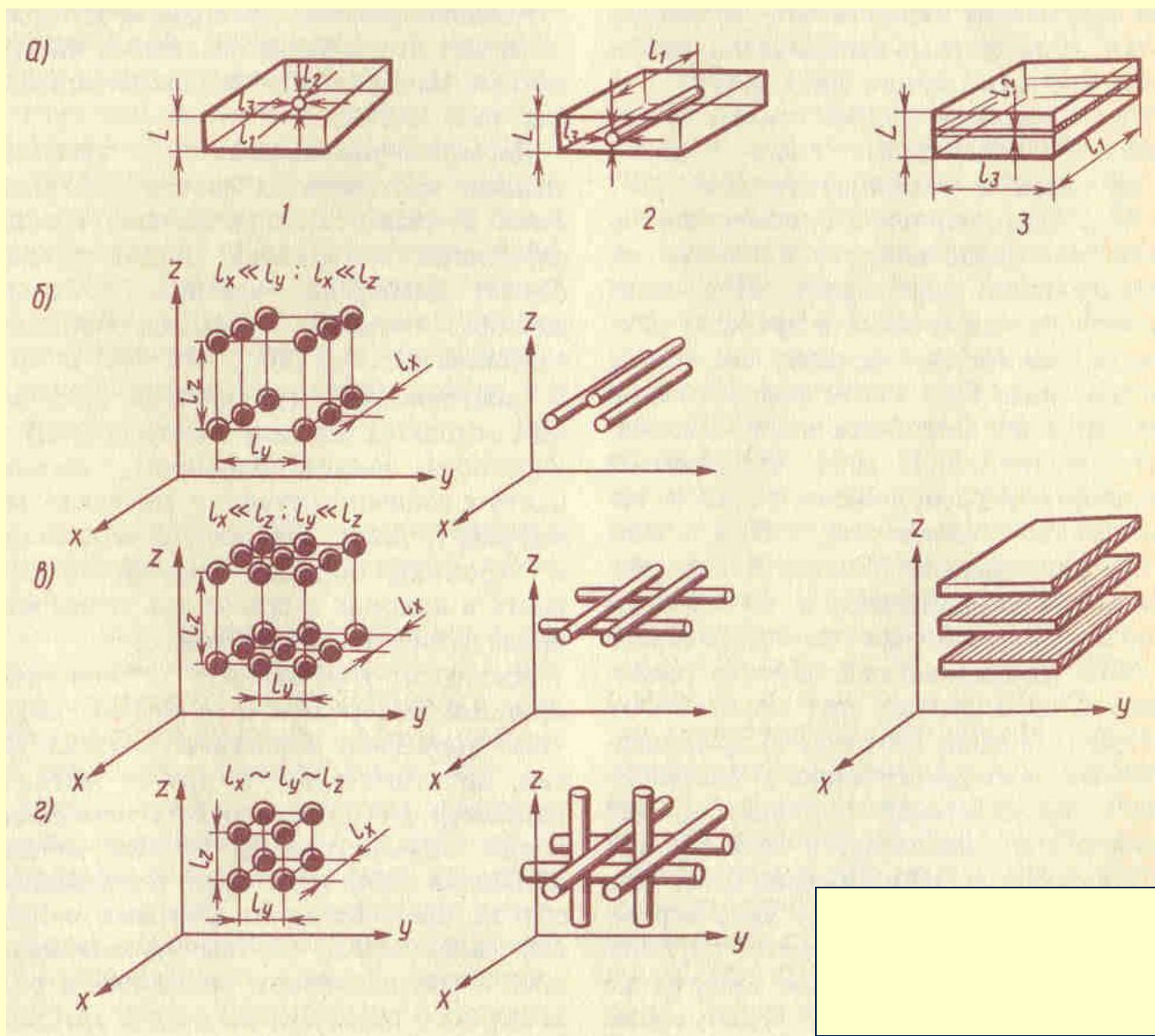
По форме наполнителя КМ разделяют:

