



*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования*

«Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана)

---

## Проектирование элементов колесных машин из композиционных материалов

# Лекция 3 «Полимерные композиционные материалы»

*Составил доцент кафедры «Колесные машины», к.т.н.*

**Карташов Александр Борисович**



# 3.1 Стеклопластики

Стеклопластики (СП) – материалы на основе полимерной матрицы, упроченной стеклянными армирующими наполнителями, главным образом стеклянными волокнами.

Отличительной особенностью СП является уникальное сочетание технически необходимых свойств:

- высокой прочности и демпфирующей способности,
- коррозионной и химической стойкости,
- радиопрозрачности и электроизоляционных свойств с немагнитностью,
- низкими теплопроводностью и плотностью.



# Стеклопластики (2)

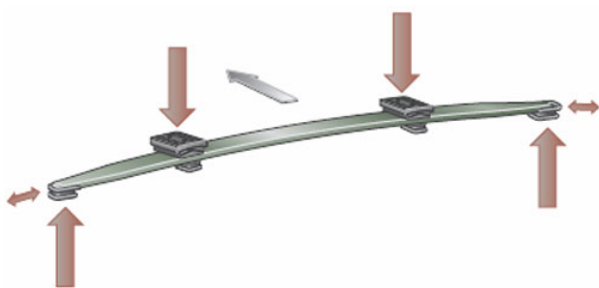
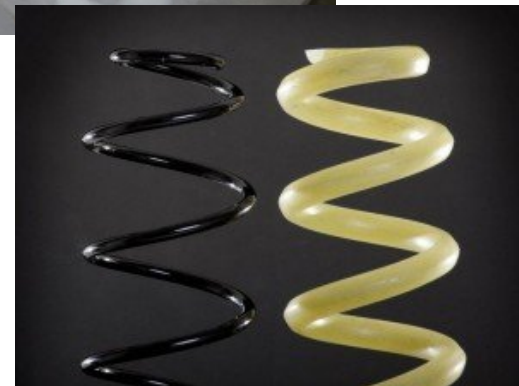
---

Свойства СП зависят от многих факторов:

- формы, размеров, расположения и состава арматуры, обработки его поверхности;
- типа и свойств полимерной матрицы (связующего);
- содержания армирующего наполнителя, матрицы, других составляющих компонентов и пор;
- метода и режимов изготовления;
- условий эксплуатации (окружающая среда, температура, условия нагружения).



# Изделия из стеклопластика

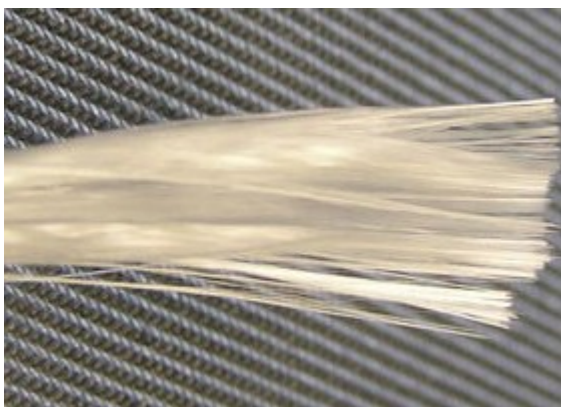
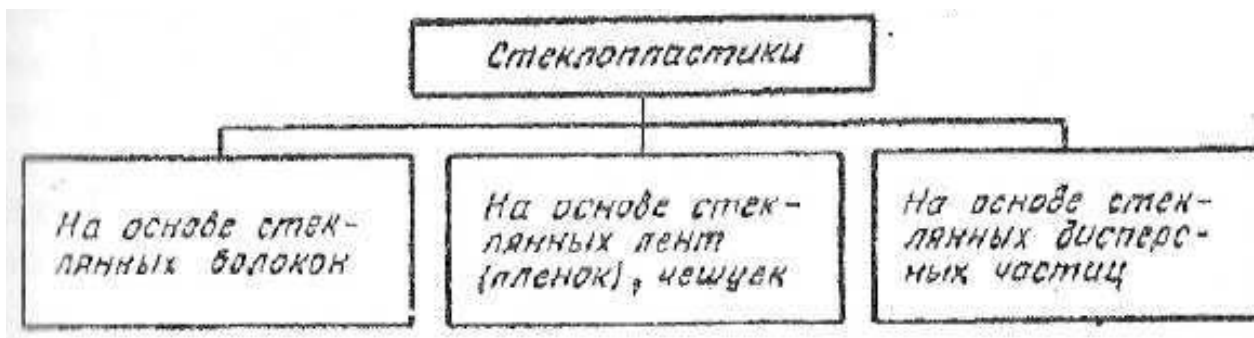


26.03.2019

kartashov@bmstu.ru



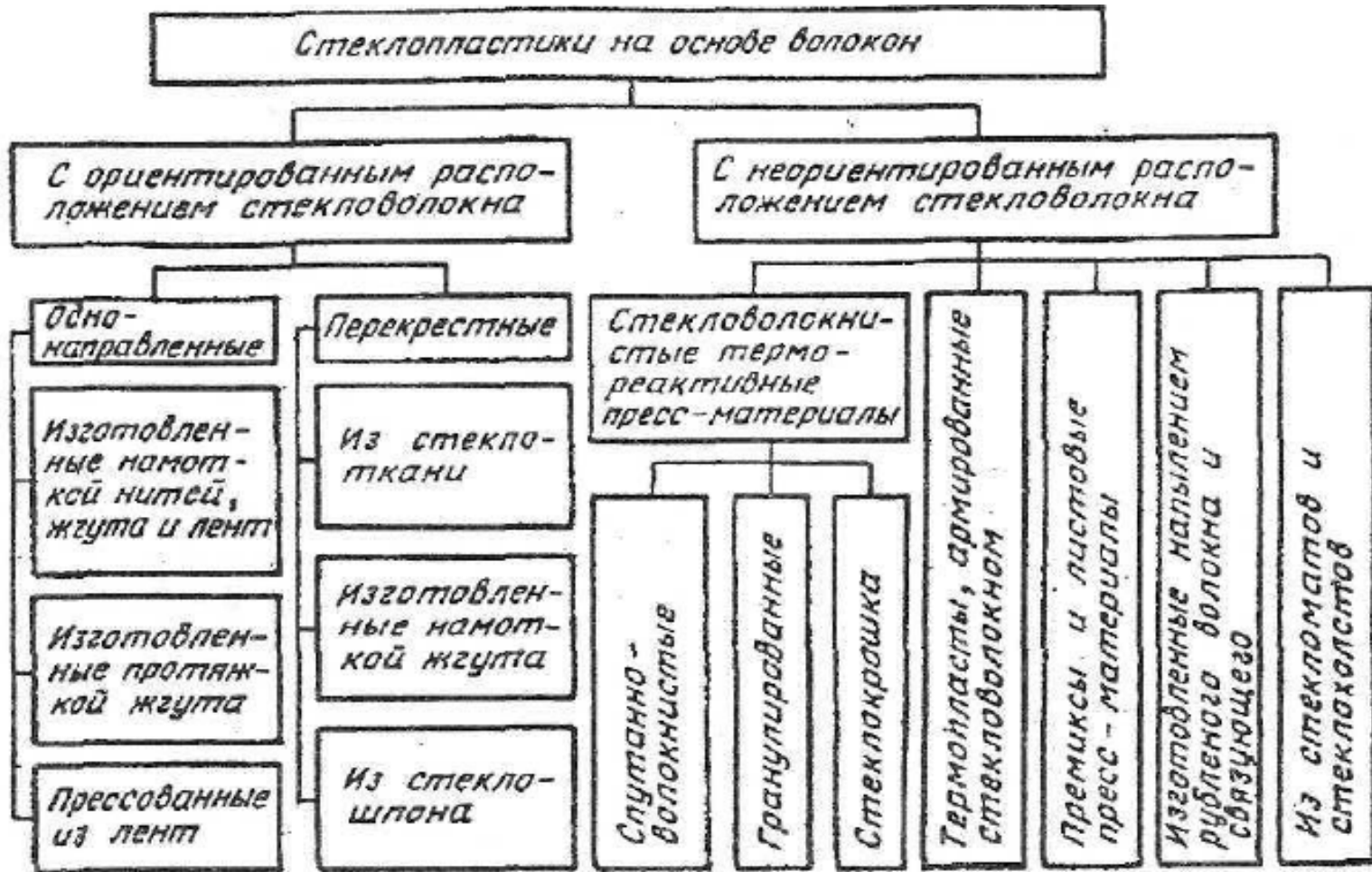
# Классификация СП по виду арматуры





# Классификация СП на основе волокон

Наибольшее применение в машиностроении получили СП на основе высокопрочных тонких (5...20 мкм) стеклянных волокон.





# Характеристика СП с ориентированным расположением волокон

## Достоинства СП с ориентированным расположением волокон:

- возможно максимально реализовать в материале прочность;
- возможно максимально реализовать в материале модуль упругости волокна;
- возможно получить СП с удельной прочностью (отношение прочности к плотности материала), большей, чем у самых высокопрочных сталей и цветных сплавов.

## Недостатки СП с ориентированным расположением волокон:

- возможность использования высокой прочности арматуры только вдоль волокна;
- меньшая технологичность процесса получения материала.



# Характеристика СП с применением пленок и чешуек

## Достоинства применения пленок и чешуек:

- позволяют реализовать в СП прочность и модуль упругости во всех направлениях в плоскости арматуры;
- позволяет создавать материалы и конструкции с меньшей газонепроницаемостью;
- более высокая технологичность процесса получения материала

## Недостатки применения пленок и чешуек:

- меньшая прочность по сравнению со СП с ориентированным расположением волокон, при условии его работы вдоль волокон;
- невозможно регулировать свойства материала в заданных направлениях.



# Характеристика СП с применением дисперсных наполнителей в виде полых стеклянных микросфер

## Достоинства СП:

- обладают одновременно высокой прочностью при сжатии и растяжении;
- высокие диэлектрические и электроизоляционные характеристики,
- высокие звуко-, вибро- и теплоизолирующие свойства;
- позволяют создавать материалы с высокими электроизоляционными характеристиками для приборной техники.

## Недостатки:

- меньшая прочность;
- невозможно регулировать свойства материала в заданных направлениях.



# Виды матриц, применяемых для СП

## Термореактивные смолы

Термореактивные смолы наиболее широко применяются в производстве СП. Они имеют низкую вязкость в расплаве или растворе и позволяют более качественно пропитать стекловолоконные армирующие элементы, а в отвержденном состоянии обладают большей тепло- и термостойкостью.

## Термопластичные смолы

Высокомолекулярные термопласты (полиамиды, полипропилен, полистирол, полиэтилен, полиацетали, полисульфон и др.), применяемые в производстве СП, обладают высокой вязкостью и высокой температурой расплава, что существенно затрудняет пропитку армирующих стеклонаполнителей и получение композиций с высоким содержанием армирующего наполнителя.



# Способы получения изделий из СП

## Реактопластов

В настоящее время известны следующие методы изготовления изделий из терморезистивных волокнистых СП:

- намотки;
- послойной выкладки;
- напыления с последующим контактным, вакуумным (в эластичном мешке), автоклавным или прессовым формованием.

## Термопласты

Термопластичные СП выпускают преимущественно в виде гранул, перерабатываемых в изделия главным образом:

- литьем под давлением,
- экструзией,
- ротационным формованием.

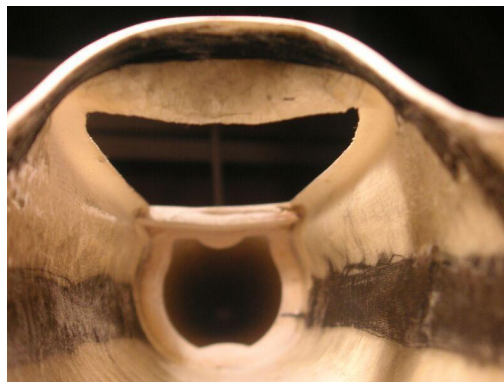
Армирующими наполнителями для термопластов обычно служат короткие (0,1..1,0 мм или 3..12 мм) волокна диаметром 9..19 мкм алюмоборосиликатного состава. Ведутся работы по армированию термопластов непрерывными армирующими стеклонаполнителями.



# Применение стеклопластиков

Использование различных сочетаний полимеров и стеклянных армирующих наполнителей позволяет в широком диапазоне направленно регулировать свойства материалов и делает СП высокоэффективным материалом практически во всех отраслях машиностроения, например:

- в авиакосмической технике – для изготовления радиопрозрачных обтекателей, несущих отсеков конструкций, лопастей вертолетов, секций крыльев и хвостового оперения, внутренних панелей и перегородок, воздухопроводов, топливных баков, фюзеляжей маломестных самолетов, спортивных планеров, брони для защиты команд вертолетов и наиболее уязвимых частей самолетов и т. д.;





# Применение стеклопластиков (2)

- в транспортном машиностроении – для изготовления обтекателей для мотоциклов, кузовов легковых, грузовых автомобилей и тракторов, корпусов и рефрижераторов, цистерн, элементов вагонов (крыши, сиденья, рамы, перегородки);

- в станкостроении – для изготовления силовых деталей и конструкций, инструмента и оснастки (кондукторы для сверления, отделочные шаблоны, пресс-формы и оснастка для изготовления деталей из стеклопластика, углепластика и других ПКМ, предохранительные кожухи для станков);

- в судостроении – для изготовления лодок, катеров, спасательных шлюпок, мелких и средних речных и морских судов;



# Применение стеклопластиков (3)



26.03.2019

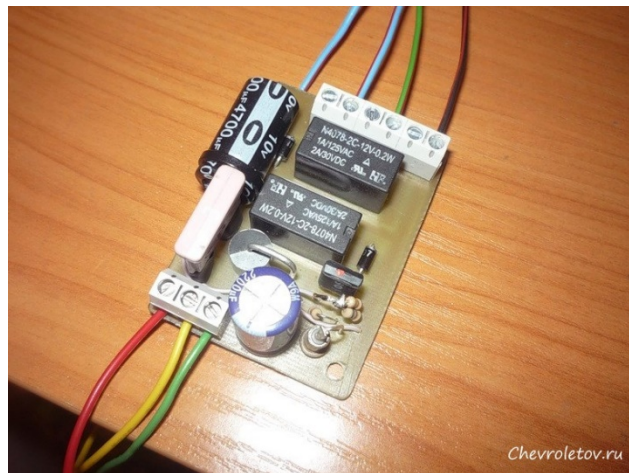
[kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)



# Применение стеклопластиков (4)

- в электротехнике и вычислительной технике - для изготовления корпусов, электроизоляции, плат;

- в электромашиностроении – для изготовления распорных клиньев, опорных и бандажных колец, кронштейнов и стяжных шпилек крепления обмотки статора турбогенераторов мощностью до 800 МВт и более.





# Общие преимущества применения СП

---

Применение СП взамен традиционных конструкционных материалов (сталей и цветных металлов) позволяет:

- ❑ снизить массу конструкций на 15..40 %;
- ❑ трудоемкость изготовления в 1,3-3 раза;
- ❑ заменить дефицитные цветные сплавы, нержавеющие стали;
- ❑ повысить надежность и долговечность конструкций в агрессивных средах;
- ❑ обеспечить специальные свойства (радиопрозрачность, светопрозрачность, трудногорючесть и др.).



## 3.1.1 Стекланные волокна

Характеристики стекланных волокон

Диаметр стекланных волокон составляет  $5...20 \times 10^{-6}$  м;

Предел прочности – 2...6 ГПа;

Модуль упругости волокон – 50...130 ГПа;

Плотность – 2500...2600 кг/м<sup>3</sup>

*Основные недостатки* стекланных волокон – низкий модуль упругости и сравнительно низкая теплостойкость.

Предел прочности промышленных алюмоборосиликатных волокон при **понижении температуры до -196 °С** возрастает в 1,5-2 раза, а с повышением температуры снижается, причем наиболее интенсивно после температуры 300 °С.



# Удельные характеристики

В качестве характеристики волокон и вообще композиционных материалов часто используется удельная прочность [м]:

$$K_{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}}{\gamma},$$

где

$\sigma$  – предел прочности материала;

$\gamma$  – удельный вес материала (удельный вес определяется как отношение веса вещества  $P$  к занимаемому им объёму  $V$ ).

По аналогии с удельной прочностью вводится понятие удельного модуля упругости [м]:

$$K_E = \frac{\bar{E}}{\gamma}.$$



# Щелочное и бесщелочное стекло

Стекланные волокна



Бесщелочные стекла содержат не более 1...2% оксидов щелочных металлов и характеризуются очень высоким электрическим сопротивлением.

Бесщелочное стекло

Щелочное стекло



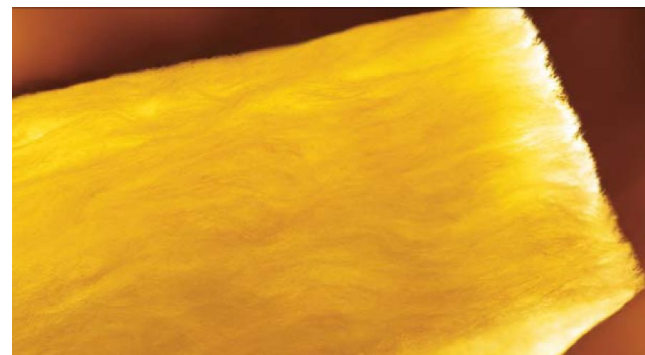
Щелочные стекла содержат 10...15 % оксидов щелочных металлов, их электрическое сопротивление намного меньше и с повышением температуры ещё больше снижается.



