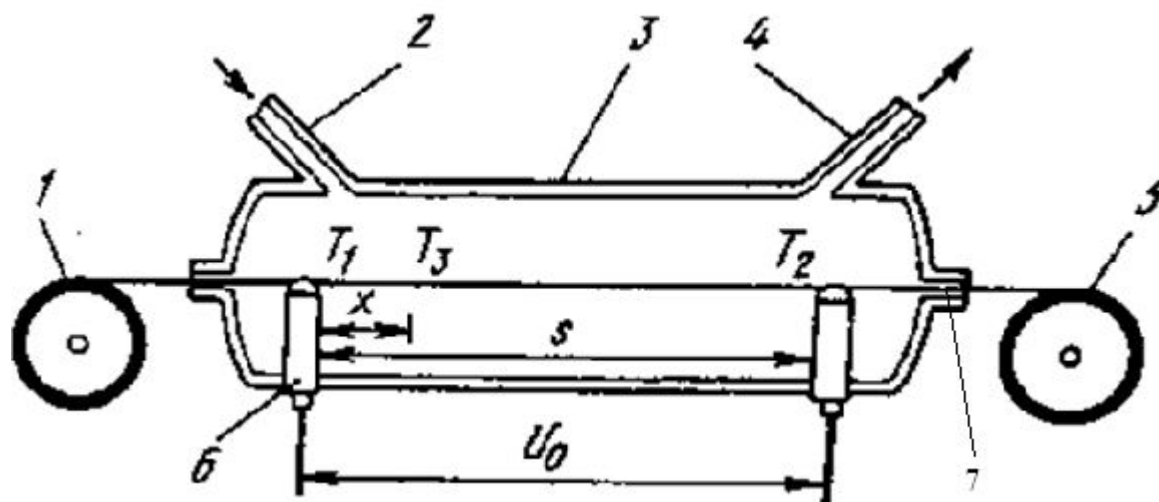


# БОРНЫЕ ВОЛОКНА

Изделие	Двигатель или узел (фирма) <i>Выпускаются</i>	Композит
F-14	Горизонтальные стабилизаторы	Эпоксидоропластики
F-15	Хвостовое оперение, пол, стабилизатор	Эпоксидоропластики
Вертолёт «Утас»	Усиливающая балка	Эпоксидоропластики
F-11	Крепление крыльев	Эпоксидоропластики
«Мираж 2000»	Рули	Эпоксидорографит
«Шаттл»	Фюзеляж	Боралюминевые трубы
Удилища для рыбной ловли	«Браунинг», «Шейкстиар», «Родон»	
Теннисные ракетки	«Сполдинг», «Дьюра-файбер», «Браунинг»	
Клюшки для гольфа	«Алдилла»	
F-14	Крылья и обтекатели	Борные и др. волокна с эпоксидным связующим
A-7	Консоль крыла	Борографит и эпоксидное связующее
C-130	Кессон крыла	Эпоксидоропластик, усиленный алюминием
P-4	Рули	Эпоксидоропластик
«Боинг»	Предкрылок	Эпоксидоропластик
P-100	Лопастей вентилятора	Бороалюминевый КМ
C-5A	Предкрылок	Эпоксидоропластик
CR-54	Стрингеры фюзеляжа, хвостовой костыль	Эпоксидоропластик
«АквоЯ210»	Трубы велосипедной рамы	Бороалюминевый КМ



$$(T_1 > T_3 > T_2),$$

$$T_1 = 1350\text{C}$$

100, 140, 200 мм.  $D=10\text{мм}$ ,  $S = 200\text{мм.}$ ,  $d=12,5\text{мм}$ .