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

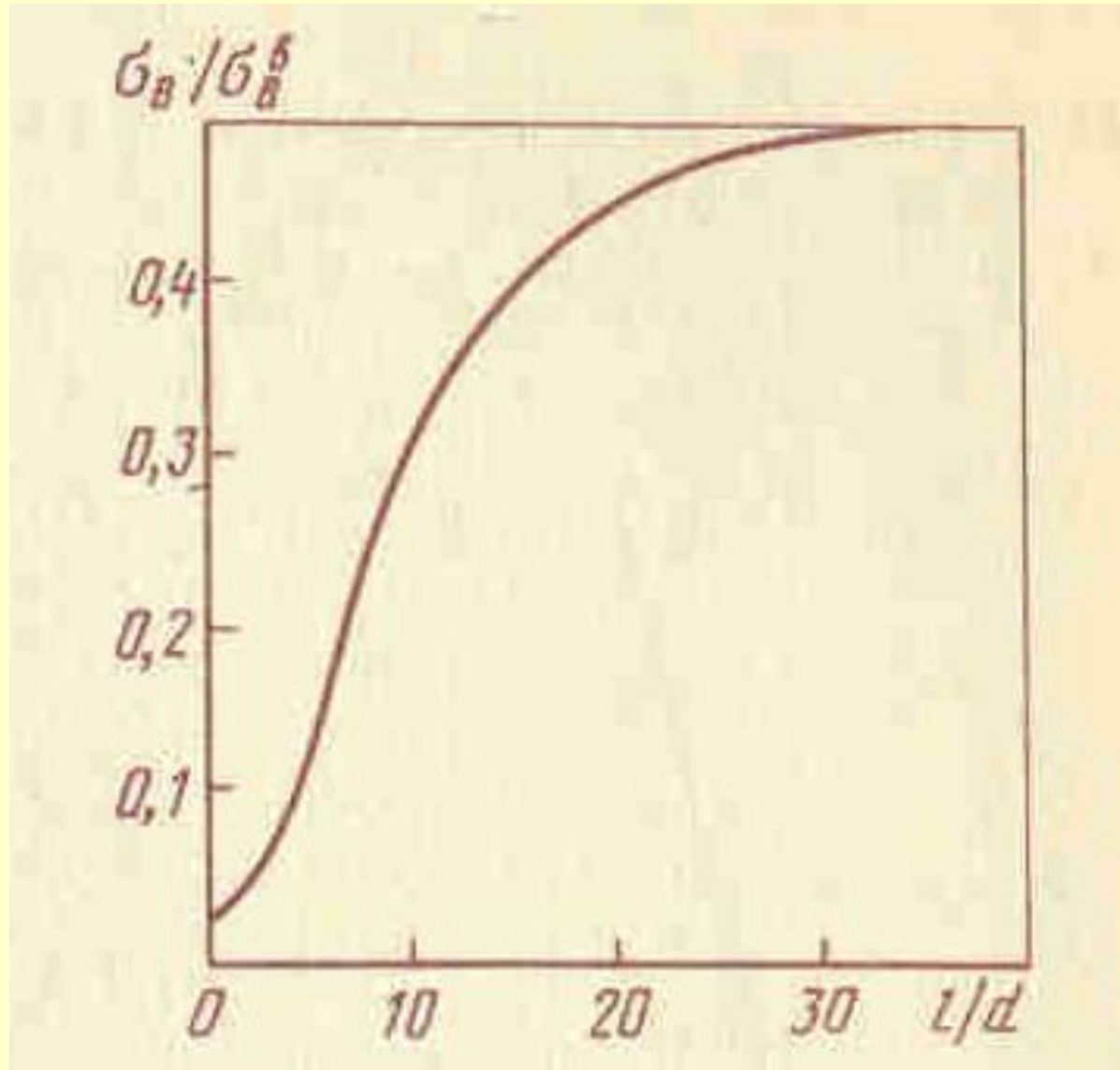
Механические свойства САП

Материал	Содержание Al_2O_3 , %	σ_B , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	E , ГПа	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$, 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