# Способ формирования волокон

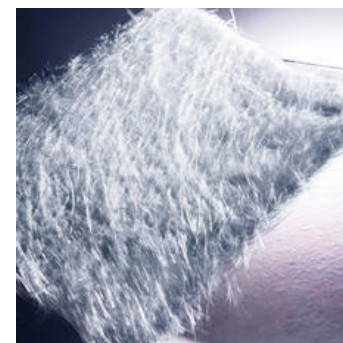
По способу формирования различают:

- непрерывные стеклянные волокна;
- штапельные стеклянные волокна.



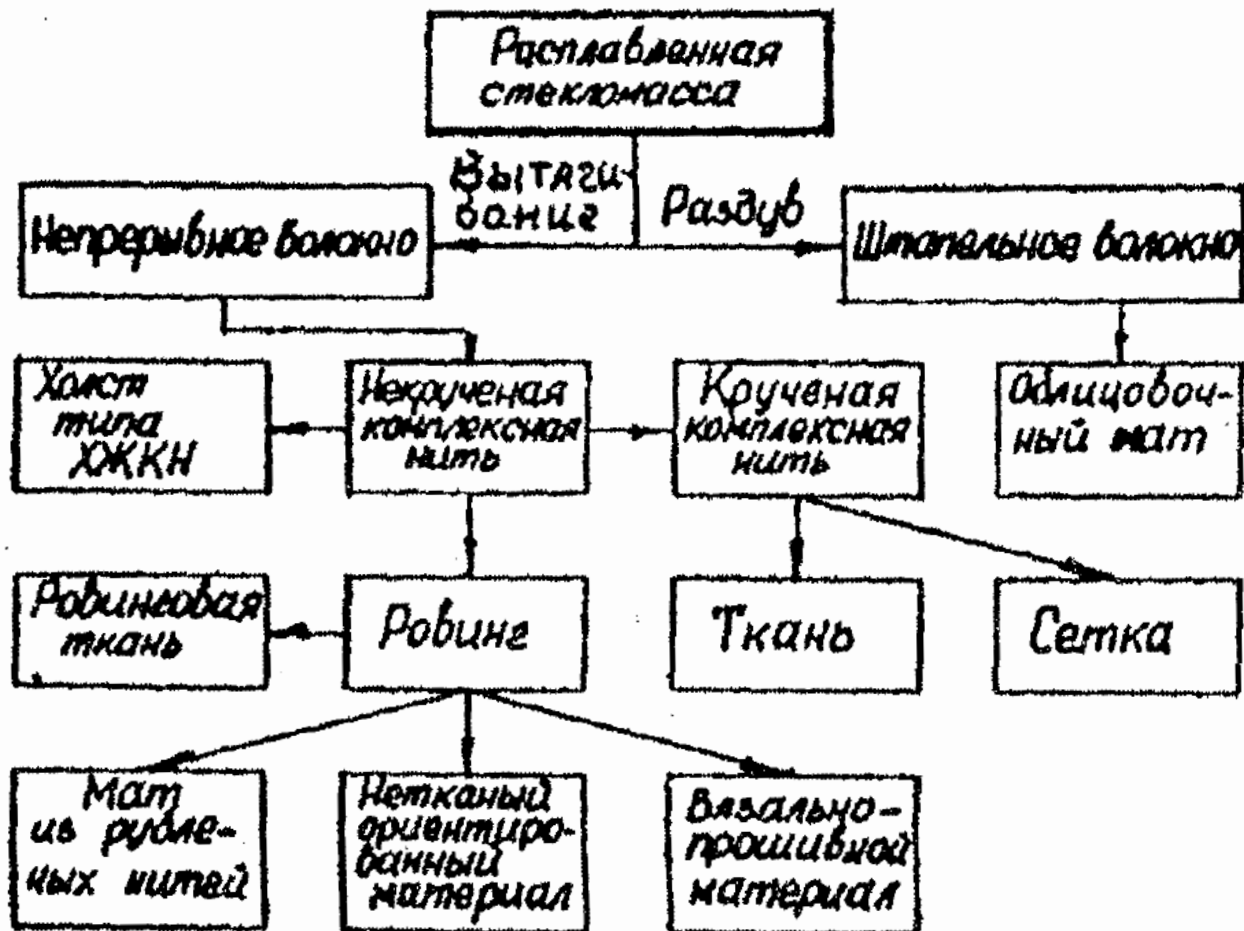
**Штапель** (от нем. *Stapel* — стопка, куча):

Штапельное волокно — элементарное текстильное волокно ограниченной длины, как правило не более 40—45 мм.





# Схема получения волокон





# Получение непрерывного стеклянного волокна

Непрерывное стеклянное волокно получают путем утонения струйки расплавленной стекломассы механическим вытягиванием.

Способы получения

*Одностадийные* способы выработки непрерывного стеклянного волокна.

*Двухстадийные* способы выработки непрерывного стеклянного волокна.



# Одностадийный способ

При *одностадийном* процессе расплавленная масса прямо из стекловаренной печи поступает в фильерный питатель (специальная пластина из тугоплавкого сплава) с множеством отверстий определенного диаметра. Стекланные нити вытягиваются из фильерного питателя, собираются в нитесборнике и либо наматываются на текстолитовую бабину, либо в виде восьмерки укладываются на конвейер, образуя стеклянный мат.

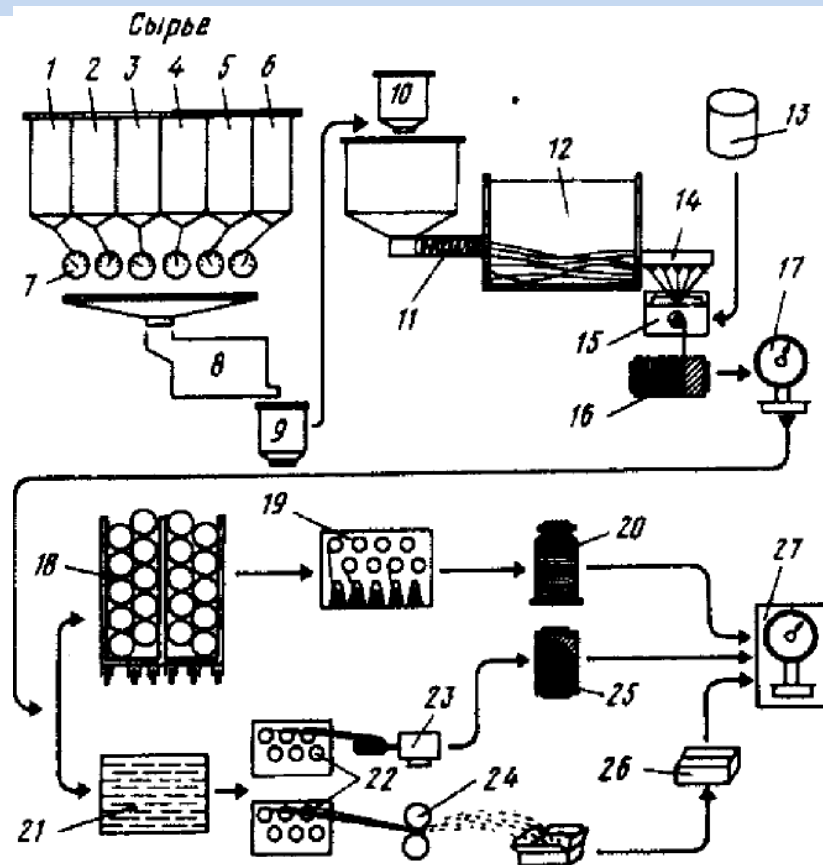
Схема одностадийного получения стекловолокна:

1 — глина; 2 — известняк; 3 — уголь; 4 — кварцевый песок; 5 — флюорит; 6 — борная кислота;

7 — автоматические дозаторы; 8 — смеситель; 9, 10 — бункера; 11 — шнековый питатель; 12 — ванна;

13 — секция приготовления замасливателя (шлихты); 14 — платиновые фильеры (бушинги) с электронагревом и автоматическим управлением; 15 — замасливатель; 16 — высокоскоростное намоточное устройство; 17, 27 — посты контроля и взвешивания;

18 — камера для кондиционирования волокна; 19 - крутильные машины; 20 — участок отделки и упаковки пряжи; 21 — участок термической обработки; 22 — шпулярники; 23 — намоточная машина для ровинга; 24 — резальная машина; 25 — ровинг; 26 — резаное волокно (штапель).

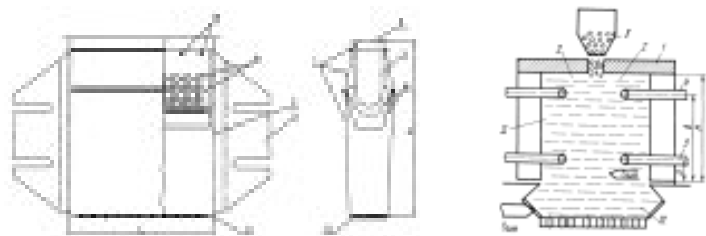




# Двухстадийные способы выработки непрерывного стеклянного волокна

При *двухстадийном* (менее производительном) процессе стеклянное волокно получают в фильерированных стеклоплавильных сосудах. Исходный материал – стеклянные шарики и специальные стеклянные стержни (штабики). В процессе вытягивания элементарные нити покрываются замасливателем и собираются в комплексную нить.

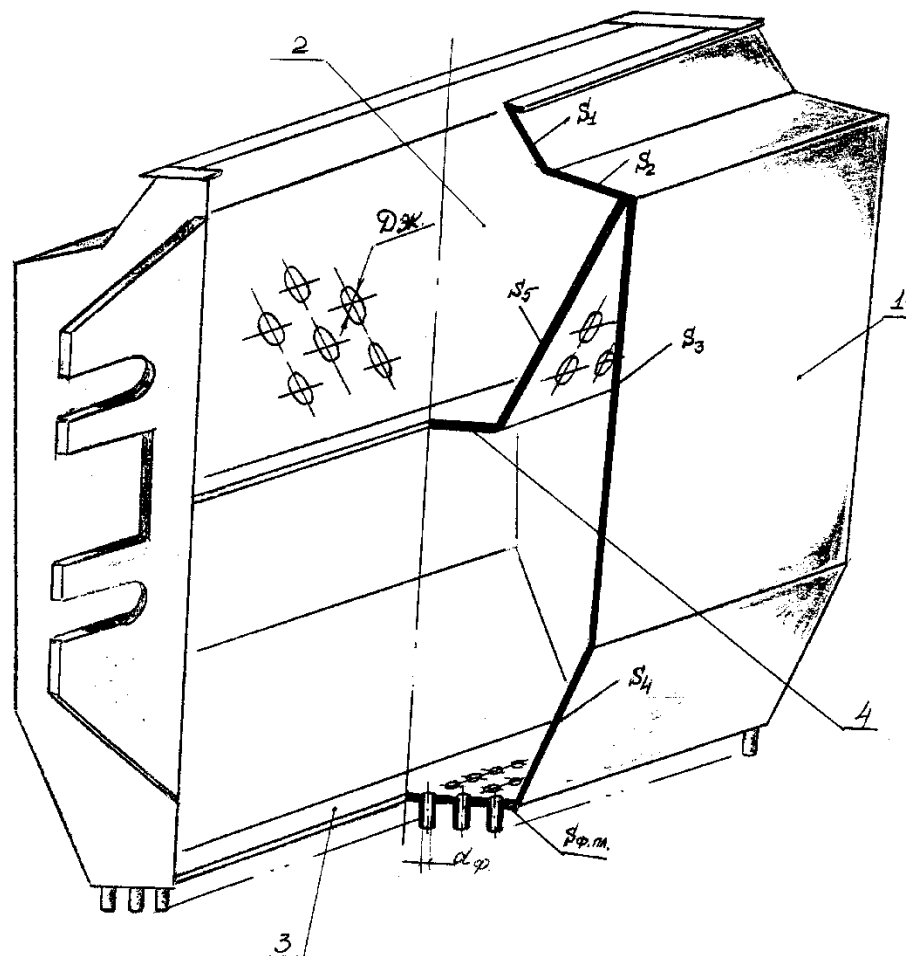
**Стеклоплавильный сосуд** - основной аппарат в цепочке технологического процесса получения стеклянного волокна. Сосуд одновременно выполняет две функции: электронагревателя, выделяющего тепло за счет прохождения через него тока, и емкости для плавления стекла и подготовке расплава к формированию волокна. Работа этого аппарата во многом определяет технико-экономические показатели производства. В то же время условия эксплуатации стеклоплавильных сосудов при 1200-1450°C определяют класс материалов, пригодных для их изготовления. Уровень тепловых напряжений стеклоплавильного сосуда чрезвычайно высок, поэтому многочисленные попытки использовать неблагородные металлы и неметаллические материалы закончились безрезультатно.



Фильеры — специальные, высокопрочные формы через которые продавливают различные пластические вещества, так то: пластмассы, стекло и т. д. и т. п.



# Стеклоплавильный сосуд



Стеклоплавильный сосуд включает в себя корпус 1, плавильную камеру 2, фильерную пластину 3 и экран 4.

Стеклошарики (на чертеже не показано) поступают в плавильную камеру 2, расположенную в корпусе 1, где плавятся под действием электрического тока. Далее расплавленную стекломассу гомогенизируют и направляют на фильерную пластину 3 через проходные отверстия экрана 4. Основная гомогенизация расплава происходит над экранной зоной. Подготовку стекломассы к формированию стекловолокон ведут за счет оптимальных соотношений суммарных поперечных сечений всех нагревательных элементов, расположенных в верхней части.

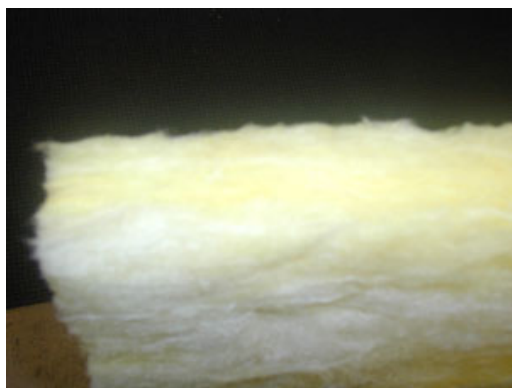


# Штапельное стекловолокно

Штапельное стекловолокно, используемое при производстве СП в виде тонкого стеклянного мата.

Штапельное волокно получают из расплавленных и вытекающих из фильер струй диаметром 2..3 мм, которые затем раздуваются паром или воздухом на короткие волокна.

Стеклянные волокна очень чувствительны к механическим повреждениям. Прочность нетронутых волокон (отобранных до контакта с замасливающим и наматывающим устройствами сразу после вытяжки из фильер) на 25...30 % выше прочности стандартных волокон того же диаметра и состава.

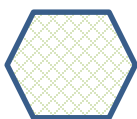
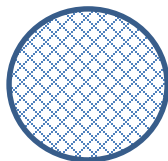




# Поперечное сечение волокон

## Стеклянные волокна

Волокна, имеющие форму круглого сплошного цилиндра



Профильные (волокна с сечением, отличным от сплошного круглого)

Более целесообразно применять малые трубчатые волокна с коэффициентом капиллярности (отношение внутреннего диаметра к внешнему), равным 0,5..0,7, при внешнем диаметре волокна от 8 до 25 мкм, что позволяет снизить плотность СП, увеличить их удельную жесткость при изгибе и прочность при сжатии. При этом также уменьшаются диэлектрическая проницаемость и теплопроводность СП.

Формы сечений:  
- трубчатые;  
- гексагональные;  
- треугольные;  
- прямоугольные.

Профильные волокна позволяет создать более плотные материалы (более плотная упаковка), а это приводит к увеличению прочности и жесткости. С помощью стеклянных и гофрированных микроленг в необходимых случаях можно повысить газопроницаемость СП, а также его прочность и жесткость в поперечном направлении.



# Замасливатели волокна

Поверхность непрерывных стеклянных волокон в процессе вытягивания покрывается замасливателем для защиты волокон от разрушения при трении друг о друга и о детали перерабатывающего оборудования, а также для склеивания их в нить. Такие замасливатели называются текстильными. Наибольшее распространение получили:

- парафиновый водно-эмульсионный замасливатель (парафиновая эмульсия);
- текстильные замасливатели на основе крахмала.

Замасливатели, в состав которых входят адгезионно-гидрофобные вещества, способствующие созданию прочной связи на границах раздела стеклянное волокно – связующее, называют прямым. Для осуществления гидрофобно-адгезионной модификации поверхности стеклянных тканей термохимической обработкой удаляют текстильный замасливатель и наносят аппрет (обычно на основе кремнийорганических соединений), способный к химическому взаимодействию как на поверхности волокон, так и со связующим.



26.03.2019



katashiov@yandex.ru



# Применение стеклянных волокон

При изготовлении композитных элементов конструкций стеклянные  
волокна используют в виде:

- первичных нитей;
- ровингов т. е. прядей некрученых нитей;
- крученых нитей;
- тканей и сеток на их основе.

Текстильная обработка заметно снижает предел прочности стеклянных  
волокон.



# Нити и ровинги

Стекланные нити (крученые и некрученые) представляют собой комплексные нити, состоящие из непрерывных элементарных нитей, склеенных между собой замасливателем.