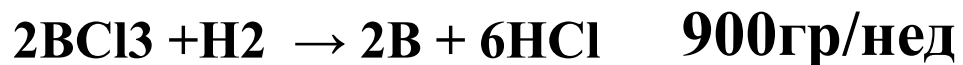
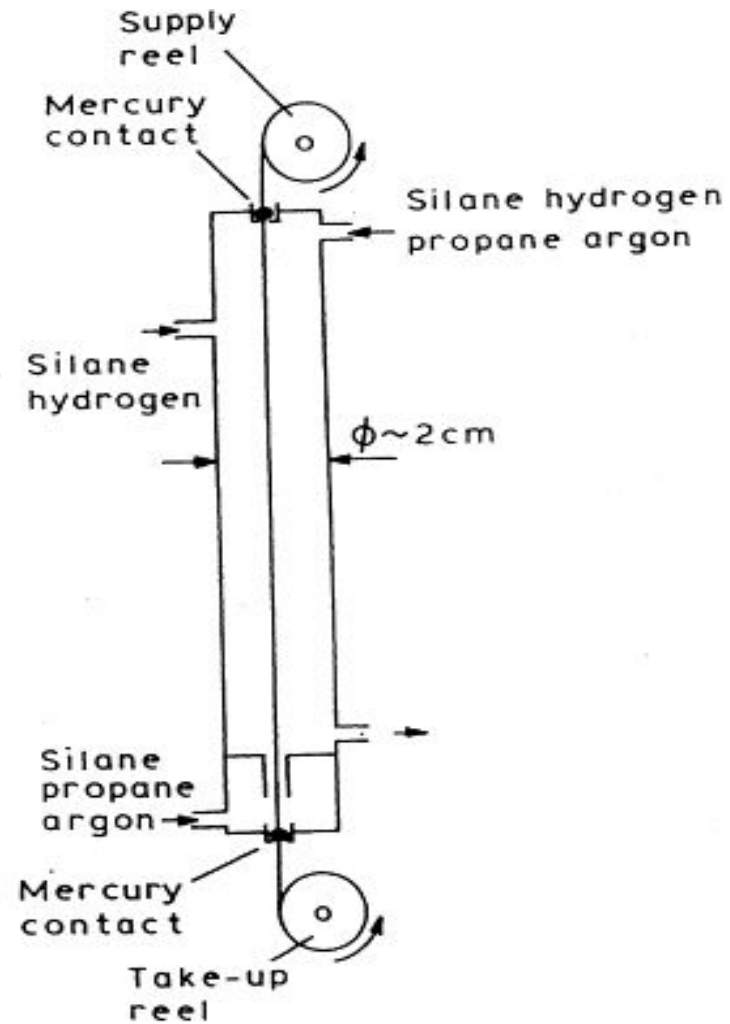
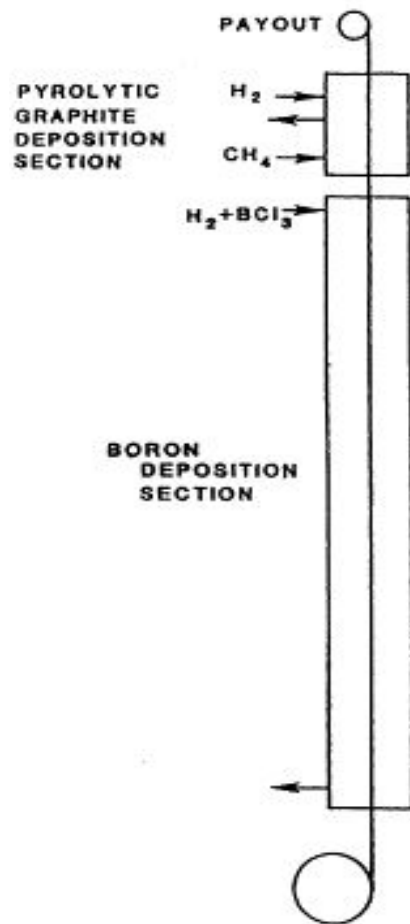
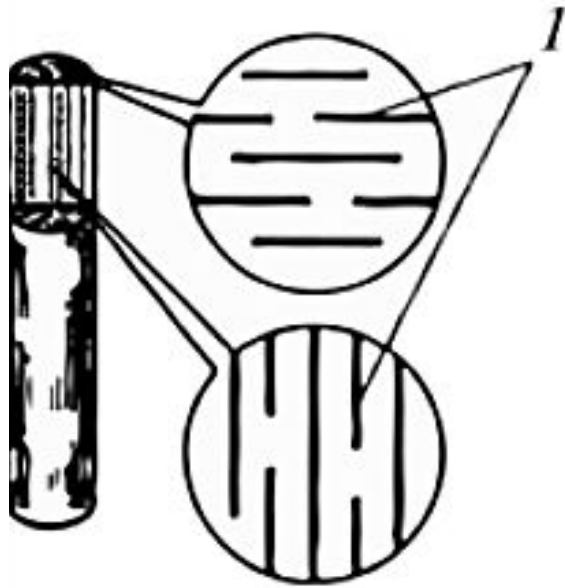


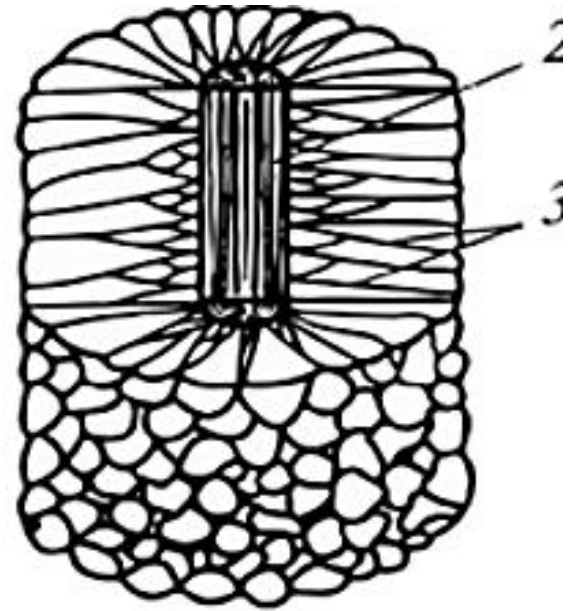
Схема реактора для получения борвольфрамовых волокон.  
 1-подающий барабан; 2-газовая смесь; 3-осадительная камера; 4-удаление газов; 5-приёмный барабан; 6-электрод; 7-ртутный затвор.