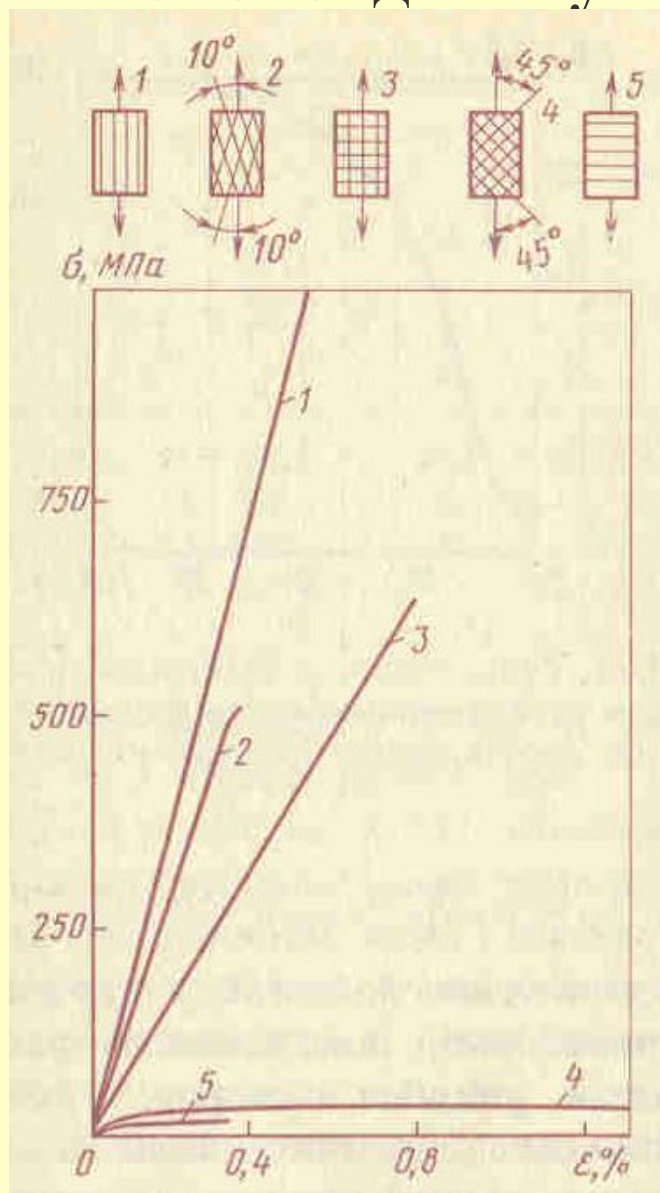
Волокнистые композиционные материалы

Упрочнителями служат волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (*B, C, Al₂O₃, SiC* и др.), а также проволока из металлов и сплавов (*Mo, W, Be*, высокопрочная сталь и др.)