Ровинг (жгут) представляет собой некрученую прядь, которая состоит из приблизительно параллельных некрученых комплексных нитей и наматывается крестообразно в бухты



Нити



Ровинг



# Влияние типа армирующего материала на прочность однонаправленного эпоксидного СП

Армирующий материал	Марка стекло-пластика	Средняя прочность волокна, МПа	Разрушающее напряжение при растяжении волокна в ПКМ, МПа	Повышение прочности волокна в ПКМ, %
Некрученные комплексные нити	БС6-200 НПО 10/200	300	2750	920
		1140	2700	235
Крученая нить	БС6-13x1x2-78	600	2300	383
<u>Ровинг</u>	РБН 10-420-78	1270	2200	173

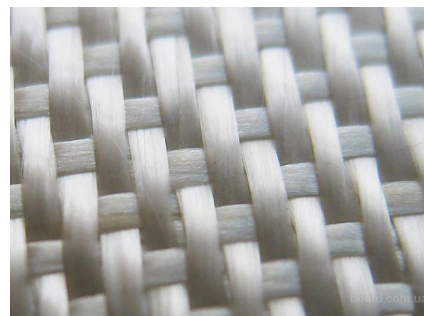
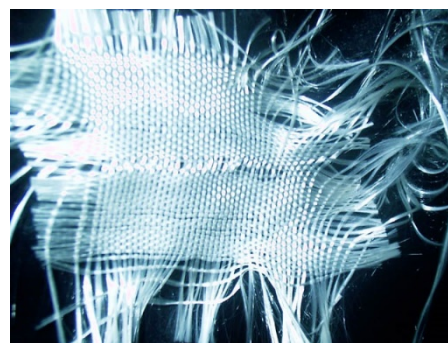
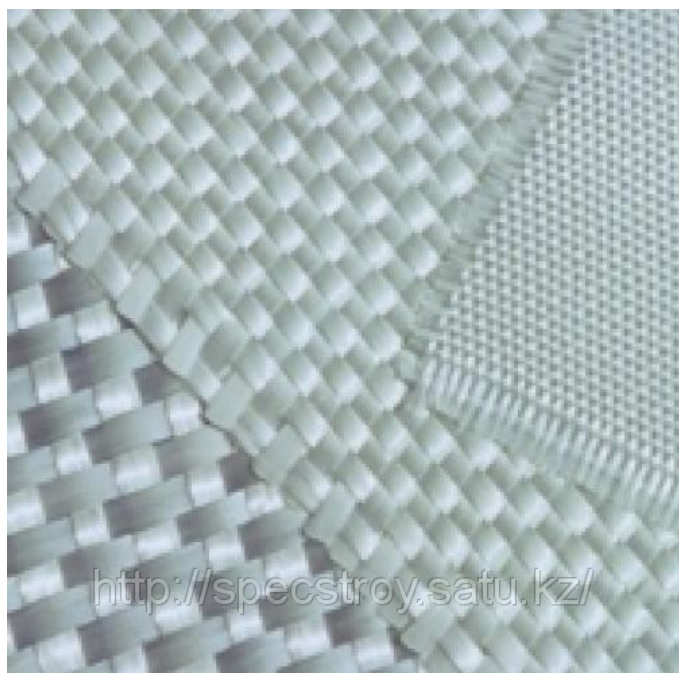
Приняты следующие обозначения:

- марка БС6-200, где Б – алюмоборосиликатное стекло; С – непрерывная стеклянная нить; 6 - диаметр элемента волокна в микронах;
- марка БС6-13x1x2-78, где БС6 – то же, что в марке БС6-200; 13x1x2 – линейная плотность комплексной нити и количество сложений при первом, втором и третьем скручивании, 1 текс – масса в граммах одного метра нити; 78 – вид замасливателя;
- марка РБН10-420-78, где Р – ровинг; Б – алюмоборосиликатное стекло; Н – намоточный.



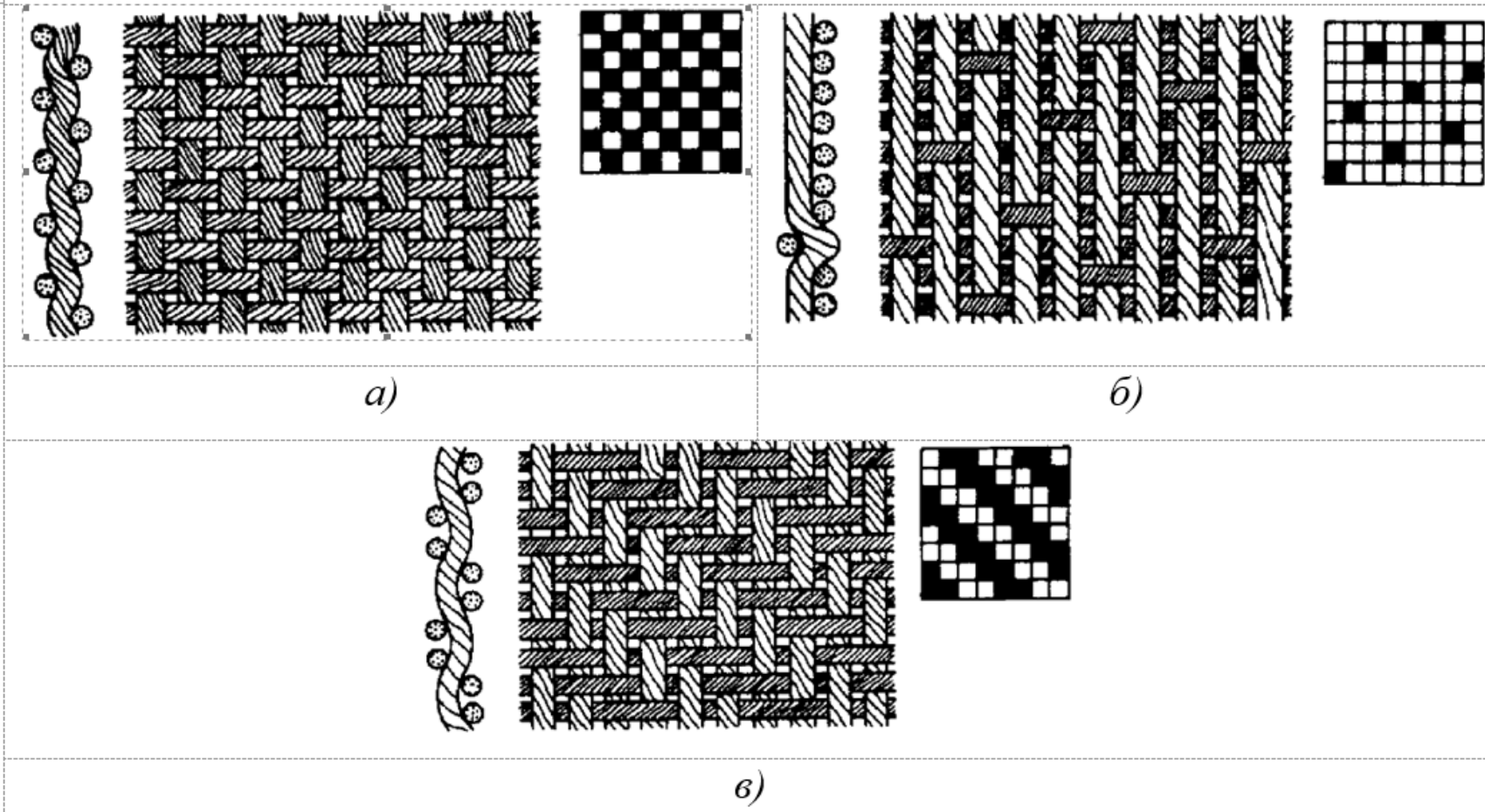
# Стекланные ткани

Стекланные ткани отличаются составом стекла, плотностью, массой одного квадратного метра, маркой замасливателя, видом переплетения нитей и другими параметрами. Они изготавливаются из крученых комплексных нитей или из ровинга.





# Виды плетений тканей



Схемы переплетений тканей: а – полотняное переплетение; б – сатиновое переплетение; в – саржевое переплетение (2x2)



# Особенности плетений тканей

**Плотняное переплетение** (рис. а) является наиболее простым и широко применяемым, каждая нить основы и утка проходит поочередно сверху и снизу пересекающихся нитей.

**Сатиновое переплетение** (рис. б) является переплетение, при котором каждая нить проходит поочередно сверху, а затем снизу пересекающей ее нити.

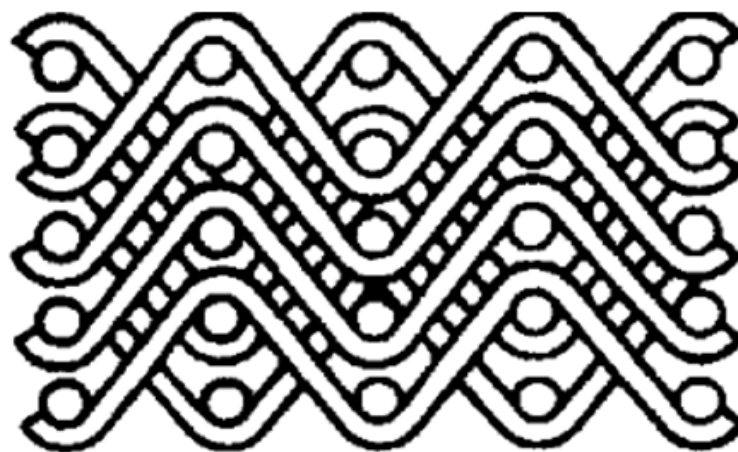
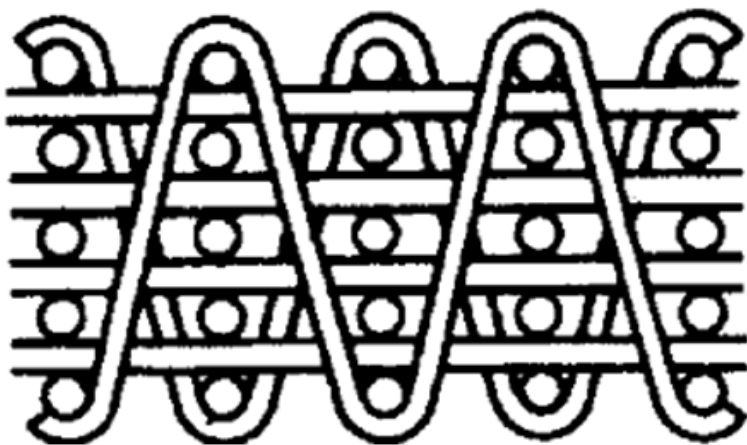
**Саржевое переплетение** (рис. в) является более сложным типом переплетения при котором нити основы и утка проходят поочередно сверху и снизу двух и четырех пересекающих их нитей.

В тканях плотняного переплетения основа и уток взаимно переплетены. В ткани сатинового переплетения каждая нить основы (или утка) проходит над несколькими нитями утка (или основы). СП, армированные тканями сатинового переплетения, обычно более прочные, так как нити в них прямолинейные. Ткань плотняного переплетения более технологичная и дешевая.



# Многослойные ткани

Многослойные ткани, вырабатываемые трехмерным переплетением из крученых стеклянных нитей, повышают в несколько раз межслойную жесткость и прочность СП. Эти ткани применяют для высокопрочных деталей, изготовленных методами пропитки под вакуумом или давлением.



Стеклоткани пространственного переплетения



# Характеристики тканей на основе стеклянных ВОЛОКОН

Характеристики тканей на основе стеклянных волокон

Марка ткани	Тип переплетений нитей	Поверхностная плотность $m$ , кг/м <sup>2</sup>	Толщина $h$ , мм	Плотность укладки нитей, текс/мм		Средняя прочность $\sigma_1^+$ , ГПа	
				по основе	по утку	по основе	по утку
Т-10	Сатин 8/3	0,29	0,23	187	104	0,47	0,26
Т-10-80		0,29	0,25	187	104	0,51	0,29
Т-11	Сатин 8/3 или 5/3	0,39	0,30	238	140	0,39	0,23
Т-11-752		0,39	0,30	238	140	0,39	0,23
Т-11-ГВС-9		0,39	0,30	238	140	0,27	0,14
Т-12		0,37	0,30	229	135	0,39	0,23
Т-12-41	Полотно	0,37	0,30	229	135	0,36	0,19
Т-12-ГВС-9		0,37	0,30	229	135	0,27	0,14
Т-13		0,29	0,27	173	108	0,30	0,19
Т-14		0,31	0,29	173	140	0,28	0,23
Т-14-78	Сатин 8/3 полотно	0,31	0,29	173	140	0,29	0,24
А-1		0,11	0,10	54	54	0,24	0,24
А-2	Трехмерное переплетение	0,7	0,06	34	27	0,20	0,17
ТСУ-8/Э-ВМ-78		0,32	0,27	134	179	0,33	0,43
ТУ ПР		0,29	0,26	170	104	0,32	0,22
ТС-5Н-78		0,30	0,47	144	144	0,13	0,13
МТТС-2,1		2,10	2,20	—	—	0,25	0,18

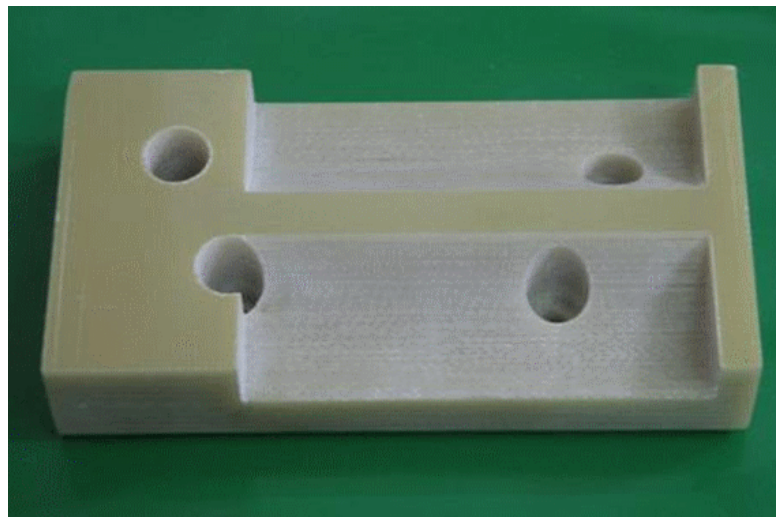
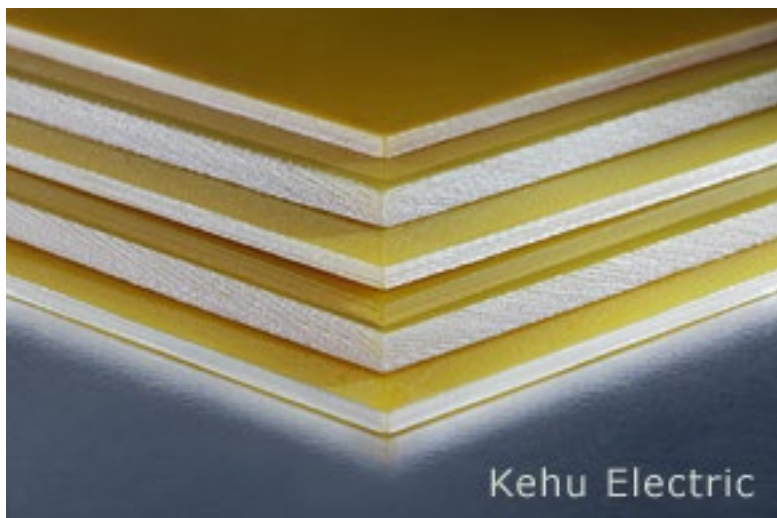


# Стеклотекстолиты

Пластики, в которых армирующим материалом являются стеклянные ткани, называют **стеклотекстолитами**.

## Влияние диаметра волокна на механические свойства стеклотекстолитов

Изменение диаметра волокна от 3 до 10 мкм практически не влияет на механические свойства стеклотекстолитов. В связи с этим наметилась тенденция к использованию в тканях, предназначенных для стеклотекстолитов, волокон диаметром до 10 мкм, а также нитей с малой круткой (до 50 кручений/м). Это должно привести к существенному снижению стоимости тканей.

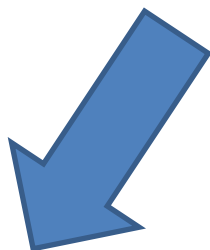




# Рулонные материалы

---

## Рулонные материалы



Неориентированные  
рулонные материалы  
(маты, холсты)



Ориентированные  
рулонные материалы  
(ткани, сетки)



# Неориентированными материалами

Стеклопластики, армированные неориентированными материалами, квазиизотропны в плоскости армирования, содержат в процентном отношении меньше стекла и имеют низкие механические показатели. Стоимость их ниже. Они менее склонны к трещинообразованию. Эти материалы применяют когда нужно выполнить условия герметичности, химической или атмосферной стойкости.



**Стекломат**



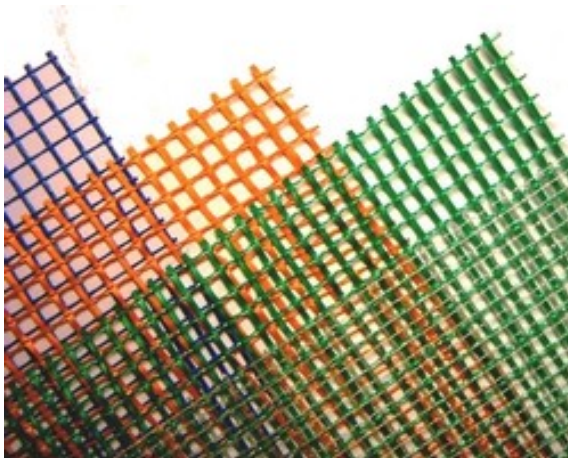
**СТЕКЛОХОЛСТ**



# Ориентированные материалы



Нетканые ориентированные материалы обладают положительными качествами тканей и сеток. Нити в них не прогибаются, производительность труда при их изготовлении выше, чем при выработке тканей. Выпускаются вязально-прошивочные и клеевые нетканые ориентированные материалы.



Текстильная обработка заметно снижает предел прочности волокон.



# Физико-механические свойства стеклопластиков

Физико-механические свойства СП зависят главным образом от состава, диаметра и длины стекловолокна, его ориентации и содержания в пластике, свойств связующего, а также от взаимодействия на границе «стекловолокно – связующее» и от технологии изготовления СП.

СП с ориентированным расположением волокон при растяжении-сжатии вдоль направления волокон ведут себя как упругие тела, подчиняющиеся закону Гука вплоть до разрушения материала.