# СТРУКТУРА

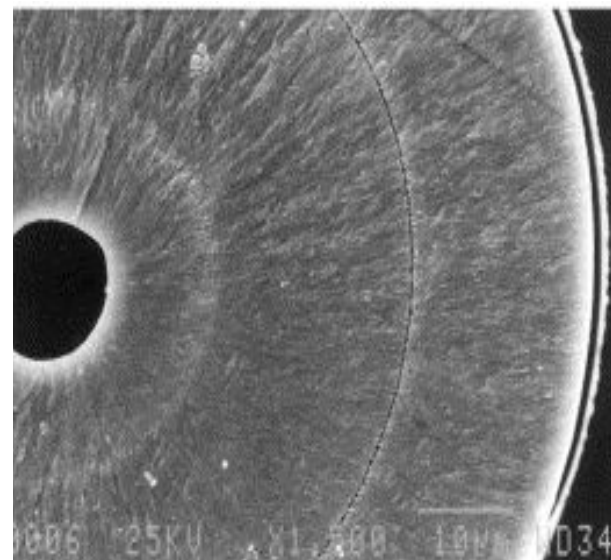
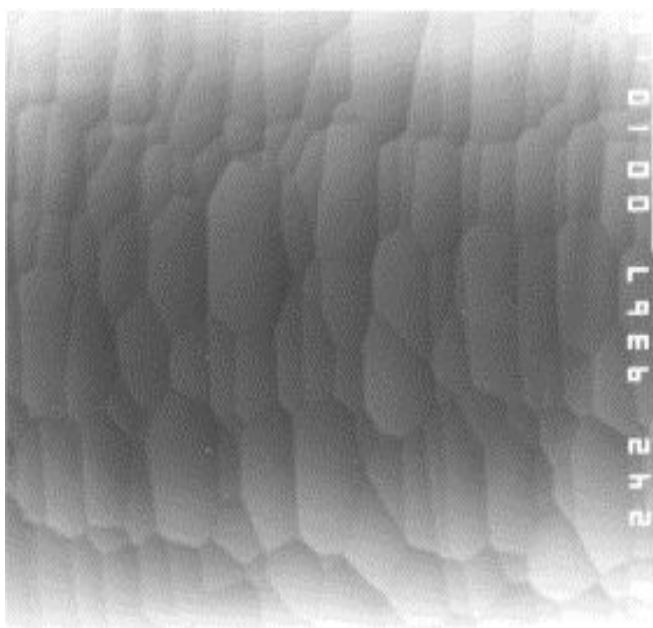


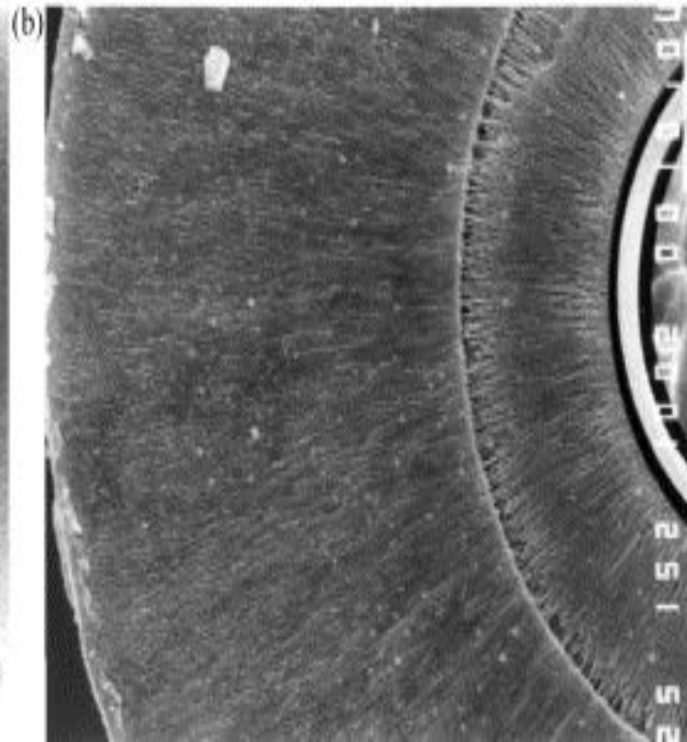
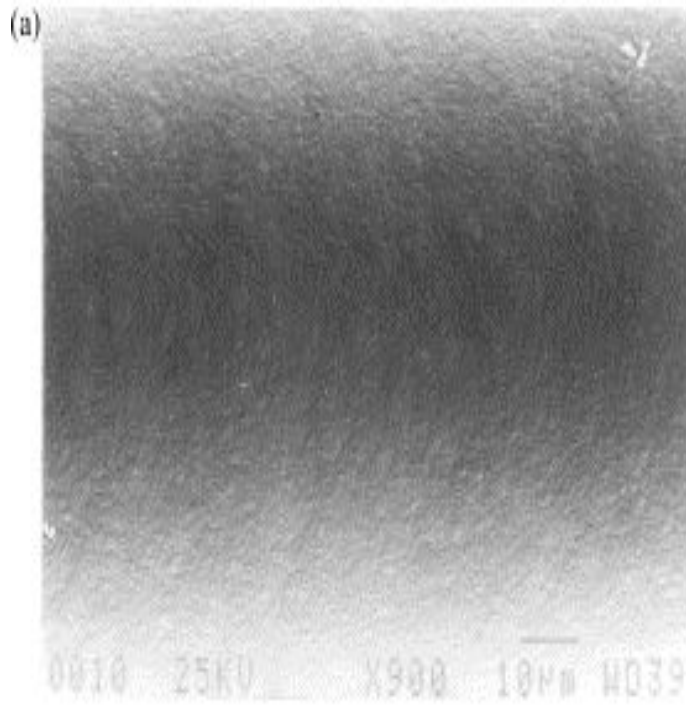
*a*