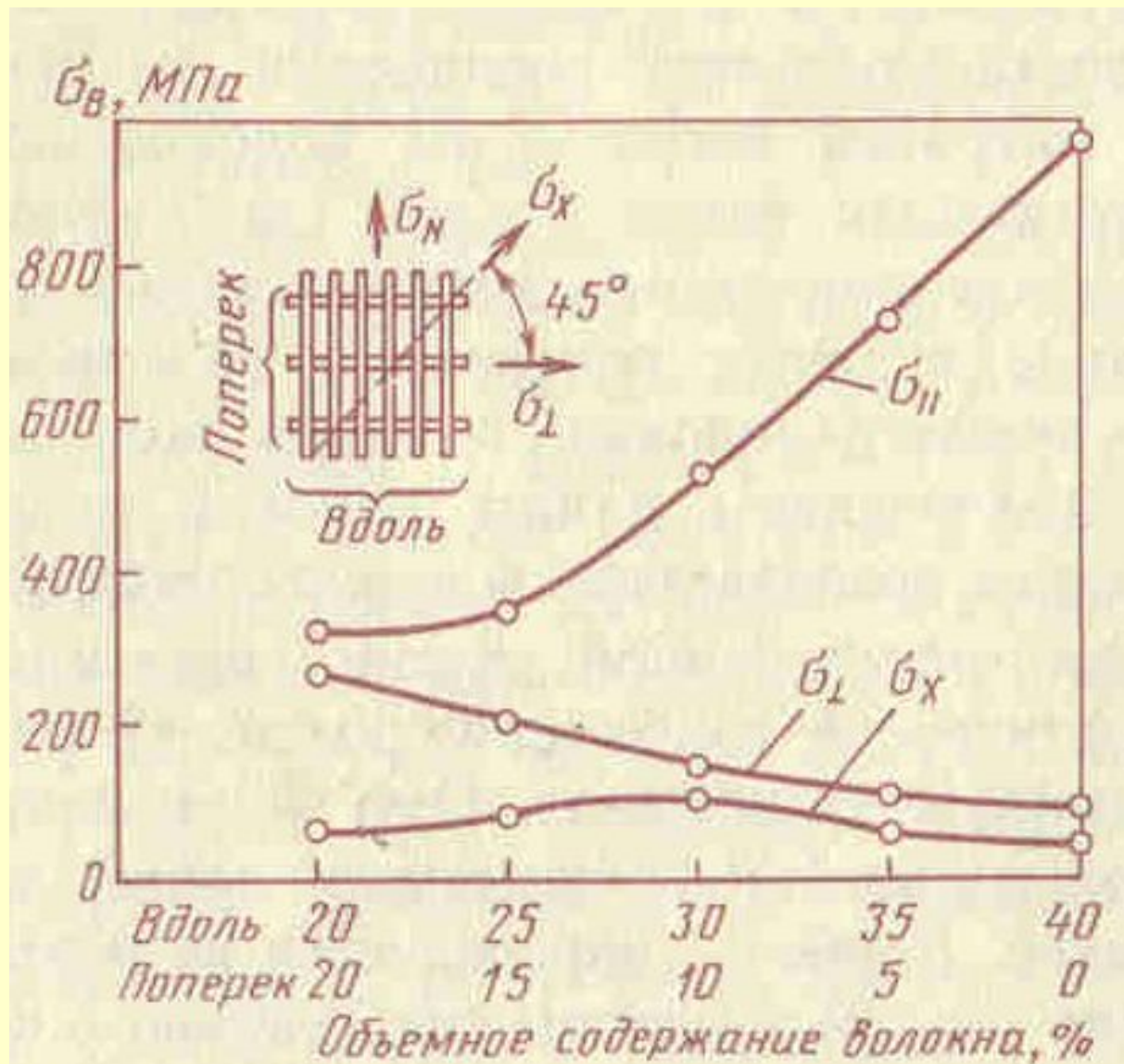
Теоретическая зависимость эффективности упрочнения композиционного материала от соотношения l/d упрочнителя



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		ρ , т/м ³	$\sigma_{в}/(\rho g)$, км	E, ГПа	$E/(\rho g) \times 10^{-3}$, км	$\sigma_{в}$, МПа (20 °С)	σ_{-1} , МПа (на базе 10 ⁷ 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