С увеличением содержания волокна возрастают плотность СП, его прочность и модуль упругости при растяжении, сжатии и сдвиге вдоль волокон. При этом показатели механических свойств СП возрастают с увеличением степени наполнения арматурой до определенного предела, обусловленного плотностью упаковки волокон в композиции с сохранением монолитности связующего.

Наибольшая степень наполнения арматурой составляет при тетрагональной укладке волокон – 78,5 % по объему, а при гексагональной – 90,7 % по объему. В реальных пластиках наибольшая степень наполнения арматурой составляет 60..70 % по объему и зависит от формы армирующего наполнителя и технологии изготовления пластика.



# Физико-механические свойства СП (2)

---

Наибольшим уровнем физико-механических характеристик при нормальной температуре обладают СП на основе эпоксидных и эпоксифенольных связующих.

С понижением температуры вплоть до  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  прочность однонаправленных СП несколько увеличивается как в направлении ориентации волокон, так и в ортогональном направлении. С повышением температуры прочность и жесткость СП снижаются в зависимости от теплостойкости используемого связующего.



# Физико-механические характеристики стеклопластиков

## Однонаправленный стеклопластик

Параметр	Стекло-пластик
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	2,1
Предел прочности, ГПа при растяжении вдоль волокон $\sigma_1^+$	1,75
при сжатии $\sigma_1^-$	0,65
при сдвиге $\tau_{12}$	0,048
Удельная прочность при растяжении вдоль волокон $\bar{\sigma}_1^+ \cdot 10^{-3}$ м	83
Модуль упругости вдоль волокон $E_1^+ \cdot 10^{-3}$ , ГПа	57
Удельная жесткость $\bar{E}_1^+ \cdot 10^{-6}$ , м	2,7
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа	5,2

## Стеклопластик, армированный тканями

Марка ткани	Вид пере- пле- тения	Тол- щина тка- ни, мм	Плот- ность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Содер- жание связу- юще- го, % (масс.)	Прочность при растяжении $\sigma_1^+$ , МПа		Модуль упругости при растяжении $E_1^+$ , ГПа	
					основа	уток	основа	уток
Стеклоткань АСТТ(6)-С (фенолфор- мальдегидное связующее)	Сати- новое 8/3	0,35	1850	38,8	530	280	26,6	20
Стеклоткань Т (полиэфир- ное связую- щее)	Полот- няное	0,27	1930	27,1	520	300	30	25
Стеклоткань МТБС-2,5 (полиэфир- ное связую- щее)	Мно- го- слой- ное	2,5	1850	31,5	345	280	25	17,7



# Усталость стеклопластиков

Действие длительной *статической* или *циклической* нагрузки вызывает снижение механических показателей СП тем больше, чем выше уровень напряжений, температура испытаний и влажность окружающей среды, больше продолжительность действия нагрузки.

Усталость СП оценивается:

- 1) сопротивлением длительному действию статической нагрузки (длительная прочность материала);
- 2) сопротивлением действию многократных циклических нагрузок (усталостная прочность, или предел выносливости).

Соответственно усталость характеризуется:

- *коэффициентом длительного сопротивления* – отношением предела длительной прочности к пределу кратковременной прочности материала;
- *коэффициентом усталостного сопротивления* – отношением предела усталостной прочности к пределу кратковременной прочности материала.



# Значение коэффициентов длительного сопротивления СП

Таблица 2 – Значения коэффициентов длительного сопротивления СП

Стеклопластик	Связующее	Вид напряженного состояния	Коэффициент длительного сопротивления при <u>нагрузении</u>		
			10 <sup>2</sup> ч	10 <sup>4</sup> ч	10 <sup>5</sup> ч
Однонаправленный	Полиэфирное	Растяжение	0,92	–	–
		Изгиб	0,78	0,72	0,66
Перекрестный: укладка 1:1 укладка под 120°	Полиэфирное	Растяжение	0,86-0,90	–	–
Стеклотекстолит	Эпоксидное	Растяжение	0,70	0,69	0,67
		Изгиб	0,68	0,65	0,62
	Полиэфирное	Растяжение	0,65	0,61	0,58
		Изгиб	0,63	0,59	0,56
С хаотическим расположением волокон	Полиэфирное	Растяжение	0,58	0,47	0,34
		Изгиб	0,57	0,46	0,35



# Значение коэффициентов усталостного сопротивления СП

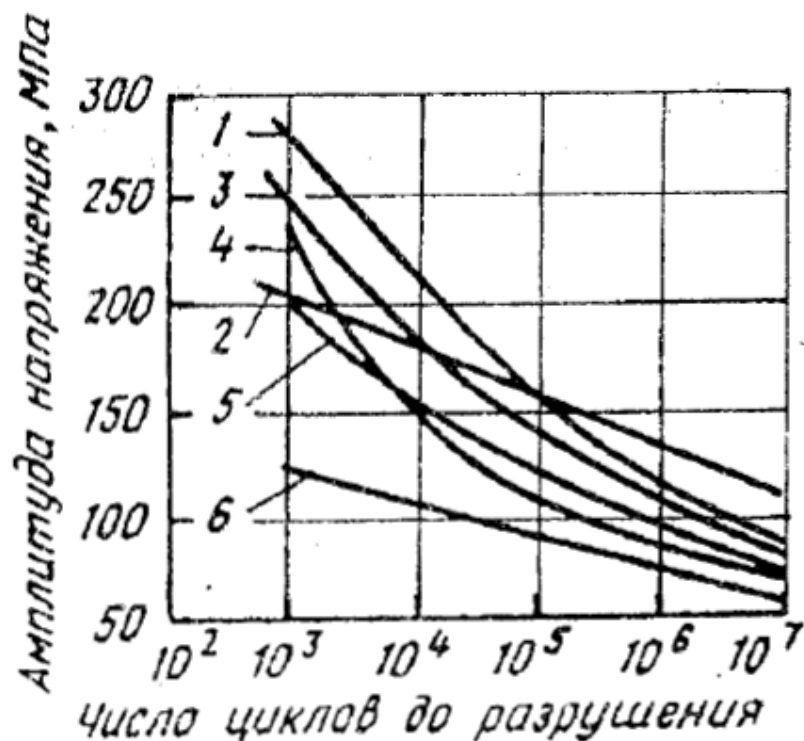
Таблица 3 – Значения коэффициентов усталостного сопротивления СП

Стеклопластик	Связующее	Коэффициент усталостного сопротивления
Однонаправленный, укладка 5° к оси	Эпоксидное	0,28-0,39
Перекрестный, укладка 1:1	Эпоксидное	0,25-0,33
Стеклотекстолит (ткань сатинового переплетения)	Эпоксидное	0,20-0,30
	Полиэфирное	0,23-0,24
	<u>Фенолформальдегидное</u>	0,21-0,28
	Кремнийорганическое	0,19-0,22
С хаотическим расположением волокон	Полиэфирное	0,18-0,22



# Усталостная стойкость СП

Стекло отличается высокой усталостной стойкостью, поэтому усталостные свойства СП определяются в основном природой и степенью отверждения связующего. Наибольшую выносливость придают материалу эпоксидные связующие вне зависимости от вида нагружения и текстуры армирующего наполнителя.



Усталостная прочность стеклотекстолитов (частота нагружения 900 циклов/мин, арматура – ткань 181) на основе различных смол:

- 1 – фенолформальдегидной;
- 2 – эпоксидной;
- 3 – теплостойкой эпоксидной;
- 4 – полиэфирной;
- 5 – теплостойкой полиэфирной;
- 6 – кремнийорганической.



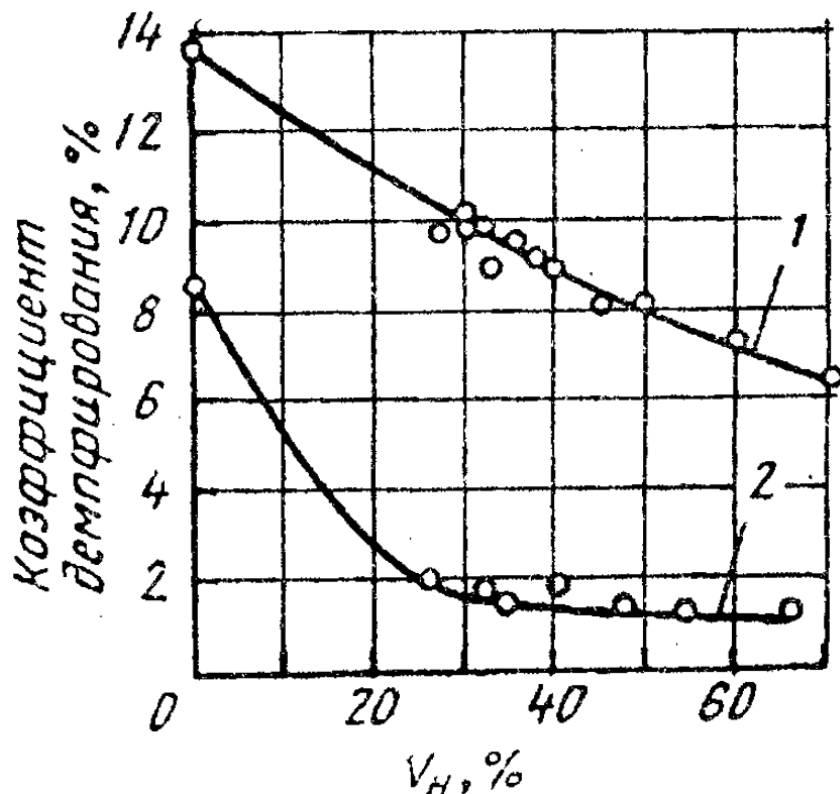
# Регулирование усталостных свойств

Установлено, что изменение соотношения волокон во взаимно перпендикулярных направлениях и изменение содержания связующего в пределах 20...37 % мало влияют на усталостную прочность пластика.

В небольшой степени усталостная прочность зависит от угла ориентации волокон при симметрично чередующемся расположении слоев по отношению к оси укладки. Среди СП с укладкой волокон под углами  $0$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 10$  и  $\pm 15^\circ$  наибольшей усталостной прочностью характеризуются СП с укладкой волокон под углом  $\pm 5^\circ$ , а наиболее низкой – под углом  $\pm 15^\circ$ .



# Демпфирующие свойства СП



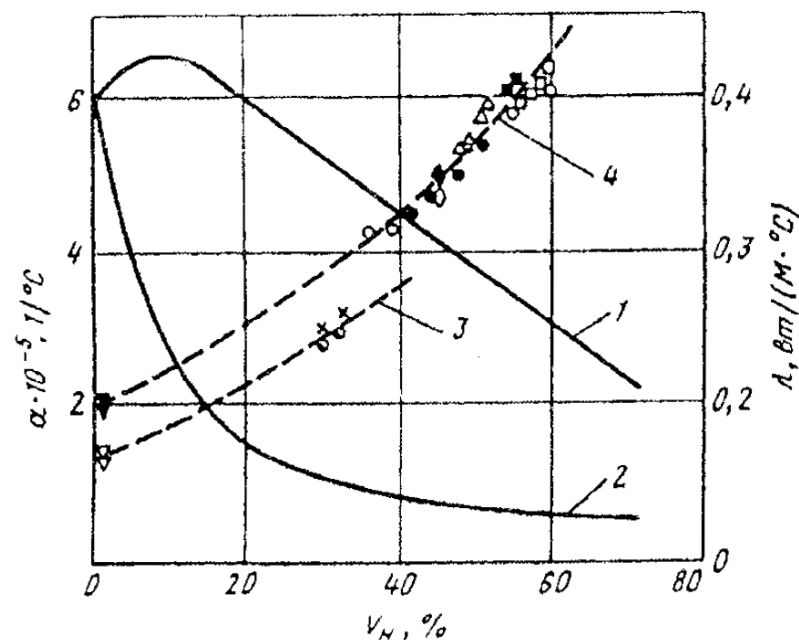
Зависимость демпфирующей способности полиэфирного стеклопластика (волокно из стекла Е) при кручении (1) при 15...25Гц или при изгибе (2) от степени наполнения  $V_H$

По демпфирующим свойствам СП в 3 – 8 раз превосходят конструкционные металлы. Демпфирующая способность СП при кручении больше, чем при изгибе. Это объясняется, по-видимому, тем, что при кручении большая часть материала подвергается действию циклических напряжений более высокого уровня. С увеличением степени наполнения арматурой демпфирующая способность композиции уменьшается.

С ростом амплитуды циклических напряжений и в большей степени с повышением температуры материала рассеяние энергии в нем несколько возрастает и практически не зависит от частоты в достаточно широком диапазоне ее изменения.



# Теплофизические свойства СП



Зависимость коэффициента термического линейного расширения однонаправленного стеклопластика  $\alpha$  поперек (1) и вдоль (2) волокон и коэффициентами теплопроводности  $\lambda$  стеклопластиков от степени наполнения арматурой  $V_H$  (3 – для СП на полиэфирных связующих, 4 – для СП на эпоксидных и фенолформальдегидных связующих)

Показатели теплофизических свойств СП, как и механических, зависят от свойств арматуры и связующего, от их соотношения и пористости пластика. Анизотропия теплофизических свойств определяется направлением теплового потока относительно направления ориентации волокон. Например, коэффициент линейного термического расширения однонаправленного СП уменьшается с увеличением степени наполнения арматурой, и его значение гораздо ниже в направлении ориентации волокон, чем в перпендикулярном к ним, поскольку коэффициент линейного расширения волокон намного меньше, чем связующего. При степени наполнения арматурой 40...60 % коэффициент линейного термического расширения вдоль волокон в 3 – 5 раз ниже, чем в перпендикулярном направлении. Установлено, что коэффициент термического линейного расширения однонаправленного пластика поперек волокон в некотором интервале наполнения арматурой даже может превышать коэффициенты линейного термического расширения каждого из компонентов.



# Теплофизические свойства СП (2)

*Коэффициент теплопроводности* стеклянных волокон в 4 – 5 раз больше, чем связующего, поэтому с повышением степени наполнения арматурой СП  $\lambda$  возрастает. С увеличением пористости СП коэффициент теплопроводности резко снижается.

Общность зависимости теплофизических и механических характеристик СП от свойств и содержания компонентов приводит к корреляции ряда теплофизических свойств с физико-механическими. В СП, плотность которых обычно находится в пределах от 1,6 до 2 г/см<sup>3</sup>, связь между  $\rho$  и  $\lambda$  аппроксимируется линейной зависимостью. Отклонение наблюдается только в СП с высокой пористостью. Установлена связь между коэффициентом теплопроводности в направлении, ортогональном плоскости расположения волокон, и модулем межслойного сдвига ориентированных СП с коэффициентом корреляции, равным 0,967.

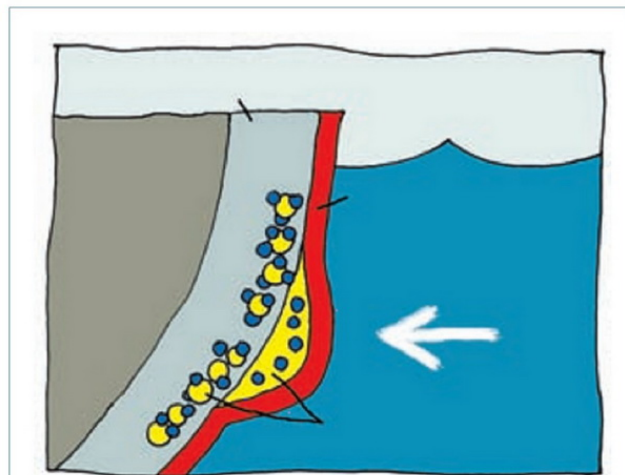
Значения **удельной теплоемкости** стеклянных волокон и связующих близки. Удельная теплоемкость СП составляет от 0,2 до 0,3 ккал/(кг·°С) (от 837,36 Дж/(кг·°С) до 1256 Дж/(кг·°С)) и не зависит от формы армирующего наполнителя и взаимного расположения волокон.

**Температуропроводность**, определяемая из уравнения  $a = \gamma \times c \times \rho$ , для большинства СП находится в пределах от  $0,80 \times 10^{-3}$  до  $0,85 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/ч.



# Водостойкость СП

Водопоглощение и связанная с ним потеря прочности СП зависят от типа и объемной доли связующего, от пористости пластика, типа армирующего наполнителя и поверхностной обработки СП. Основное количество воды находится в дефектах материала (порах, трещинах); некоторое количество влаги диффундирует в связующее, адсорбируясь полярными группами в нем и на поверхности волокна. Если пластик имеет высокую плотность и мало дефектов, то влагопоглощение является следствием диффузии воды в матрицу. В этом случае скорость установления равновесного влагосодержания является функцией формы и размеров образца. С увеличением отношения площади поверхности образца к его объему влагопоглощение возрастает.



*Процесс поглощения влаги и разрушения ламината постепенно ускоряется, и влага поглощается быстрее, чем покидает корпус. В результате начинается вспучивание покрытия — появление пузырей.*





# Водостойкость СП (2)

Значительно слабее влияние гидростатического давления до 60 МПа на скорость установления равновесного влагопоглощения в СП и на абсолютное значение этого показателя. Водопоглощение СП (в частности, полиэфирного) в пресной воде несколько выше, чем в морской.

Наиболее интенсивно снижаются показатели механических свойств СП в начальный период влагопоглощения. На этой стадии происходит заполнение дефектов материала водой, растрескивание связующего в местах концентрации остаточных напряжений, ослабление адсорбционного взаимодействия на границе «стекло – смола» и снижение прочности волокна. При высушивании образцов прочность их частично восстанавливается. При длительном действии воды на СП происходят деструктивные процессы (гидролиз связующего, выщелачивание волокон, разложение аппрета), приводящие к необратимому снижению механических свойств. Чем выше температура воды, тем быстрее и глубже происходят процессы деструкции. Применение «прямых» замасливателей или аппретов повышает влагостойкость СП.