*б*

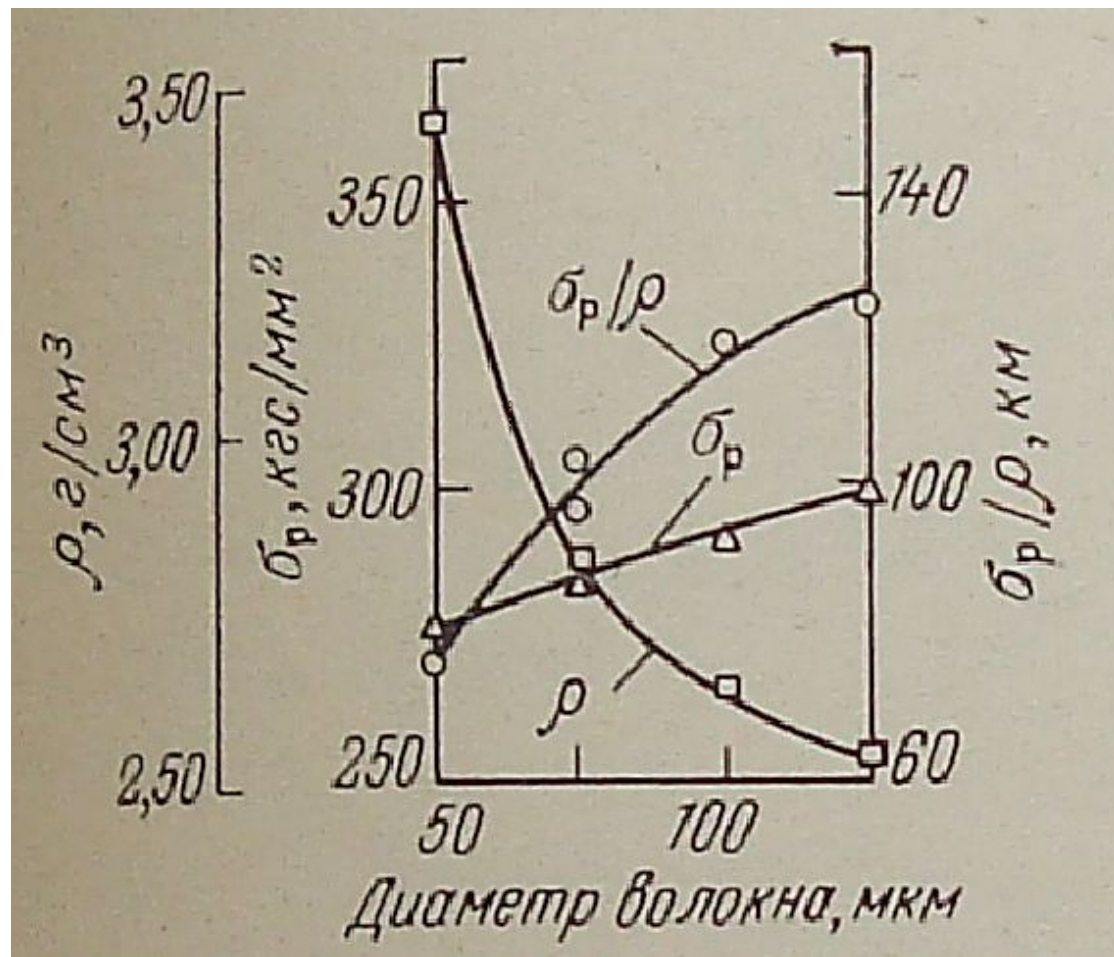
# СТРУКТУРА БОРНОГО ВОЛОКНА



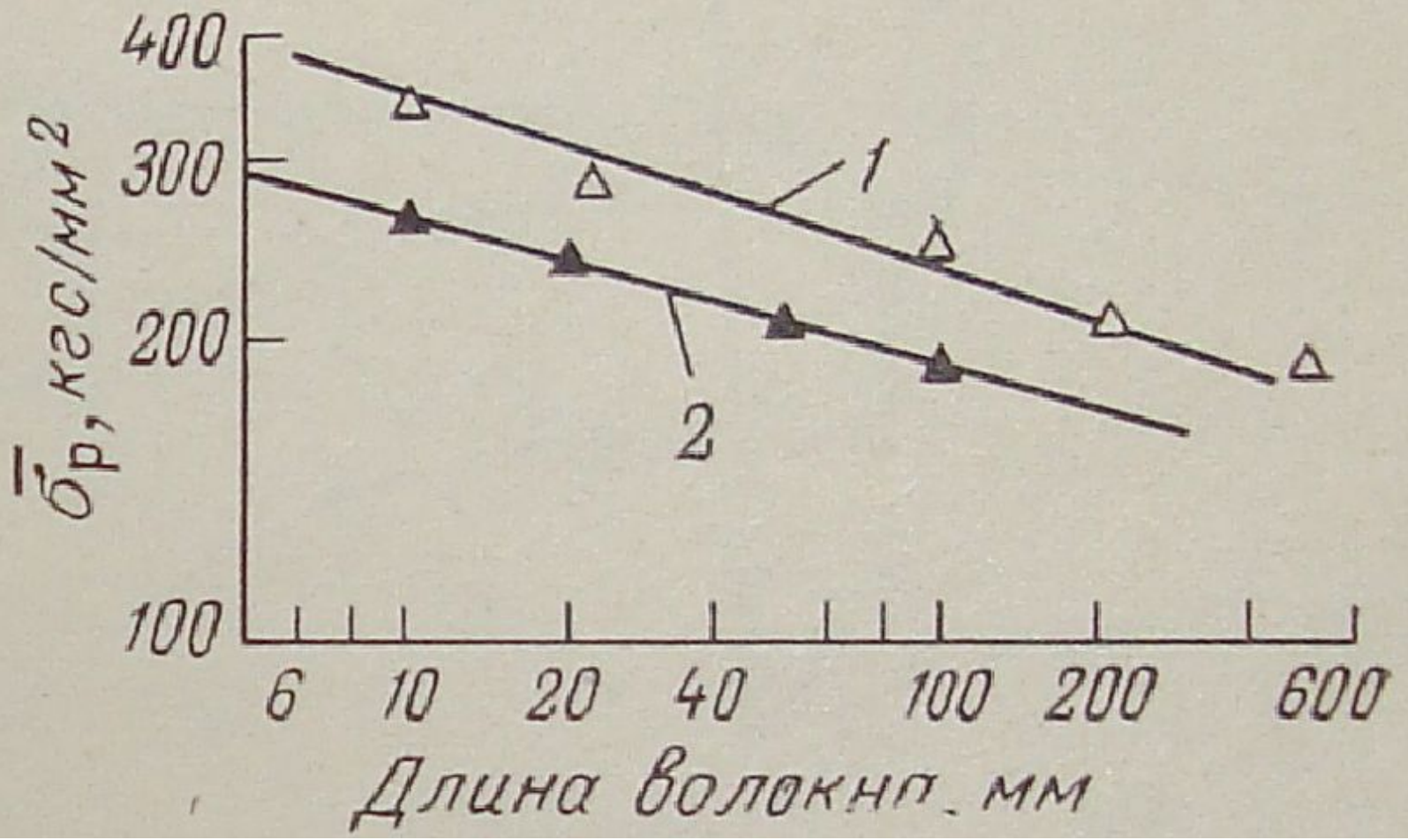


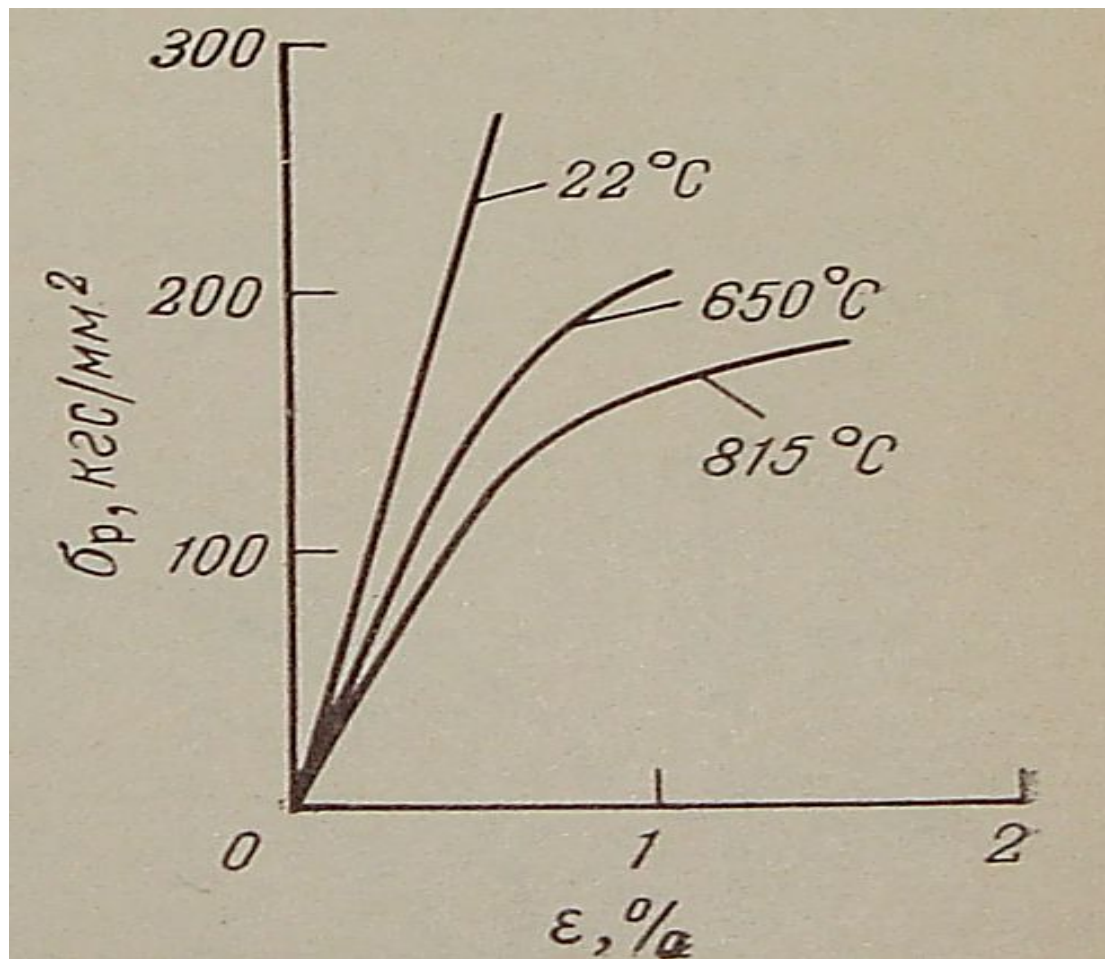
В- 2,2; W-19,3 Г/см<sup>3</sup>

	2,5
Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	
Разрушающее напряжение, кгс/мм <sup>2</sup>	
при растяжении . . . . .	2500-3800
при изгибе . . . . .	6000-6500
Модуль упругости, Гпа	
при растяжении . . . . .	385-430
при сдвиге . . . . .	160-180
Относительное удлинение при разрыве, % . . . . .	0,6-1,0
Коэффициент Пуассона . . . . .	0,2-0,25
Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup> . . . . .	40·10 <sup>2</sup> -43·10 <sup>2</sup>
Предел выносливости на базе 10 <sup>7</sup> циклов . . . . .	(0,6-0,7) σ <sub>p</sub>
Длительная прочность (в течение 1000 ч) . . . . .	(0,8-0,9) σ <sub>p</sub>
Коэффициент термического линейного расширения, 1/°С . . . . .	2,4·10 <sup>-6</sup> -2,6·10 <sup>-6</sup>









# МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРНЫХ ВОЛОКОН

Страна, марка волокна	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр $d$ , мкм	Модуль упругости $E_1^+$ , ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм $\sigma_1^+$ , ГПа	Предельная деформация $\epsilon$ , %
США Avco (B/W)	2,5	98	390-400	3,39	0,85
Япония Toshiba (B/W)	2,5	97,2	363-386	3,74	1,0
	2,5	96,8	378-388	3,58	0,93
	2,5	99	374-393	3,23	0,84
Франция SMPE (B/W)	2,5	100±5	408	3,57	0,88
ФРГ Wacker-Chemie (B/W)	2,54	100±5	420	3,10	0,74
Россия (B/W)	2,5	95±3	394	2,95-3,5	0,75-0,9

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА (ПРОВОЛОКИ)

Для конструкционных композитов наиболее эффективными и экономичными (в некоторых случаях) являются металлические проволочные волокна. Так для композитов, предназначенных для работы при пониженных температурах, используют стальные и бериллиевые волокна, а при высоких температурах — вольфрамовые и молибденовые.

Проволочные волокна широко применяют для изготовления тонкой высокопрочной проволоки из коррозионно-стойких сталей с метастабильным в условиях холодной деформации аустенитом. Значительное упрочнение стальной проволоки достигается вследствие практически полного превращения аустенита в мартенсит, при оптимальных технологических режимах изготовления, в сочетании с наклепом при холодном деформировании. Дополнительное упрочнение возможно в результате отпуска проволоки.

Понижение прочности стальных проволок происходит в результате выдержки при температурах 650...670 К. Исключение составляет проволока из стали ВНС-9, сохраняющая свою прочность до температуры 780 К.

Для эксплуатации композитов при высоких температурах наиболее приемлемыми считают вольфрамовые волокна. Высокотемпературную прочность вольфрамовых волокон повышают за счет введения в вольфрам и его сплавы тугоплавких дисперсных частиц (карбидных и др.).

Увеличение длительной прочности обеспечивается нанесением тонких (до 12 мкм) барьерных покрытий, причем наиболее эффективным является покрытие из карбида гафния HfC, которое позволяет избежать рекристаллизации вольфрамовых волокон при температуре 1400 К в течение 1000 часов.

По сравнению с вольфрамовыми, молибденовые волокна незначительно уступают по прочностным и упругим характеристикам, а также по жаростойкости. Некоторые механические характеристики молибденовых и других типов металлических волокон приведены в табл.

Материал	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	Диаметр $d,$ мкм	Модуль упругости $E_1,$ ГПа	Средняя прочность $\sigma'_1,$ ГПа
Алюминий	2,7	-	70	0,29
Бериллий	1,85	130	310	1,1
Титан	4,5	-	120	0,55
Кремний	2,5	-	72	1,0
Сталь ВНС-9	7,8	100-300	200	3,5-3,8
Молибден и ванадий (+5 %)	-	250	334	1,8-2,0
Вольфрам	19,3	50	410	3,3

# ВОЛОКНА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Поверхности волокон от окисления или активного химического объемного взаимодействия с поверхностью матрицы, от воздействия теплового потока при эксплуатации; повышение стягиваемости поверхности волокон при формовании композита; залечивание поверхностных микродефектов волокон; повышение стойкости волокон к истиранию и изгибу.

К основным технологическим способам нанесения на волокно различных металлических покрытий относятся: осаждение из газовой фазы, металлизация в паровой фазе, металлизация из расплава.

Для покрытия волокон используют такие металлы, как никель, железо, молибден, цирконий, алюминий, медь и др.

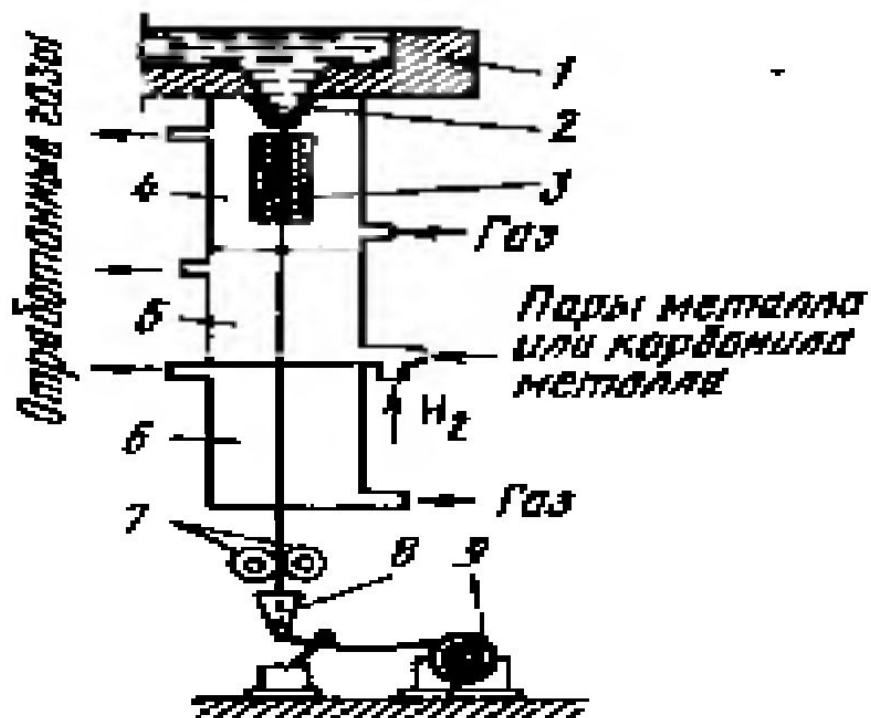


Схема установки для металлизации стекловолокна в паровой фазе:

1 – печь; 2 – прядильная головка; 3 – нагревательный элемент; 4 – газовая камера; 5 – камера с парами металла; 6 – камера восстановления газа; 7 – натяжные ролики; 8 – направляющее устройство; 9 – приемное устройство



# КОРОТКИЕ АРМИРУЮЩИЕ ВОЛОКНА

В промышленности используют разнообразные виды коротковолокнистой арматуры в качестве наполнителей для различных типов пластмасс.