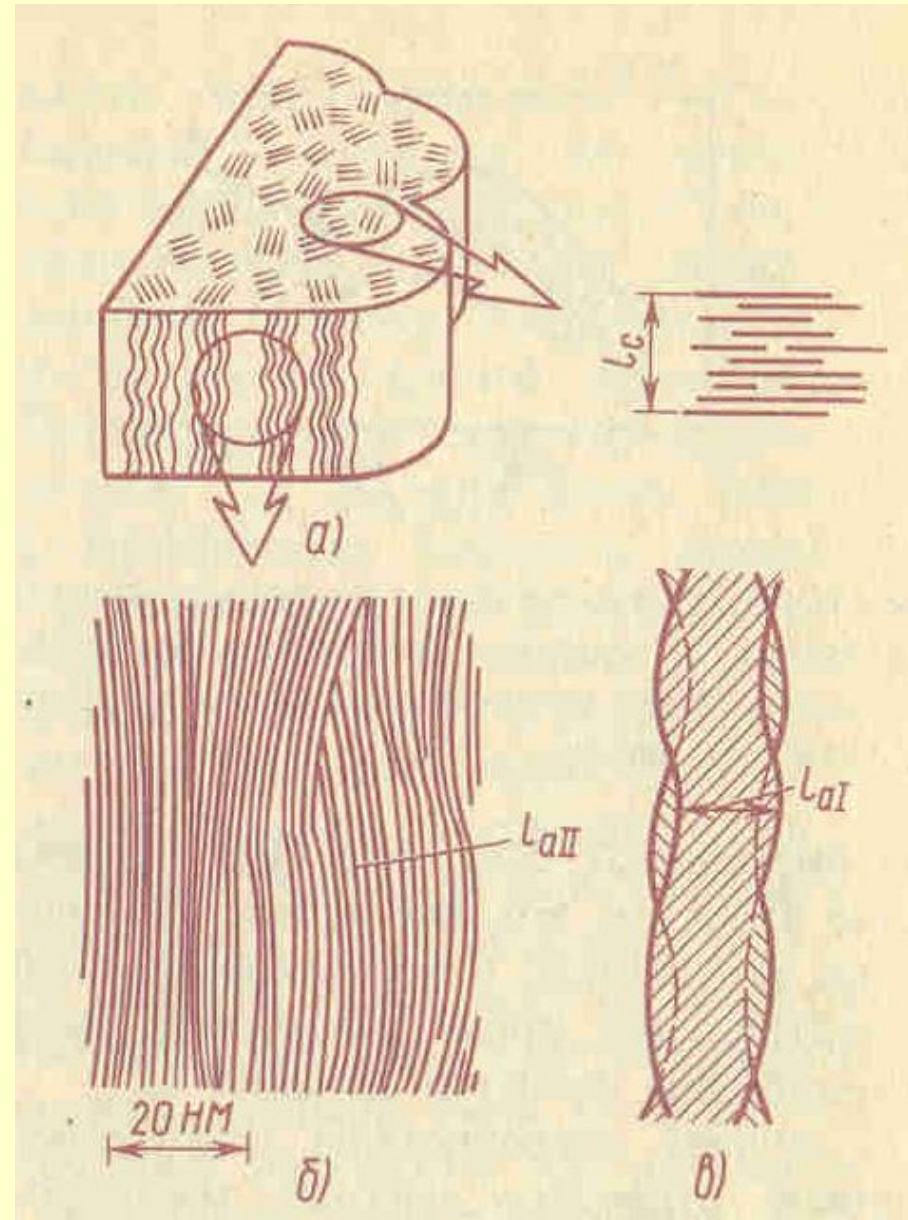
Материал	Температура плавления или размягчения, °С	ρ , т/м ³	σ_B , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	E , ГПа	Средний диаметр волокна, мкм
Волокна						
Углерод или графит	3650	1,6–2	1687–3374	110–210	216–677	5,8–7,6
Бор на вольфрамовой проволоке	2300	2,63	2707–4060	110–160	373–402	102–142
Борсик на вольфрамовой 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 ₂ O 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 (18X15H5AM3)	—	7,8	3800	48	200	150
Нитевидные монокристаллы						
Сапфир, Al ₂ O 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	Полиметиленафенольная матрица		
		Без добавок	Ионы Ba (15%)	Ионы Ni (7,6%)
Модуль упругости при изгибе, МПа	—	2060 *	2580 *	3100 *
	Стекловолокнит	44 500	45 000	45 600
Разрушающее напряжение, при изгибе, МПа	Углевлокнит	106 000	107 000	108 000
	—	81 *	87 *	90 *
Адгезионная прочность сцепления полиметиленафенольной матрицы со стекловолокном, МПа	Стекловолокнит	89	1260	1330
	Углевлокнит	87	1370	1520
	Стекловолокнит	1580	2160	2280