## 3.2 Углепластики

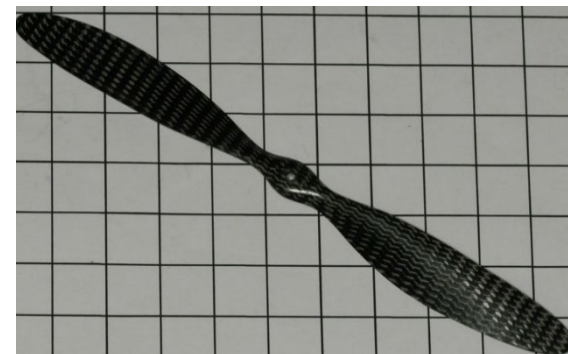
Углепластики (карбопластики, углеродопласты) – это композиты, содержащие в качестве наполнителя углеродные волокна.

Этот сравнительно новый класс ПКМ получил в последние годы наиболее интенсивное развитие благодаря своим уникальным свойствам, а именно:

- высоким значениям прочности и жесткости;
- низкой плотности;
- химической инертности;
- тепло- и электропроводности;
- высокой усталостной прочности;
- низкой ползучести;
- низким значениям коэффициента линейного термического расширения;
- высокой радиационной стойкости.



# Изделия из углепластиков

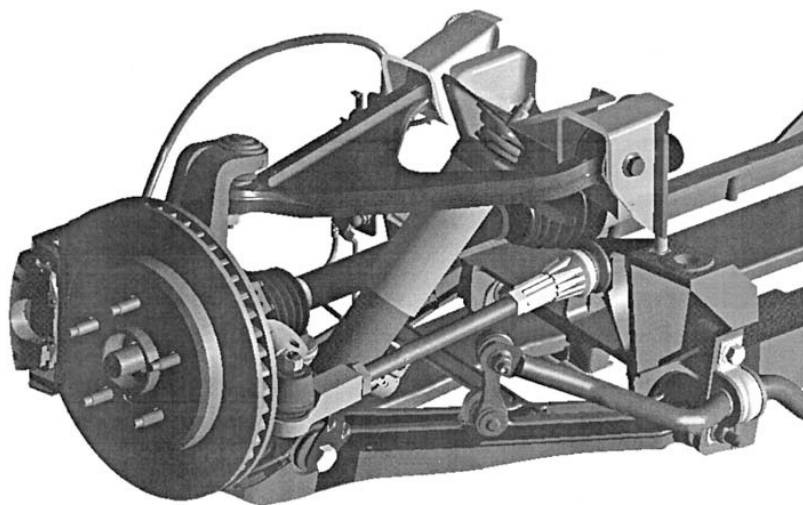




# Элементы ходовой части



Рычаг Ferrari F1



Задняя подвеска Chevrolet Corvette модели 1998 года





# Детали КМ из углепластика



Корпусные детали двигателя из УП



26.03.2019



[kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)





# Кабины грузовых автомобилей из УП

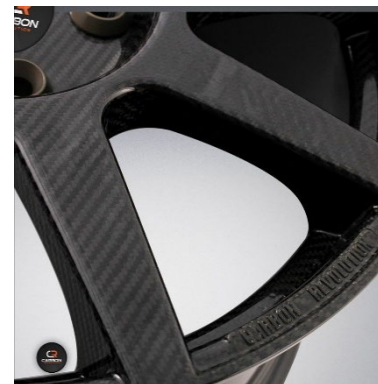




# Элементы легковых автомобилей из УП



**КФ  
1901**



**КФ  
1901**



**КФ  
1901**



26.03.2019

[kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)



# УП в машиностроении



RASCA





# Типы углепластиков

---

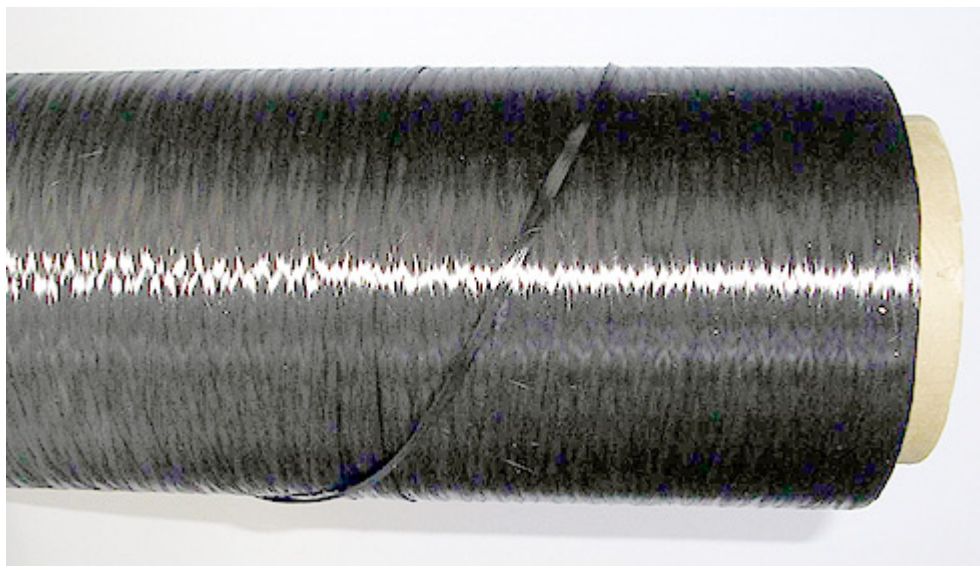
В зависимости от вида углеродного армирующего наполнителя, его текстурной формы и геометрических размеров углепластики можно разделить на три группы:

- углеволокниты;
- углетекстолиты;
- углепрес-волокниты.



# Углеволокниты

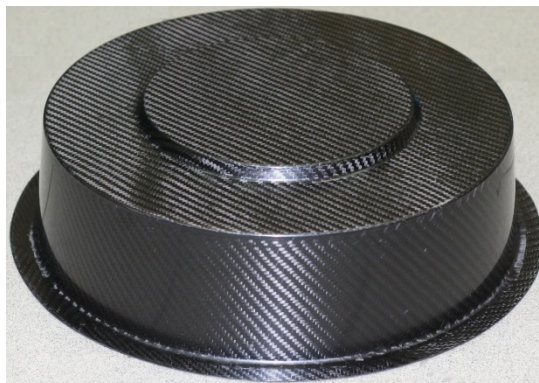
Углеволокниты – это углепластики на основе непрерывных ориентированных углеродных нитей, жгутов и ровниц.





# Углетекстолиты

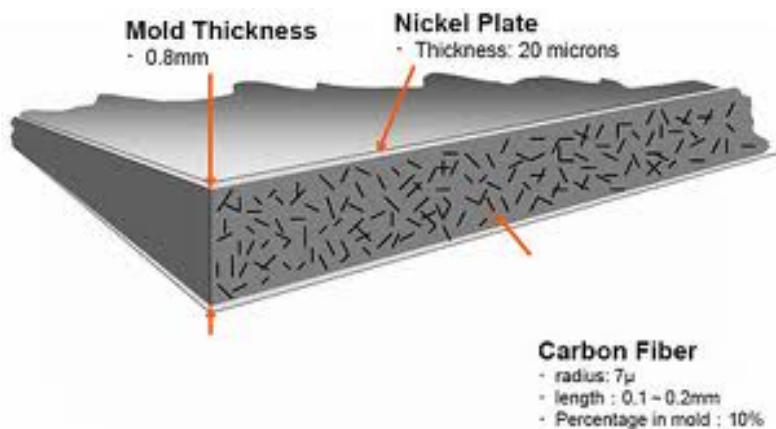
*Углетекстолиты* – это наиболее представительная группа углепластиков, в которых в качестве армирующего наполнителя используют тканые ленты и ткани различных текстурных форм.





# Углерес-волокниты

*Углерес-волокниты* – это углепластики на основе дискретных волокон.





# Технология переработки УП

Технологические приемы переработки углепластиков аналогичны технологии переработки стеклопластиков. В зависимости от формы и геометрических размеров детали применяются соответствующие методы формования:

- прессование;
- автоклавное формование;
- намотка;
- пултрузия;
- вакуумное формование;
- пресс-камерное формование;
- пропитка под давлением.



# Технологический процесс изготовления УП

---

Главное в технологическом процессе – обеспечить выполнение требований к основным технологическим параметрам проведения режима формования:

- температура формования и скорость подъема температуры;
- величина и время приложения давления формования;
- время выдержки на отдельных режимах формования;
- скорость и температура охлаждения.



# Комплекс свойств УП

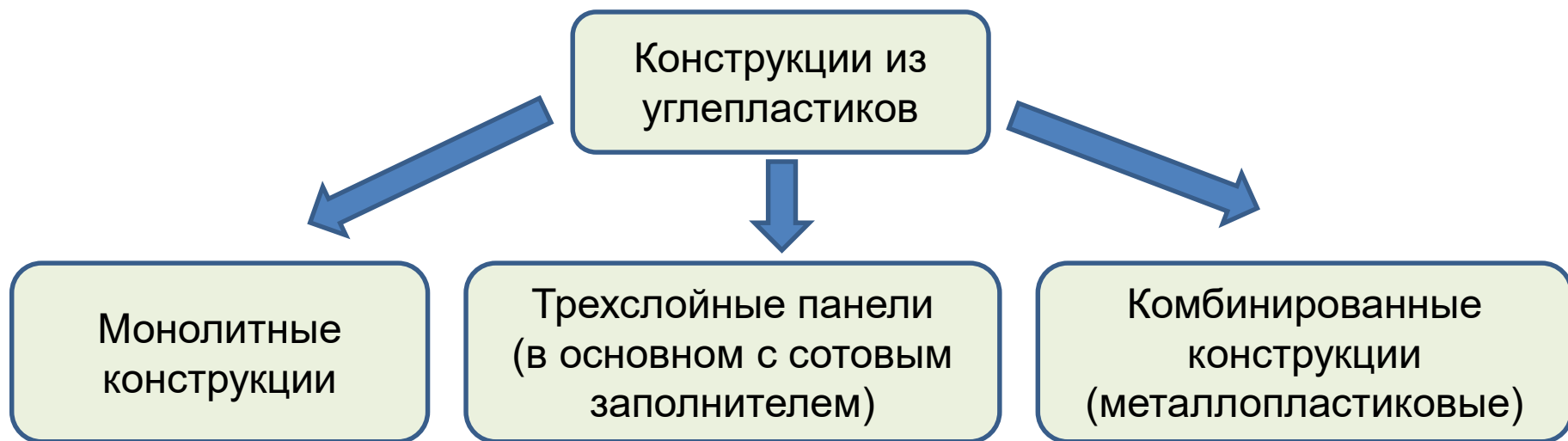
По комплексу свойств углепластики существенно превосходят традиционные стали, алюминиевые и титановые сплавы.

Углепластики обладают:

- ✓ повышенными удельной прочностью и жесткостью;
- ✓ высокой усталостной и длительной прочностью;
- ✓ возможностью регулирования анизотропии свойств;
- ✓ широким комплексом тепло- и электрофизических характеристик;
- ✓ многофункциональностью назначения.



# Конструкции из углепластиков



В каждом конкретном случае необходимо оценивать в конструкции:

- ✓ весовую эффективность;
- ✓ техническую эффективность;
- ✓ эксплуатационную эффективность.



# Применение углепластиков в авиакосмической промышленности

1. В авиационных конструкциях – практически весь комплекс оборудования.

2. В космической технике:

- ✓ высоконаправленные антенны;
- ✓ микроволновые фильтры и волноводы;
- ✓ оптические телескопы;
- ✓ рамы солнечных батарей;
- ✓ корпуса ракетных двигателей;
- ✓ различные ферменные конструкции;
- ✓ корпуса ракет и транспортных контейнеров.



# Применение углепластиков в автомобильной промышленности

3. В автомобильной промышленности:

- ✓ кузова легковых автомобилей;
- ✓ кабины грузовых автомобилей;
- ✓ двери;
- ✓ бампера;
- ✓ цистерны для перевозки топлива;
- ✓ однолистовые рессоры;
- ✓ рычаги подвески;
- ✓ ободья колес;
- ✓ трубы карданных передач;
- ✓ корпуса двигателей;
- ✓ детали шатунно- поршневой группы.



# Применение углепластиков в других областях машиностроения

4. В судостроении углепластики применяют для:

- ✓ корпусов морских и речных судов;
- ✓ корпусов малых тральщиков;
- ✓ в панелях, перегородках, палубных надстройках;
- ✓ для гребных винтов;
- ✓ для изготовления глубоководных аппаратов.

5. В сельхозмашинах углепластики применяют для:

- ✓ изготовления прицепного сельскохозяйственного оборудования и т.п.

6. В станкостроении углепластики применяют для:

- ✓ станин станков;
- ✓ вращающихся деталей электрооборудования;
- ✓ маховиков и аккумуляторов кинетической энергии;
- ✓ для деталей машин с высокими скоростями вращения;
- ✓ для роботов и манипуляторов.



# Применение углепластиков в других областях машиностроения

7. В физико-химическом машиностроении благодаря высокой устойчивости к действию химически агрессивных жидкостей и газов углепластики успешно применяются для:

- ✓ изготовления реакторов;
- ✓ трубопроводов;
- ✓ центрифуг;
- ✓ лопастей насосов;
- ✓ осадительных ванн;
- ✓ выхлопных труб;
- ✓ изготовления контейнеров и перевозки радиоактивных материалов;
- ✓ захоронения радиоактивных отходов.

8. В железнодорожном транспорте эффективно применение углепластиков для:

- ✓ изготовления вагонов;
- ✓ контейнеров;
- ✓ узлов подвески.



# Применение углепластиков в других областях машиностроения

9. В электротехнической промышленности углепластики эффективны для создания:

- ✓ лопастей ветроэнергетических установок различной мощности;
- ✓ электродвигателей;
- ✓ приборных панелях;
- ✓ опор линии электропередач;
- ✓ изоляторов линий высоковольтных передач;
- ✓ защиты от электромагнитных волн, в антеннах средств связи, радиоприборах, диффузорах громкоговорителей.

10. В нефтяной и газовой промышленности углепластики находят применение в трубах для бурения глубоких скважин, в газопроводах.

11. Углепластики широко используются при изготовлении спортивного инвентаря, спортивных самолетов.



## 3.2.1 Углеродные волокна

Характеристики углеродных волокон

Диаметр углеродных волокон составляет  $5..15 \times 10^{-6}$  м;

Предел прочности волокон, подвергнутых ориентационной вытяжке имеют прочность – 2,5..3,5 ГПа;

Модуль упругости волокон – 200..730 ГПа;

Плотность – 1400..1900 кг/м<sup>3</sup>

По удельному значению механических свойств лучшие углеродные волокна превосходят все известные жаростойкие волокнистые материалы.

Углеродные волокна используют для изготовления элементов, необходимая жесткость которых является условием, снижающим эффективность применения материалов, армированных стеклянными волокнами.



# Процесс изготовления углеродных волокон

---

Процесс изготовления углеродных волокон заключается в последовательном температурном и механическом воздействиях на исходные органические волокна, приводящих к их

- карбонизации,
- графитизации,
- совершенствованию структуры.

Процесс делится на три этапа.



# Этапы получения углеродного волокна

## Первый этап

Нагрев исходных растянутых волокон до температуры 220°С приводит к образованию поперечных химических связей между макромолекулами полимера.

## Второй этап

Нагрев до температуры 1000 °С позволяет получить так называемые карбонизованные волокна, на 80..95 % состоящие из элементарного углерода и обладающие достаточно высокой прочностью.

## Третий этап

Нагрев до температуры 1500..2000 °С; получают конечный продукт – графитизированное углеродное волокно с кристаллической структурой, близкой к структуре графита.



# Упрочнение углеродного волокна

---

Наибольшей прочностью обладают волокна, которые при нагреве на последнем этапе ( $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) имеют мелкокристаллическую структуру.

Высокомодульные материалы получают в результате растяжения волокна при температуре  $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



# Армирующие элементы из углеродного волокна

В качестве армирующих элементов углеродные волокна применяют в виде:

- жгутов (ровингов);
- лент;
- тканей.





# Достоинства углеродных волокон

Основные *достоинства* по отношению к стеклянным волокнам:

- ✓ высокая жесткость;
- ✓ механические характеристики остаются постоянными до температуры 450 °С, что позволяет применять углеродные волокна с полимерной и металлической матрицами;
- ✓ волокна характеризуются отрицательным коэффициентом линейного расширения, что в совокупности с положительным коэффициентом у матрицы позволяет синтезировать композиции для конструкций, сохраняющих свои размеры при температурном воздействии;
- ✓ более легкие.



# Недостатки углеродных волокон

---

Основные *недостатки* по отношению к стеклянным волокнам:

- более хрупкие;
- менее технологичные;
- химическая инертность, обуславливающая плохое смачивание волокон растворами и расплавами матричных материалов, что в итоге приводит к низкой прочности сцепления на границе «волокно-матрица»;
- стоимость углеродных волокон на два порядка выше, чем стеклянных.



## 3.2.2 Полимерные матрицы, применяемые при изготовлении углепластиков

---

Полимерная матрица определяет эксплуатационные и технологические свойства углепластика.

Для углепластиков используют как

- терморезистивные, так и
- термопластичные матрицы.



# Терморреактивные матрицы для углепластика

Из терморреактивных матриц наибольшее распространение получили:

- ✓ эпоксидные связующие;
- ✓ эпоксидноанилинофенолформальдегидное;
- ✓ эпоксинаволачное;
- ✓ эпоксидное модифицированное диапластом;
- ✓ на основе тетрафункциональной эпоксидной смолы;
- ✓ на основе смеси трех эпоксидных смол.

Применение эпоксидных матриц обеспечивает получение углепластиков с высокими прочностными характеристиками, водостойкостью и химической стойкостью, хорошей эксплуатационной надежностью и ресурсом.