Измельченные минеральные волокна получают при механической переработке минеральной ваты, в состав которой входят силикатный кальций (75 %) и легкие металлы (25 %), до образования легкосыпучего порошка, состоящего из коротких волокон средней длиной до 270 мм и диаметром от 1 до 10 мкм (табл. 1.8).

Волокна	Отношение длины волокон к их диаметру $l/d$	Диаметр $d$ , мкм	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Средняя прочность $\sigma_1^+$ , ГПа	Модуль упругости $E_1$ , ГПа
Измельченные минеральные Франклин	30-300	1-10	-	1,4	103
Файбекс	40	0,1-0,15	3,2	6,9	276

Волокна франклин получают в результате кристаллизации сульфата кальция в водной среде при повышенных давлении и температуре. Эти волокна представляют собой белый блес-

Волокна франклин получают в результате кристаллизации сульфата кальция в водной среде при повышенных давлении и температуре. Эти волокна представляют собой белый блес-  
Волокна файбекс представляют собой монокристаллы неорганического титаната, которые получают перекристаллизацией солей из расплавов. Эти волокна имеют повышенные прочность и модуль упругости, их используют в качестве усиливающего наполнителя пластмасс.

# НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ(УСЫ)

Нитевидные кристаллы (усы) – монокристаллические во-  
локна, выращенные в специальных условиях. В настоящее  
время имеется более 100 типов усов из металлов, карбидов,  
оксидов металлов и других соединений. Усы имеют механичес-  
кую прочность, эквивалентную прочности связи между атома-  
ми, что обеспечивается бездефектностью структуры нитевид-  
ных монокристаллов.

Нитевидные кристаллы  
имеют диаметр от долей микрометра до нескольких микромет-  
ров и длину от долей миллиметра до нескольких сантиметров.  
Прочность усов заметно снижается с увеличением их диаметра

Кристалл	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	Температура плавления, К	Средняя прочность $\sigma_1, \text{ ГПа}$	Модуль упругости $E_1, \text{ ГПа}$
Оксид магния	3,6	3072	24,1	310,3
Графит	2,2	866	20,7	980
Нитрид алюминия	3,3	472	17,0	345
Оксид алюминия	3,9	2327	28,0	500
Нитрид кремния	3,2	2173	15,0	495

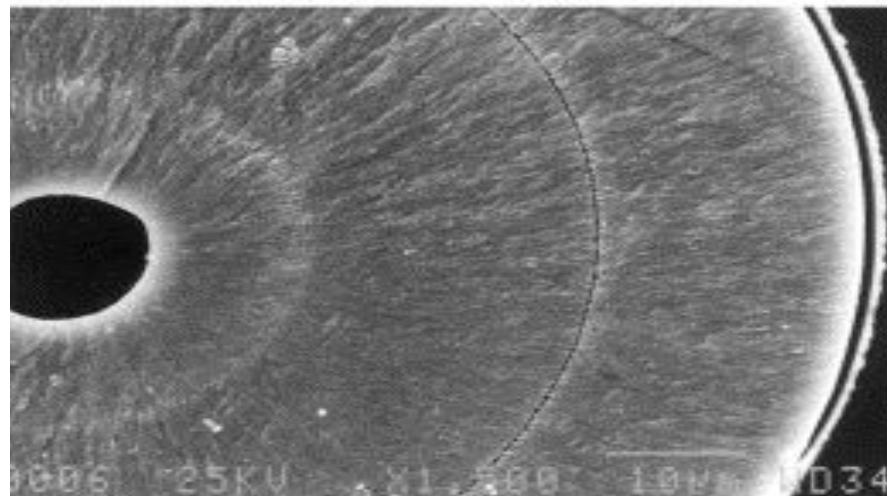
Усы обладают одновременно достоинствами стеклянных и борных волокон: их предельное удлинение как у стеклянного волокна (3...4 %), а модуль упругости — как у борного (более 500 ГПа). При этом разрушающее напряжение при растяжении усов в 5–10 раз больше, чем у стеклянных и борных волокон.

Обычно в расчетах используют безразмерную величину  $l_{кр}/d_e$ , а не абсолютное значение  $l_{кр}$ , поскольку первая не зависит от диаметра волокон. Расчет показывает (см. таблицу), что для армированных металлов  $l_{кр}/d_e = 10-250$ , а для пластиков  $l_{кр}/d_e \approx 350$ .

# КАРБИД КРЕМНИЯ

Карбидокремниевые волокна SiC выполняют как на вольфрамовой, так и на углеродной подложках. Благодаря своим физико-механическим свойствам волокна этого типа обычно применяют в металлокомпозитах для эксплуатации при длительном воздействии высоких температур.