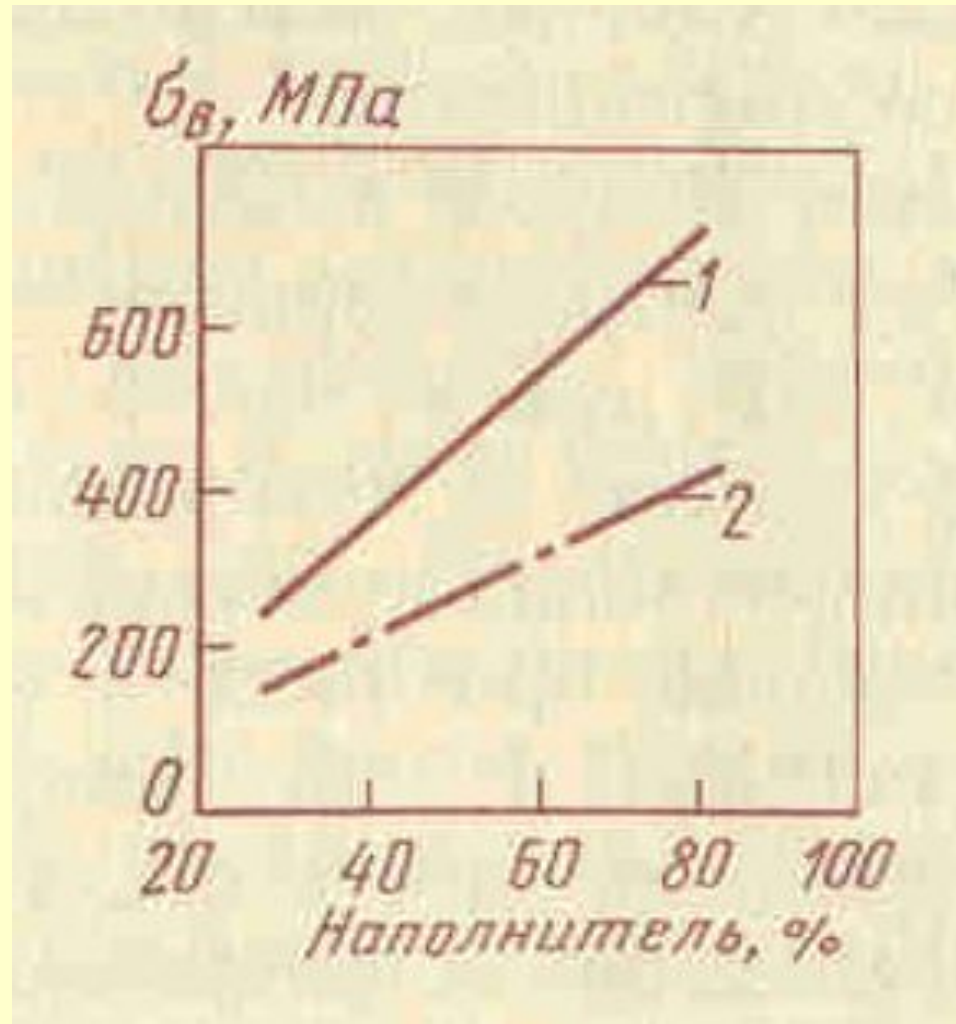
* Свойства матрицы.

Свойства одноосно-армированных композиционных материалов с полимерной матрицей

Материал	ρ , т/м ³	σ_B , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	δ , %	E , ГПа	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$, км	σ_{-1}^* , 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 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	—

* σ_{-1} определен на базе 10^7 циклов.