# Термопластичные матрицы для углепластика

Из термопластичных матриц нашли применение:

- ✓ полиамидоимидная;
- ✓ полисульфон, обеспечивающие работоспособность углепластиков при более высоких температурах.

Основной недостаток этих матриц – трудность изготовления на их основе полуфабрикатов (пропитанных лент – препрегов) и высокие температуры их отверждения.



## 3.2.3 Физико-механические свойства углепластиков

---

Уровень *физико-механические* свойств углепластиков зависит от

- ✓ характеристик применяемых углеродных волокон,
- ✓ вида и текстурной формы армирующего наполнителя,
- ✓ упругопрочностных свойств полимерной матрицы,
- ✓ качества раздела «волокно-матрица»,
- ✓ от технологии переработки и структуры армирования материала.



# Свойства однонаправленных углепластиков

Параметр	Марка углепластика								
	КМУ-1	КМУ-1 лм	КМУ-3	КМУ-3лп	КМУ-4л	КМУ-4э	КМУ-9	КМУ-9т	КМУ-9тр
Наполнитель	Жгут ВМН-4	Лента ЛУ-П	Жгут ВМН-4	Лента ЛУ-П	Лента ЛУ-П	Лента Элур-П	Жгут УКН- 11/500	Лента УОЛ- 300	Ткань УТ-900- 2,5
Матрица	ЭТФ	ЭТФ-М	5-211Б	5-211Б	ЭНФБ	ЭНФБ	УНДФ- 4А	УНДФ- 4АР	УНДФ- 4АР
Объемное содержание волокон, %	57-63	58-63	57-63	50-55	50-55	54-59	60-62	58-62	55-59
Плотность $\rho \times 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	1,45-1,49	1,48-1,50	1,4-1,45	1,4-1,45	1,45-1,50	1,49-1,52	1,55-1,58	1,52-1,56	1,52-1,54
Прочность при растяжении, МПа:									
вдоль волокон	1020	780	1100	730	800	900	1500	1500	60
поперек волокон	14	18	23	20	24	32	32	28	60
Предел прочности при сжатии, МПа:									
вдоль волокон	400	580	700	530	750	900	1200	1200	60
поперек волокон	100	130	150	120	130	130	140	160	58
Прочность при сдвиге вдоль волокон, МПа	30	61	40	54	70	78	85	78	52
Модуль упругости при растяжении, ГПа:									
вдоль волокон $E_1$	180	145	180	147	140	120	140	125	67
поперек волокон $E_2$ ,	–	–	9	9,9	10	10	9	8	67
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа	3,5	4,5	5,1	5,1	6,0	6,5	6,8	5,2	8,0
Коэффициент Пуассона $M_{12}$	0,27	0,27	0,31	0,27	0,25	0,265	0,27	0,33	0,07



# Оценка выносливости УП

Выносливость углепластика может быть очень приближенно оценена через свойства и состав его компонентов следующим образом:

$$\sigma_R = \sigma_M V_B \frac{E_B}{E_M} K.$$

Из уравнения следует, что усталостная прочность композита прямо пропорциональна прочности матрицы  $\sigma_M$  и модулю упругости армирующих волокон  $E_B$  и обратно пропорциональна модулю упругости матрицы  $E_M$ . Коэффициент  $K$  характеризует степень использования прочности матрицы при циклическом нагружении и учитывает наряду с природой матрицы влияние технологии изготовления композита и уровень внутренних остаточных напряжений.

Кроме того углепластики обладают:

- ✓ достаточно высокой длительной прочностью,
- ✓ низкой ползучестью благодаря высокой жесткости,
- ✓ низкой деформативности углеродных волокон.

## Пример расчета

$$V_B = 0.6$$

$$\sigma_M = 40 \text{ МПа}$$

$$E_B = 200 \text{ ГПа}$$

$$E_M = 8 \text{ ГПа}$$

$$K_B = 0.6$$

$$\sigma_R = \sigma_M \cdot V_B \cdot \frac{E_B}{E_M} \cdot K_B$$

$$\sigma_R = 360 \text{ МПа}$$



# Длительная прочность углепластиков

Коэффициент длительного сопротивления  $R_T^t$  углепластиков в диапазон рабочих температур  $T=80..200^\circ\text{C}$  и при длительности нагружения  $t=500...1000\text{ч}$  при растяжении и сжатии составляет  $0,5...0,9$  от величины кратковременной прочности материала, т.е.

$$S_{\text{дл}} = (0,5...0,9) S_{\text{в}}$$



## 3.2.4 Усталость углепластиков

Углепластики обладают наибольшей среди известных композитов усталостной прочностью.

Коэффициент усталостного сопротивления в зависимости от вида и степени асимметрии цикла равен 0,5...0,8, т.е.

$$\sigma_{-1} = (0,5 \dots 0,8) \sigma_B$$

в 2-3 раза выше, чем у стеклопластиков, что связано также с высокими значениями модуля упругости углеродных волокон и как следствие более низким уровнем напряжений и меньшей повреждаемостью полимерной матрицы.



# Ползучесть углепластиков при длительном нагружении

*Ползучесть материалов (последствие)* — изменение с течением времени деформации твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения.

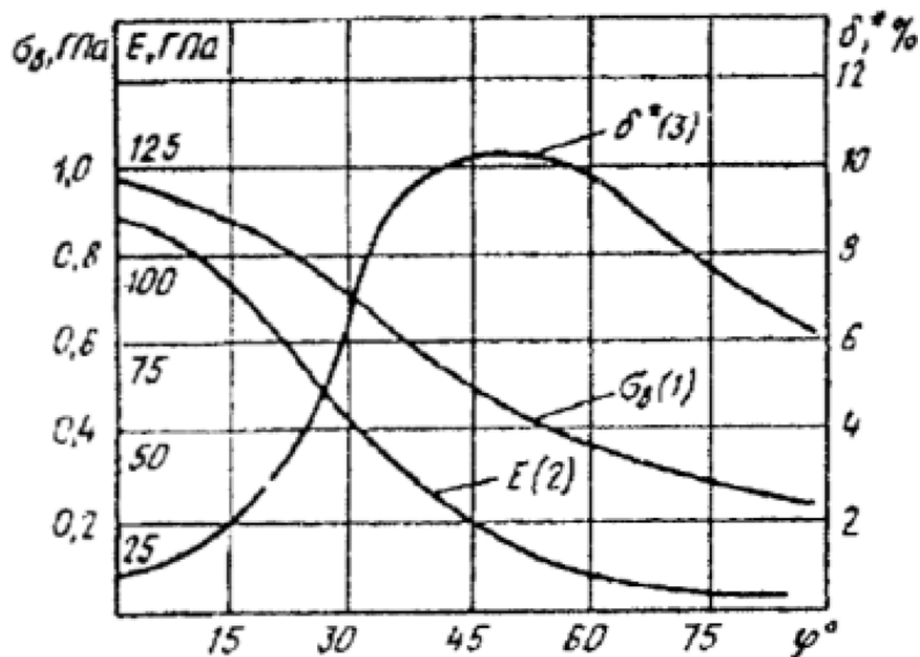
Ползучесть углепластиков при длительном нагружении нагрузкой, составляющей  $(0,4...0,5)\sigma_B$ , как правило, не превышает  $0,1..0,5\%$ .

Указанные характеристики благоприятно влияют на работоспособность материала при длительном нагружении с высоким уровнем действующих напряжений.



## 3.2.5 Демпфирующая способность углепластиков

Демпфирующая способность углепластика определяется в основном рассеиванием энергии в матрице, сопровождающимся переходом механической энергии в тепловую, химическую и электрическую и существенно зависит от уровня нагружения, структуры армирования материала и рабочей температуры.



Зависимость предела прочности (1) и модуля упругости при растяжении (2), логарифмического декремента затухания (3) от структуры армирования углепластика КМУ-4э

Декремент затухания

$$\frac{a(t)}{a(t+T)} = e^{\beta T}$$

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln \frac{a(t)}{a(t+T)} = \beta T.$$



# Демпфирующая способность углепластика

---

Однонаправленные углепластики имеют уровень демпфирующей способности вдоль волокон (логарифмический декремент затухания колебаний) равный:

$$\delta = 0,5..1,0\%$$

В диагонально-армированном углепластике уровень демпфирующей способности может возрасти в 5-7 раз.



## Демпфирующая способность углепластика, армированного под произвольным углом

Демпфирующая способность углепластика (логарифмический декремент затухания колебаний), армированного под произвольным углом  $\varphi$  может быть оценена по формуле:

$$\delta_{\varphi}^* = \delta_0^* (\cos^4 \varphi + m \sin^2 2\varphi + \rho \sin^4 \varphi).$$

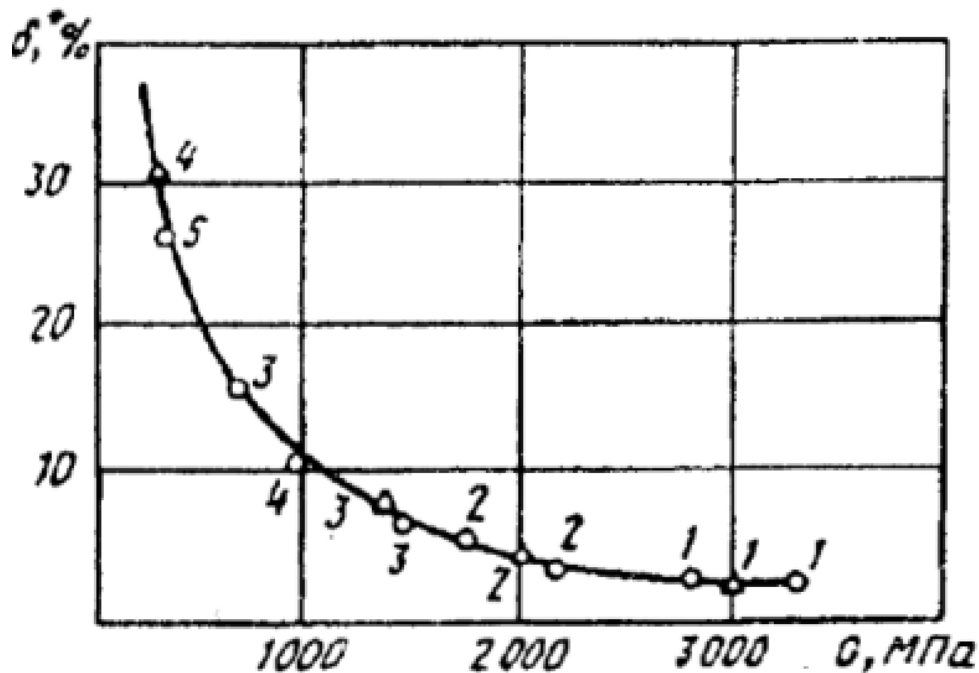
Здесь параметры  $\delta^*$ ,  $m$  и  $\rho$  определяются по экспериментальным данным, полученным для направления армирования волокон под углами  $0 \pm 45^\circ$  и  $90^\circ$ .

$$\rho = \frac{\delta_{90}^*}{\delta_0^*}, \quad m = \frac{\delta_{45}^*}{\delta_0^*} - \frac{\rho + 1}{4}.$$



# Зависимость демпфирующей способности углепластика от модуля сдвига

С уменьшением модуля сдвига наблюдается монотонное повышение коэффициента механических потерь:



Зависимость логарифмического декремента от модуля сдвига полимерной матрицы для углепластиков КМУ-3л, КМУ-1лм, КМУ-4э при температуре: 20°C (10), 100°C(2), 150°C(3), 180°C(4), 200°C(5)



## Зависимость демпфирующей способности углепластика от модуля сдвига (2)

Эту зависимость можно описать произведением коэффициента механических потерь на значение модуля сдвига пластика, которое является величиной близкой к постоянной:

$$\delta^* \cdot G \approx \text{const.}$$

При повышении температуры наблюдается рост демпфирующей способности углепластика. Это явление объясняется снижением модуля сдвига углепластика, что связано со значительными физическими изменениями, происходящими в полимерных связующих при повышении температуры.



## 3.2.6 Теплофизические свойства углепластиков

Теплофизические характеристики углепластиков зависят от:

- типа волокон;
- типа и объемного содержания матрицы;
- содержания пор в матрице;
- температуры испытаний.

Для различных углепластиков они существенно не различаются и находятся в следующих диапазонах:

- коэффициент теплопроводности  $0,5..1,0$  Вт/м  $\cdot$ °С;
- коэффициент термического расширения  $(-1,5..0,5) \times 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ ;
- коэффициент теплоемкости  $0,8..1,5$  ккал/кг $\cdot$ °С.



## 3.2.7 Водостойкость углепластиков

При совместном действии влаги и температуры наблюдаются структурные превращения в матрице и на границах раздела «волокно-матрица», вызывающие ухудшение характеристик.

Механизм изменения свойств, обусловленный сорбцией влаги, связан с двумя основными процессами:

- потерями температурной прочности и жесткости вследствие пластификации матрицы в объеме и в приграничном слое;
- потерями из-за микро- и макрорастрескивания матрицы.

В зависимости от типа материала их предельное влагопоглощение различается в 1,5...2 раза и составляет для наиболее влагостойких материалов 1%.

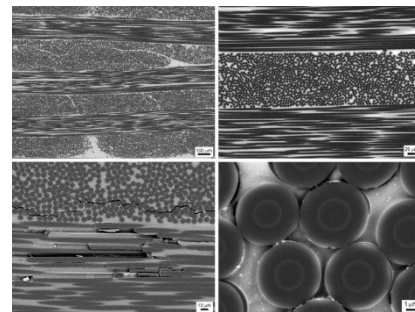


# Уровень безопасного содержания влаги в углепластике

Уровень безопасного содержания влаги в углепластиках составляет:

0,6...0,7 %.

Дальнейшее увеличение содержания влаги (~ до 1%) может привести к снижению упругопрочностных характеристик углепластиков при максимальной рабочей температуре на 15...20 %.





## 3.2.8 Ударная вязкость и трещиностойкость углепластиков

По сравнению с другими ПКМ углепластики обладают меньшей удельной ударной вязкостью, трещиностойкостью и остаточностью к концентрации напряжений.

Значительное влияние на чувствительность углепластиков к концентрации напряжений оказывает структура армирования и направление приложения нагрузки по отношению к ориентации волокон.

Повышение остаточной прочности и вязкости разрушения углепластиков возможно путем создания гибридного (поливолокнистого) материала в виде чередования сплошных слоев углеродных и стеклянных, углеродных и органических наполнителей либо в виде периодически расположенных высокомодульных (борных) или низко модульных (стеклянных с армированием  $\pm 45^\circ$ ) стопоров трещин.



# Ударная вязкость поливолоконистого материала на основе углепластика

Ударную вязкость поливолоконистого материала, содержащего низко модульные волокна в количестве  $V_2$  с модулем упругости  $E_2$  при реализации прочности волокон в композите  $\sigma_2'$  и высоко модульные волокна в количестве  $V_1$  с модулем упругости  $E_1$  и реализованной прочностью углеродного волокнита в композите  $\sigma_1'$ , можно определить по выражению:

$$a = \frac{(\sigma_1')^2}{2E_1} V_1 + \frac{(\sigma_2')^2}{2E_2} V_2$$

Ударная вязкость — способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки (сопротивляется хрупкому разрушению).

Трещиностойкость — способность материала сопротивляться развитию трещин (разрушению) при однократном, циклическом и замедленном разрушении.



# Характеристика ударной вязкости

Характеристикой вязкости является удельная работа разрушения:

$$\alpha_n = \frac{A}{F_0}$$

На разрушение образца затрачивается работа:  $A = P(H - h)$

где:  $P$  - вес маятника,  $H$  - высота подъема маятника до удара,  $h$  - высота подъема маятника после удара

$F_0$  - площадь поперечного сечения в месте надреза.

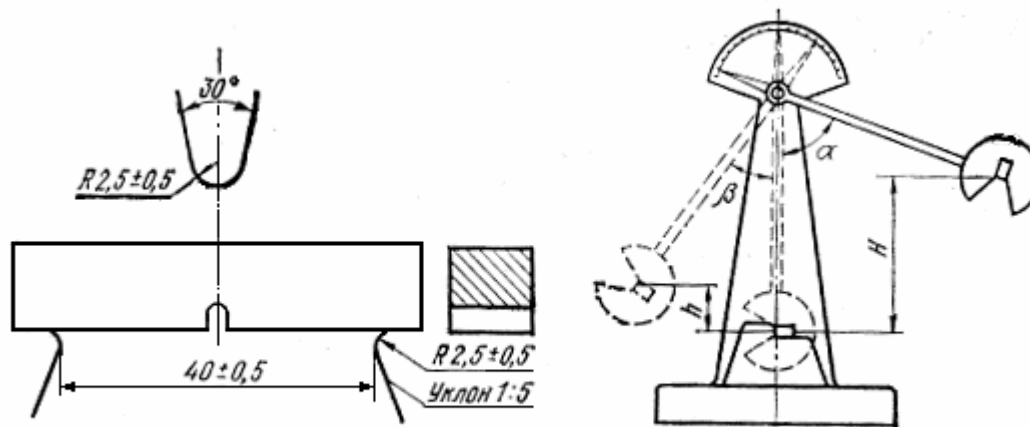


Рис. 2. Схема испытания на ударный изгиб



## 3.3 Базальтопластики

Базальтопластками называют полимерные материалы, содержащие в качестве упрочняющего компонента базальтовые волокна

Базальт относится к числу аморфных неорганических полимеров с различным составом звеньев в полимере. В зависимости от географического места нахождения базальта его состав изменяется в узких пределах и соответственно не столь резко изменяются и его свойства.

**Базальт** — горная порода тёмного цвета, образовавшаяся в результате излияния магмы.





# Базальт

Базальт – горная порода нормального ряда, самая распространённая из всех вулканических пород.