Получение волокон из SiC во многом сходно с процессом получения борного волокна. Вместо  $BCl_3$  в реактор аналогичного устройства подают смесь алкилсиланов с водородом. В настоящее время SiC-волокна предпочитают изготавливать с использованием в качестве основы углеродного волокна, а не вольфрамовой проволоки.



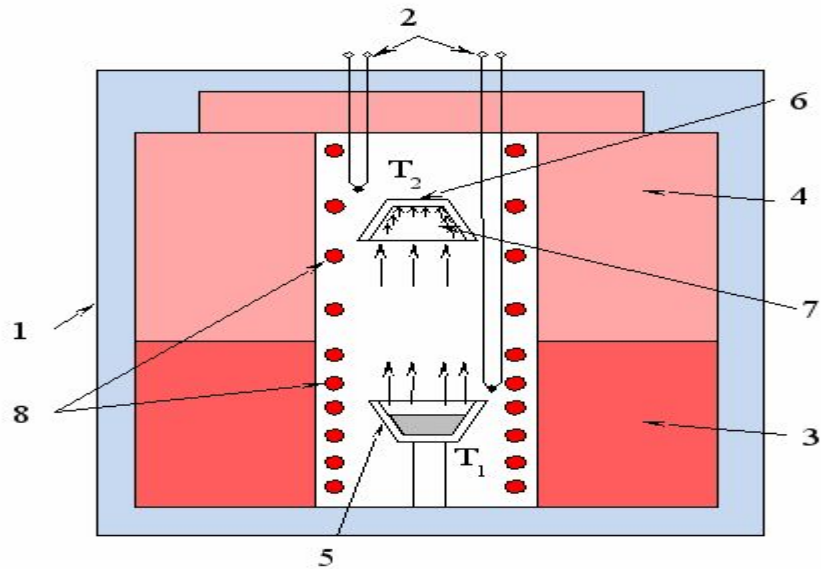
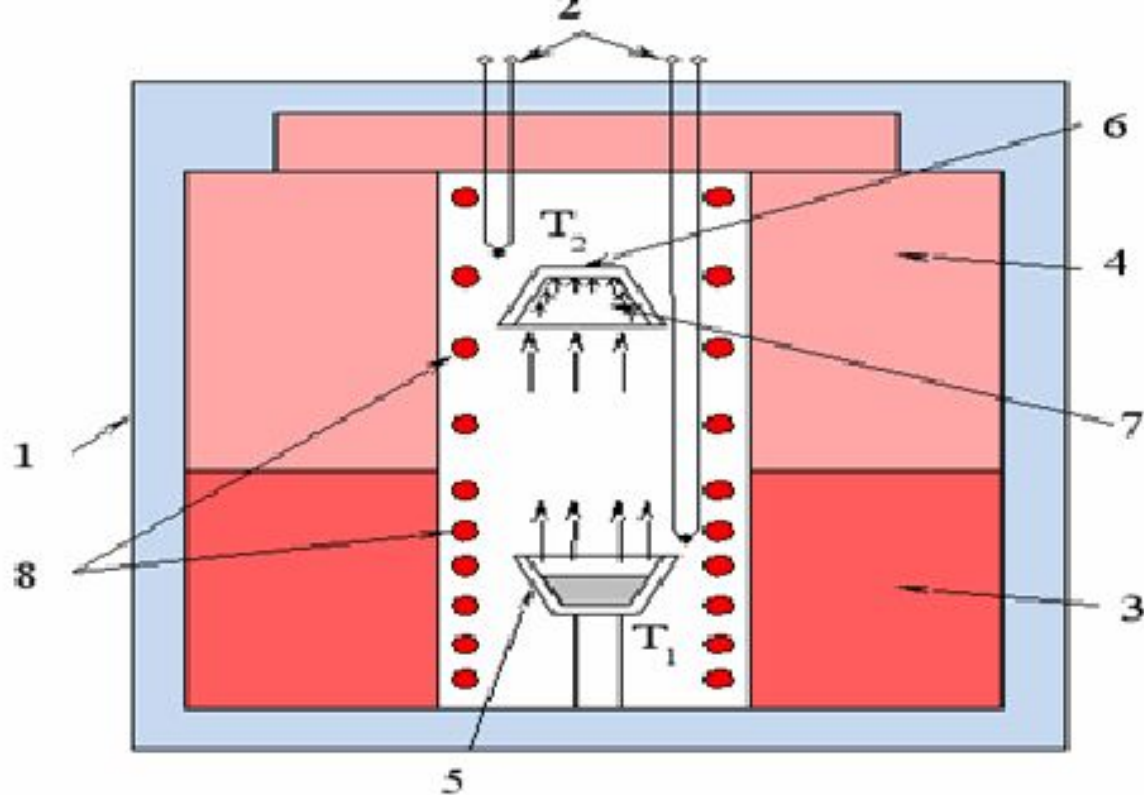


Рис. 6.10. Схематическое изображение процесса «выращивания» н.к. в градиентной печи.

1 – корпус печи, 2 – термопары, 3 – высокотемпературная зона в печи, ( $T_1$ ), 4 – низкотемпературная зона в печи ( $T_2 < T_1$ ), 5 – лодочка с испаряемым веществом, 6 – емкость-сборник н.к. (7), 8 – нагреватели.



**Схематическое изображение процесса «выращивания»**

**н.к. в градиентной печи.**

**1 – корпус печи, 2 – термопары, 3 – высокотемпературная зона в печи, ( $T_1$ ), 4 – низкотемпературная зона в печи ( $T_2 < T_1$ ), 5 – лодочка с испаряемым веществом, 6 – емкость-сборник н.к. (7), 8 – нагреватели.**