Зависимость прочности стекловолоконитов от содержания и вида наполнителя



1-непрерывное ориентированное волокно

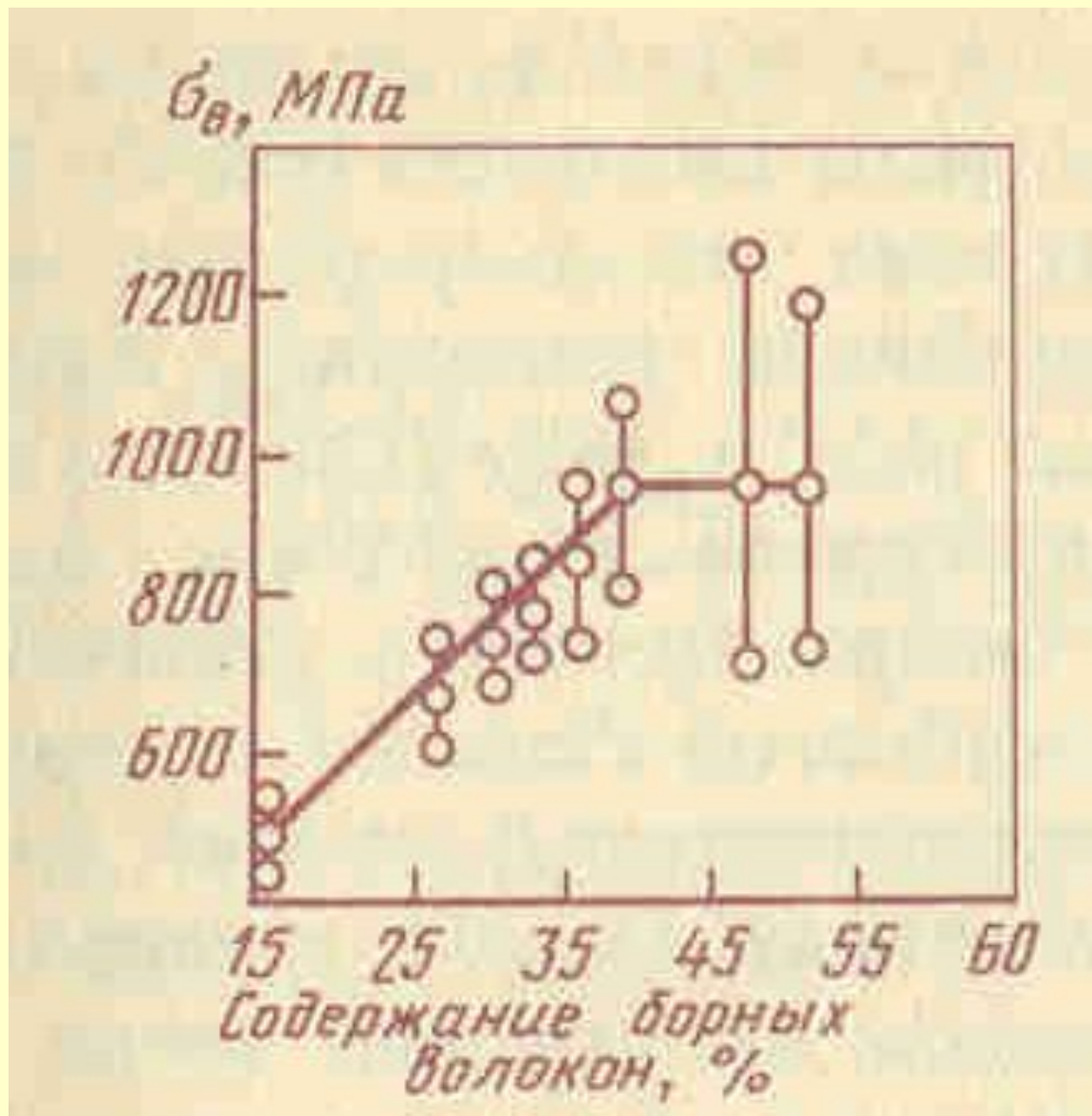
2-короткое неориентированное волокно

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

Направление нагружения	σ_B , МПа		E , ГПа	
	без т. о.	т. о.	без 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 доля, %	$\sigma_{в*}$ МПа	ρ , Т/м ³	$\sigma_{в*}$ МПа	$\sigma_{в}/(\rho g)$, км	E , ГПа	$E/(\rho g) \cdot 10^{-3}$, 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.