## Минеральный состав

Основная масса сложена микролитами плагиоклазов, клинопироксена, магнетита или титаномагнетита, а также вулканическим стеклом. Наиболее распространённым акцессорным минералом является апатит.

## Химический состав

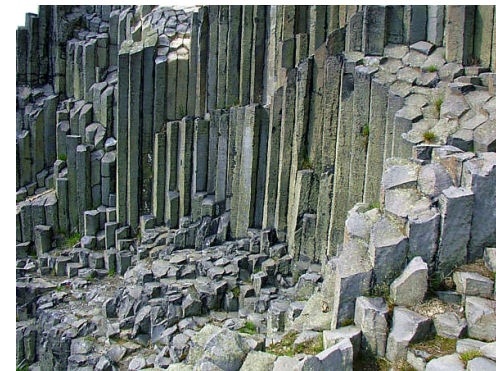
Содержание кремнезёма ( $\text{SiO}_2$ ) колеблется от 45 до 52-53 %, суммы щелочей  $\text{Na}_2+\text{K}_2$  до 5 %, в щелочных базальтах до 7 %. Прочие оксиды могут распределяться так:  $\text{TiO}_2=1.8-2.3$  %;  $\text{Al}_2\text{O}_3=14.5-17.9$  %;  $\text{Fe}_2\text{O}_3=2.8-5.1$  %;  $\text{FeO}=7.3-8.1$  %;  $\text{MnO}=0.1-0.2$  %;  $\text{MgO}=7.1-9.3$  %;  $\text{CaO}=9.1-10.1$  %;  $\text{P}_2\text{O}_5=0.2-0.5$  %.



# Базальт



Базальтовые скалы

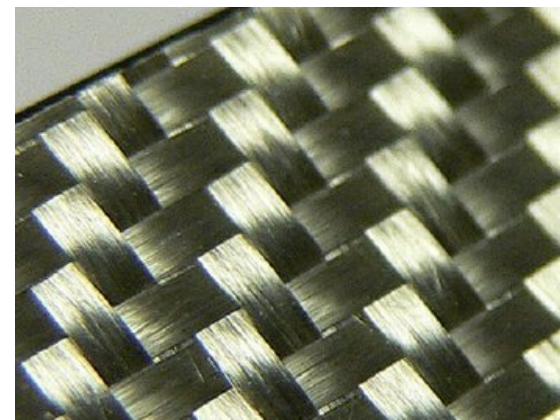


Базальтовые скалы





# Изделия из базальта





# Базальт в автомобилестроении



Диски сцеплений



haihua.en.alibaba.com

Глушители



Кузовные панели

Тормозные элементы





# Применение базальтопластиков

---

- 1) Базальтовые волокна применяют вместо асбестовые в изделиях триботехнического назначения, в химической и теплостойкой аппаратуре.
- 2) Базальтовые волокна применяют вместо стеклянных в производстве высокопрочных конструкций, эксплуатируемых при температуре выше 250 °С, или диэлектриков, работающих в увлажненной среде или при повышенной температуре.
- 3) Базальтопластики широко применяются в автостроении: кузовные панели, диски сцеплений, тормозные элементы, глушители, фильтры, прокладки, элементы теплозвукоизоляции.



# Достоинства базальтопластиков

- базальтовые волокна являются экологически чистым продуктом, соответствующим международным стандартам;
- применение природного высокостабильного сырья позволяет снизить вредные воздействия на окружающую среду, которые неизбежны, например, при изготовлении стекловолокна, когда в атмосферу попадают высокотоксичные легколетучие оксиды бора, щелочных и щелочноземельных металлов;
- высокая стойкость к кислотам, щелочам;
- лучшие (чем у стекла) адгезионные свойства;
- хорошие теплоизоляционные свойства.



# Недостатки базальтопластиков

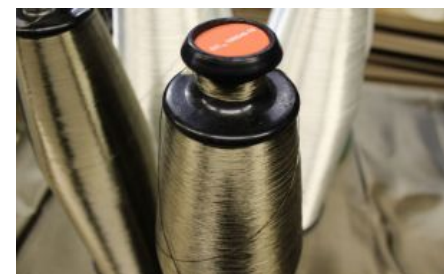
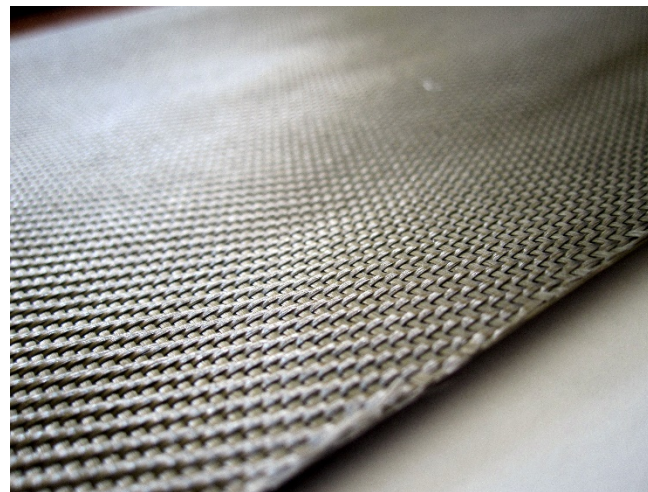
---

- более высокая стоимость производства;
- более высокая стоимость сырья;
- высокая стоимость.



## 3.3.1 Базальтовое волокно

Базальтовое волокно – материал, получаемый из природных минералов путем их расплава и последующего преобразования в волокно без использования химических добавок.





# Производство базальтового волокна

Базальтовое волокно производят из различных горных пород близких по химическому составу — базальта, базанитов, амфиболитов, габродиабазов или их смесей.

Производство базальтовых волокон основано на получении расплава базальта в плавильных печах и его свободном вытекании через специальные устройства, изготовленные из платины или жаростойких металлов. Плавильные печи могут быть электрическими, газовыми, или оборудоваться мазутными горелками. В качестве сырья для производства базальтовых волокон, используются базальтовые горные породы, средний химический состав которых следующий (% по массе):  $\text{SiO}_2$  (47,5-55,0);  $\text{TiO}_2$  (1,36-2,0);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14,0-20,0);  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$  (5,38-13,5);  $\text{MnO}$  (0,25-0,5);  $\text{MgO}$  (3,0-8,5);  $\text{CaO}$  (7,-11,0);  $\text{Na}_2\text{O}$  (2,7-7,5);  $\text{K}_2\text{O}$  (2,5-7,5);  $\text{P}_2\text{O}_5$  (не более 0,5);  $\text{SO}_3$  (не более 0,5); прочие породы (не более 5).



# Производство базальтового волокна





# Типы базальтовых волокон

Существует два основных типа базальтового волокна:

- штапельное;
- непрерывное.

В зависимости от диаметра волокна делят на:

- микротонкие, диаметром менее 0,6 мкм;
- ультратонкие, 0,6-1,0 мкм;
- супертонкие, 1,0-3,0 мкм;
- тонкие, 9-15 мкм;
- утолщенные, 15-25 мкм ;
- грубые, диаметром 50-500 мкм.

Диаметр волокон существенно влияет на важнейшие свойства изделий из него: теплопроводность, звукопоглощение, плотность и др.



# Микротонкое и ультратонкое базальтовое волокно

*Микротонкое* применяют для фильтров очень тонкой очистки газовой среды и жидкостей; изготовления тонкой бумаги и специальных изделий.

Микрокристаллические волокна превосходят обычные по температуре применения на  $200^{\circ}\text{C}$ , по кислотостойкости – в 2,5 раза, а гигроскопичность их в 2 раза ниже.

Основным преимуществом этого вида базальтового волокна является отсутствие усадки при его эксплуатации.

Из микрокристаллического волокна изготавливают:

- высокотемпературоустойчивые теплоизоляционные материалы, плиты;
- фильтры для фильтрации агрессивных сред при высоких температурах.

*Ультратонкое* используют для изготовления сверхлегких теплоизоляционных и звукопоглощающих изделий, бумаги, фильтров тонкой очистки газовых и жидкостных сред.



# Супертонкие базальтовое волокна

*Супертонкое* волокно используют для изготовления:

- прошивных теплозвукоизоляционных (МБП) и звукопоглощающих (БЗМ) изделий;
- картона (ТК-1, ТК-4);
- многослойного нетканого материала;
- теплоизоляционного вязально-прошивного материала;
- длинномерных теплоизоляционных полос и жгутов (БТШ-8, БТШ-20, БТШ30);
- мягких теплоизоляционных гидрофобизированных плит, фильтров и др.

Специальная термическая обработка базальтовых супертонких волокон позволяет получить микрокристаллический материал со свойствами, отличающимися от обычных волокон.



# Супертонкое базальтовое волокно (2)

Базальтовое супертонкое волокно (БСТВ) получают двумя методами:

1. Дуплекс процесс, когда первоначально вытягиваются из расплава базальта, через фильеры первичные волокна диаметром 250-350 мкм. Которые впоследствии раздуваются высокоскоростным газовым потоком при температуре выше  $1600^{\circ}\text{C}$  в супертонкие.

2. Раздув сжатым воздухом струи расплава, при этом температура расплава должна быть не менее  $1500^{\circ}\text{C}$ .

Вторым способом БСТВ получается более коротким и менее технологичным из него невозможно производить весь ассортимент продукции.



# Тонкое и утолщенное базальтовое волокно

*Тонкие* волокна из горных пород представляют собой слой беспорядочно расположенных волокон диаметром 9-15 мкм и длиной 3-1500 мм.

*Утолщенные волокна* представляют собой волокна диаметром 15-25 мкм и длиной 5-1500 мм.

Этот тип волокон получают:

- 1) методом вертикального раздува струи расплава воздухом (ВРВ);
- 2) центробежно-валковым методом.

Вырабатывают в виде:

- холстов,
- прошивных матов,
- плит на основе различных вяжущих.

Утолщенные волокна находят широкое применение в качестве фильтровальной основы дренажных систем гидротехнических сооружений.



# Толстое и грубое базальтовое волокно

---

*Толстые базальтовые* волокна представляют собой беспорядочно расположенные волокон волокна длиной 5-3000 мм, диаметром 25-150 мкм, прочностью на разрыв 120-650 МПа.

*Грубые базальтовые* волокна представляют собой относительно сыпучую дисперсно-волокнистую массу с длиной волокон 3-15 мм, диаметром 150-500 мкм, прочностью на разрыв 200-350 МПа, удельной поверхностью 28-280 см<sup>2</sup>/г.

Толстые и грубые базальтовые волокна являются коррозионно-стойкими и могут быть использованы взамен металла для армирования материалов на основе вяжущих.



# Базальтовая арматура

На основе базальтовых волокон изготавливают:

- крученые и некрученые нити;
- ткани полотняного плетения толщиной 0,15...0,25 мм
- ткани сатинового плетения (5/3) толщиной 0,17...0,29 мм;
- ровинги;
- холсты и маты.



TBR-400

TBR-500

TBR-600





### 3.3.3 Физико-механические свойства базальтовых волокон

Колебания в параметрах свойств волокон определяются не столько местонахождением базальта, сколько условиями формования (длительностью гомогенизации расплава, температурой вытяжки) и диаметром волокон (табл).

Свойства базальтовых волокон	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,75
<b>Предел прочности при растяжении, ГПа</b>	1,8-2,8(в зависимости от диаметра)
Модуль упругости при растяжении, ГПа	95-100
Термический коэффициент линейного расширения, град <sup>-1</sup>	$4,5 \cdot 10^{-6}$
Теплостойкость, °С	600



# Физико-механические свойства базальтовых волокон

---

Один и тот же состав, подвергнутый вытяжке при температуре 1220 °С в волокнах, имеет прочность при растяжении 1,3 ГПа, а подвергнутый вытяжке при температуре 1380 °С – прочность 2,23 ГПа.

Модуль упругости при растяжении возрастает с 77,9 до 90,34 ГПа.

Прочность тонких волокон достигает 2,8 ГПа, с диаметром 7...10 мкм прочность снижается до 1,8 ГПа.



# Зависимость физико-механических свойств базальтового волокна от температуры

1. За 2 часа при температуре 250 °С прочность возрастает до 2,2 ГПа и на этом уровне сохраняется до значения 300 °С.
2. Лишь при значении 400 °С прочность снижается на 3 %.
3. При значении температуры 600 °С прочность волокон любого диаметра падает на 42 %.
4. При значении 700 °С происходит окисление двухвалентного железа в трехвалентное, на 0,46...0,53 % сокращается длина волокон, возрастает их плотность и после охлаждения на 40 % снижается прочность.

После пятчасового выдерживания в кипящей воде прочность волокон снижается лишь на 0,46 %.



# Физико-механические свойства базальтопластиков на основе тканей

Свойства базальтопластов на основе вязально-прошивного материала из супертонкого волокна БСТВ (степень наполнения 30 %), ткани из базальтового ровинга БТ (степень наполнения 65..70 %).

Образцы изготовляли прессованием по режимам, оптимальным для фенолформальдегидных смол (ФФС) и для олигоимидов (АПИ).

Параметр	Значение					
	ФФС			АПИ		
Связующее	БТ	БСТВ	ДБВ	БТ	БСТВ	ДБВ
Наполнитель						
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,83	1,33	1,72	1,88	1,36	1,75
Разрушающее напряжение, МПа;						
при растяжении	340	30	320	360	40	290
при изгибе	580	130	310	480	120	300
при сжатии	360	90	290	380	95	240
Модуль упругости при растяжении, ГПа	30	-	23	37	-	27,5
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>3</sup> Гц	0,02	0,01	0,0014	0,004	0,003	0,0039
Диэлектрическая проницаемость	4,6	-	4,5	4,0	4,2	4,4



# Физико-механические свойства базальтопластиков на основе тканей

При испытаниях эпоксидобазальтопластов, изготовленных прессованием гранул, которые получают дроблением пропитанных связующим базальтовых жгутов получены следующие свойства:

- прочность при растяжении - 430 МПа;
- прочность при сжатии – 440 МПа;
- прочность при изгибе – 560 МПа;
- модуль упругости при растяжении - 39 ГПа.



### 3.3.4 Стойкость базальтопластиков к воздействию агрессивных сред

---

Базальтопластики имеют высокие показатели по водостойкости и обладают хорошей стойкостью к воздействию агрессивных сред.

Если базальтовые волокна подвергнуть термообработке при температуре 700 °С, то их стойкость к растворам кислот резко возрастает.



## 3.3.5 Диэлектрические свойства базальтопластика

---

Базальтопластики обладают очень хорошими диэлектрическими свойствами и по уровню свойств сопоставимы с бесщелочными стеклянными волокнами, но меньше изменяются с увлажнением.



## 3.3.6 Трещиностойкость базальтопластиков

Адгезионное взаимодействие базальтовых волокон с эпоксидными, фенольными и имидными связующими выше, чем стеклянных волокон, очевидно, из-за присутствия в их структуре звеньев оксида железа.

Высокая прочность взаимодействия проявляется в уровне остаточных напряжений граничного слоя смол и составляет 40...50 МПа.

Если в зоне контакта волокон с матрицей находится слой аппрета из блоксополимера марки КЭП (молекулярная масса 8000) в виде пленки толщиной в 20...25 нм, то уровень остаточных напряжений снижается до 17...25 МПа и резко возрастает трещиностойкость пластика.



### 3.3.7 Теплофизические свойства базальтопластиков

По показателям теплостойкости, химической стойкости и модулю упругости базальтовые волокна можно рассматривать в качестве заменителей асбестного волокна.





## 3.3.8 Трибологические свойства базальтопластиков

Коэффициент трения базальтопластиков по чугуну при давлении 0,7 МПа и в интервале температур от 20 до 450 °С изменяется от 0,62 до 0,56, а линейный износ (отношение толщины слоя износа к длине пути трения) остается на уровне  $40 \times 10^{-9}$  м/м.



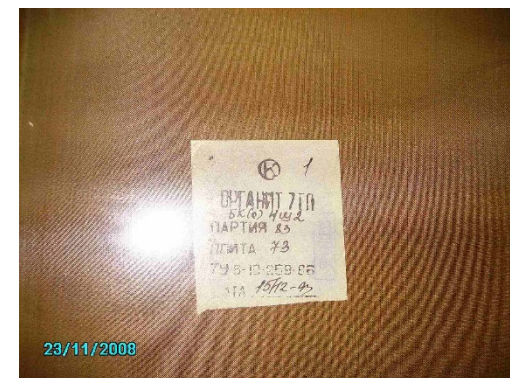
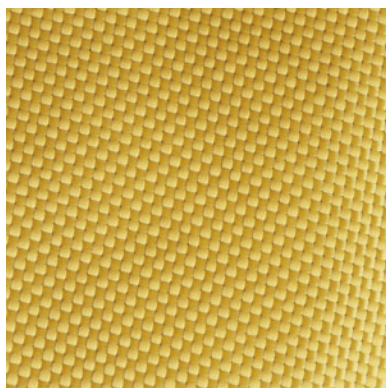


## 3.4 Органопластики

Органопластики – композита на основе полимерных матриц, армированных органическими волокнами.

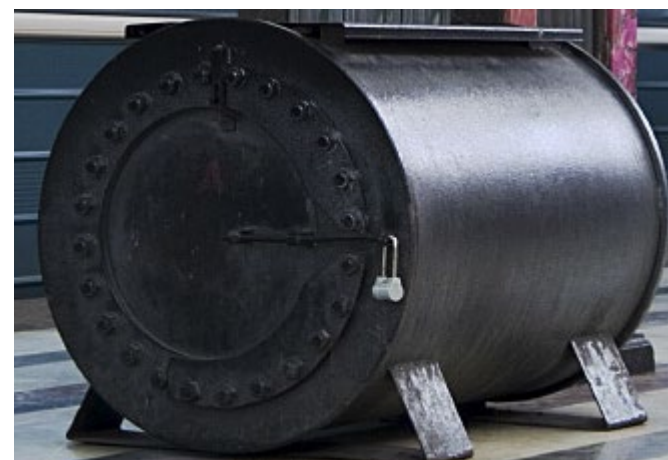
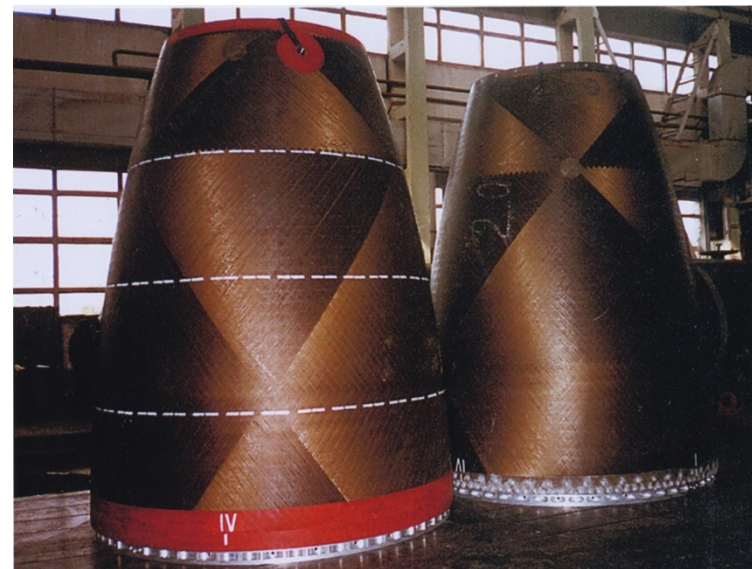
Органопластики относятся к классу армированных пластиков и отличаются от типичных их представителей (стекло- угле- и боропластиков) полимерной природой обоих компонентов – волокна и матрицы.

Органопластики получают на основе многокомпонентных полимер-, олигомер- и мономерных отверждающихся связующих различного химического состава.





# Изделия из органопластиков

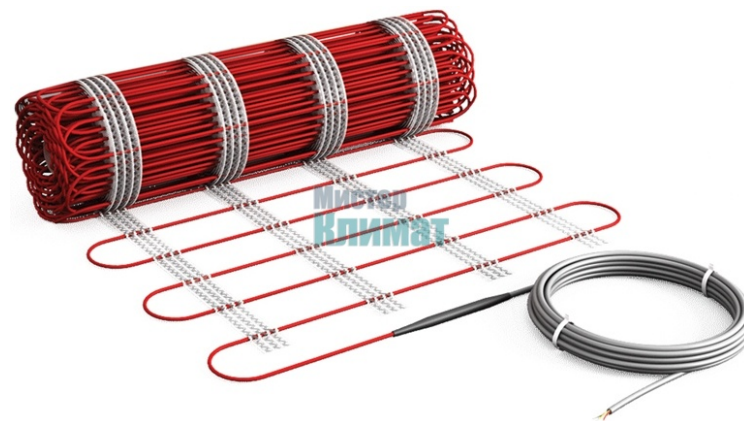
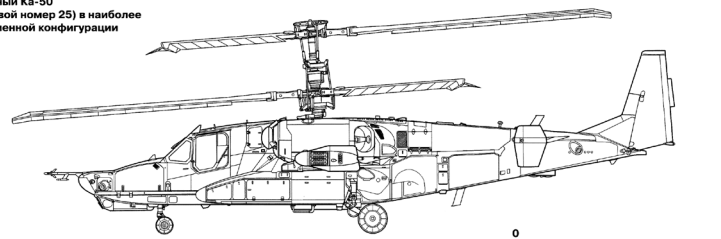




# Изделия из органопластиков



Серийный Ка-50  
(бортовой номер 25) в наиболее  
современной конфигурации





# Достоинства органопластика

---

- ✓ высокие диэлектрические и теплофизические свойства, химическая стойкость, уникальные трибологические характеристики;
- ✓ низкая плотность, максимальный уровень удельной плотности;
- ✓ сочетание высокой прочности (до 2,8...3,0 ГПа) со сравнительно высокой деформативностью;
- ✓ высокая усталостная прочность и низкая скоростью роста усталостных трещин.



# Недостатки органопластиков

---

- ✓ крайне различные свойства в различных направлениях;
- ✓ низкое сопротивление сжимающим нагрузкам.



# Применение органопластиков

Анализ особенностей поведения органопластиков при воздействии различных видов механического нагружения позволяет рекомендовать эти материалы:

- 1) для изготовления изделий, испытывающих критические растягивающие нагрузки;
- 2) для нагруженных комбинированных конструкций в сочетании с углепластиками;
- 3) для изготовления тонких обшивок для сотовых панелей, стойких к виброакустическому, абразивному и ударному воздействиям;
- 4) для изготовления защитных экранов для комбинированной броневой защиты.



# Применение органопластиков в автомобилестроении

Конструкционные органопластики многоцелевого назначения, созданные под требования авиационной, ракетокосмической, транспортной техники, находят все большее применение в автомобильной промышленности.

Автомобильные изделия из органопластиков:

- 1) панели трехслойной конструкции кузовов специальных автомобилей;
- 2) элементы локального бронирования для защиты экипажа и специальных грузов;
- 3) баллоны высокого давления для двигателей внутреннего сгорания работающих на газовом топливе;
- 4) подшипники скольжения и т. п.



## 3.4.1 Органические волокна

---

В зависимости от природы, структуры и уровня свойств волокнистого армирующего наполнителя органоластики подразделяют на две основные группы:

- органоластики на основе карбо- и гетероцепных волокон, характеризующихся сравнительно невысокими упругопрочностными свойствами (полиамидные волокна, волокна полиакрилнитрила, поливинилового спирта и др.);
- высокопрочные высокомодульные органоластики на основе предельно ориентированных волокон – арамидных, полипарафениленбензобистиазольных и др. (табл).



## Физико-механические характеристики высокопрочных высокомодульных органопластиков

Волокна	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , ГПа	$E$ , ГПа	$\epsilon$ , %
Полигетероарилен (СВМ)	1,44	3,8-4,2	120-130	2-4
Поли-п-фенилентерефталамид (терлон)	1,43	3,6-3,8	85-120	1,0-2,5
Арамидный сополимер (Амос)	1,44	4,5-5,0	145-170	4,0
Арамидный сополимер (ВМН-88)	1,46	3,7-4,5	157-167	2,9
Поли-п-фениленбензобистиазол (ПФБТ)	1,58	2,7-3,2	300-330	0,9
Поли-п-фенилентерефталамид (США)				
Кевлар-49	1,44	3,7-4,0	130-140	1,9-2,3
Кевлар-149	1,47	3,8-4,2	150-180	2-4
Углеродное высокопрочное	1,7-2,0	2,0-3,5	200-400	0,5-0,8
Стеклоанное высокомодульное	2,6	4,6-5,0	95	4,4-5,0



# Характеристики органических волокон

---

Диаметр органических волокон

близок к диаметру стеклянных и составляет  $5..20 \times 10^{-6}$  м.

Предел прочности при растяжении 3..5,5 ГПа.

Модуль упругости при растяжении 160..360 ГПа.

Плотность органических волокон составляет в среднем 1300 кг/см<sup>3</sup>.



# Создание новых органических волокон

Совершенствование существующих и создание новых волокон для органопластиков идет по пути:

- 1) повышения их прочности до 5..5,5 ГПа при модуле упругости 160..180 ГПа (высокопрочные арамиды);
- 2) увеличения модуля упругости до 300..360 ГПа при прочности 3..3,5 ГПа (высокомодульные полиарафениленбензобистиазолы).

На новых волокнах типа ПФБТ достигнут уровень жесткости, характерный для углеродных волокон, при этом из-за более высокой разрывной деформации и характера разрушения этим волокнам не свойственна хрупкость, что обеспечивает хорошие технологические и эксплуатационные свойства материалов на их основе.



# Получение органического волокна

Органические волокна получают механическим расщеплением древесины или другого растительного сырья. Минеральное волокно получают путем расплавления неорганического сырья с последующим превращением расплава в волокна.





# Арамидные волокна

В качестве армирующих наполнителей для конструкционных органопластиков в России наиболее широко применяются арамидные волокна СВМ и Армос.

За рубежом для аналогичных целей используются арамидные волокна марки Кевлар американской фирмы Дюпон.

**Арамид** (англ. *Aramid* аббр. *aromatic polyamide* — ароматический полиамид) — полипарафенилентерефталамид, синтетическое волокно высокой механической и термической прочности. Состоит из бензольных колец, соединённых друг с другом через группу  $-NH-CO-$ ; между водородными и кислородными отростками молекул соседних цепей образуются прочные водородные связи, обеспечивающие высокую механическую прочность всего волокна.



# Технологические методы изготовления изделий из органопластиков

Широкий ассортимент связующих и армирующих наполнителей позволяет изготавливать детали и агрегаты из органопластиков самыми различными технологическими методами.

При изготовлении деталей из органопластика применяют:

- мокрую намотку;
- сухую намотку;
- методы вакуумного формования;
- методы пневмовакуумного формования;
- методы контактного формования с отверждением в автоклаве;
- методы пултрузии.



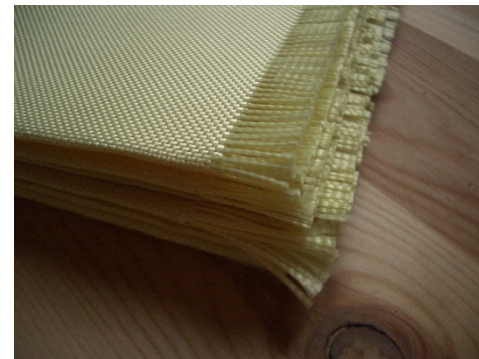
# Виды арматуры из органических волокон

В зависимости от технологических и эксплуатационных требований, предъявляемых к изделиям из органопластиков, для их изготовления используются волокнистые армирующие наполнители различных структур:

- ❑ однонаправленные наполнители в виде комплексных нитей, жгутов, лент;
- ❑ слоистые наполнители тканой структуры (однослойные ткани равнопрочные, однонаправленные и с другой заданной степенью анизотропии свойств в плоскости материала);
- ❑ нетканые материалы из «непрерывных» нитей и жгутов;
- ❑ объемные структуры (многослойные ткани, тканые соты, трикотаж);
- ❑ изотропные объемные структуры (холсты, маты), а также различные комбинированные ткани на основе сочетания арамидных нитей со стеклянными или углеродными нитями.



# Арматура из органического волокна





# Свойство тканых армирующих органических материалов

Свойства тканых армирующих наполнителей из арамидных нитей

Параметр	Органотекстолиты		Стеклотекстолит полиэфирный
	эпоксидный	поли- эфирный	
Плотность, г/м <sup>3</sup>	1280	1250	1700
Работа разрушения при растяжении, кДж/м <sup>2</sup>	915	1340	560
Относительное удлинение при разрыве, %	4-5	6-7,5	2,5
Импульс, поглощенный материалом при ударном изгибе, кДж/м <sup>2</sup>	0,014	0,088	0,010
Модуль Юнга в направлении, перпендикулярном плоскости листа, МПа	500	830	720
Работа разрушения при раскрытии трещины, кДж/м <sup>2</sup>	370	856	–
Максимальное раскрытие трещины, мм	1,95	3,75	–

Органопластики обладают способностью на достаточно высоком уровне сохранять свои свойства в широком диапазоне температур (от -50 до +200°С).



## 3.4.2 Матрицы органопластиков

В качестве полимерных матриц для изготовления органопластиков используются в основном модифицированные эпоксидные смолы.

В зависимости от технологических и эксплуатационных требований эпоксидные связующие могут модифицироваться различными низкомолекулярными смолами для снижения их вязкости или исключения пассивных растворителей, для повышения клейкости и живучести препрегов, придания пленкообразующих свойств связующим, а также для снижения температуры отверждения матрицы, горючести и дымообразования композитов на их основе и др.

При изготовлении конструкций, предназначенных для однократного удержания высокоэнергетического механического или баллистического удара, предпочтение отдается органопластикам на основе хрупких полиэфирных матриц «холодного» отверждения с более высокой энергией разрушения.



## 3.4.3 Особенности механических свойств органопластиков

---

Высокопрочные высокомодульные органопластики на основе арамидных волокон занимают устойчивое положение в ряду современных КМ как конструкционные материалы, отличающиеся:

- низкой плотностью ( $1,3 \text{ г/см}^3$ );
- максимальным уровнем удельной прочности при растяжении до 260 км;
- удельной жесткостью до 12 300 км.

При действии растягивающих нагрузок для органопластиков характерно сочетание высокой прочности (до 2,8..3,0 ГПа) со сравнительно высокой деформативностью.



## Особенности механических свойств органопластиков (2)

Как уже отмечалось, полимерная природа и высокая степень анизотропии арамидных волокон определяют низкое сопротивление органопластиков сжимающим нагрузкам:

- для однонаправленных органопластиков  $s_{-B}/s_d = 0,1 \dots 0,2$ ;
- для органотекстолитов  $s_{-B}/s_d = 0,2 \dots 0,4$ .

Диаграмма  $s$ - $\varepsilon$  при сжатии органотекстолитов не линейна при напряжении больше 100 МПа модуль упругости уменьшается до  $E = 13 \dots 16$  ГПа.

Характерной особенностью органотекстолитов является ярко выраженная анизотропия значений  $s_B$  в плоскости листа и, наоборот, практически полное отсутствие таковой для значений  $s_{-B}$ .

Поведение органопластиков при межслойном сдвиге определяется слабой межфибриллярной прочностью волокон; прочность при сдвиге однонаправленных композитов 60...80 МПа.



## 3.4.4 Демпфирующие свойства органопластиков

---

Органопластики весьма чувствительны к влиянию скорости нагружения: диаграммы  $\sigma$ - $\varepsilon$  расходятся практически с самого начала нагружения, что свидетельствует о проявлении вязких эффектов и накоплении поврежденности.



# Длительная прочность органопластиков

*Длительная прочность* органопластиков при статическом нагружении составляет  $0,7 \dots 0,9 S_B$ .

При длительном воздействии достаточно высоких нагрузок в органопластиках развивается ползучесть. Первоначально высокая скорость роста деформации стабилизируется во времени, и при снятии нагрузки после длительного нагружения деформация резко сокращается.



# Усталость органопластиков

Органопластики обладают высокой усталостной прочностью:

Однонаправленный органопластик с  $s_B = 2500$  МПа выдерживает без разрушения 60 тыс. циклов при  $s_{max} = 1800$  МПа, причем остаточная прочность образца  $s_B = 2150$  МПа.

Предел выносливости органопластиков при малоцикловом растяжении составляет  
**0,75...0,9  $s_B$ .**

Усталостная прочность органотекстоликов на базе  $10^7$  циклов равна 240 МПа, при этом скорость роста трещины усталости 0,05 мм/килоцикл, что в десятки раз ниже у алюминиевых сплавов при испытании в аналогичных условиях ( $s_{max} = 120$  МПа).



## 3.4.5 Ударная вязкость и хрупкость органопластиков

---

Сочетание высокой прочности, работы и вязкости разрушения с низкой плотностью выдвигает органопластики в разряд материалов, эффективно работающих в качестве защитных ударостойких экранов (при высокоэнергетическом механическом и баллистическом ударе).

Органопластики обладают высокой ударной вязкостью (до  $750 \text{ кДж/м}^2$ ), на уровне пластичных легированных сталей.



## 3.4.6 Водопоглощение и теплостойкость органопластиков

---

Органопластики (ПФБТ) характеризуются:

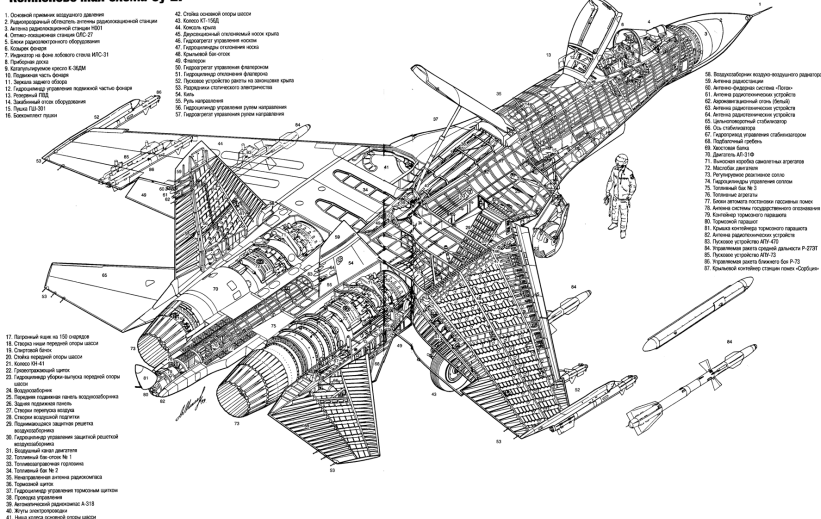
- низким водопоглощением (0,1...0,3 %);
- высокой теплостойкостью (350 °С).



# 3.5 Боропластики

Боропластики – материалы содержащие в качестве упрочняющего (армирующего) наполнителя борные волокнистые материалы.

Компоновочная схема Су-27





# Применение боропластиков

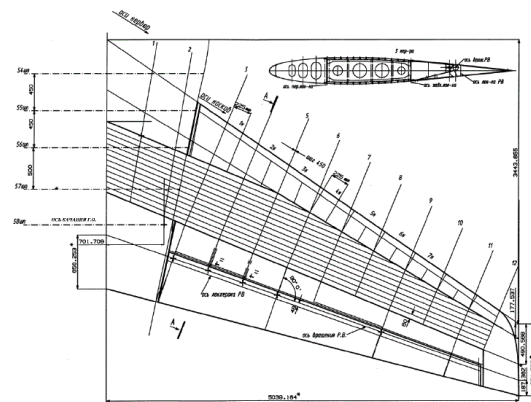
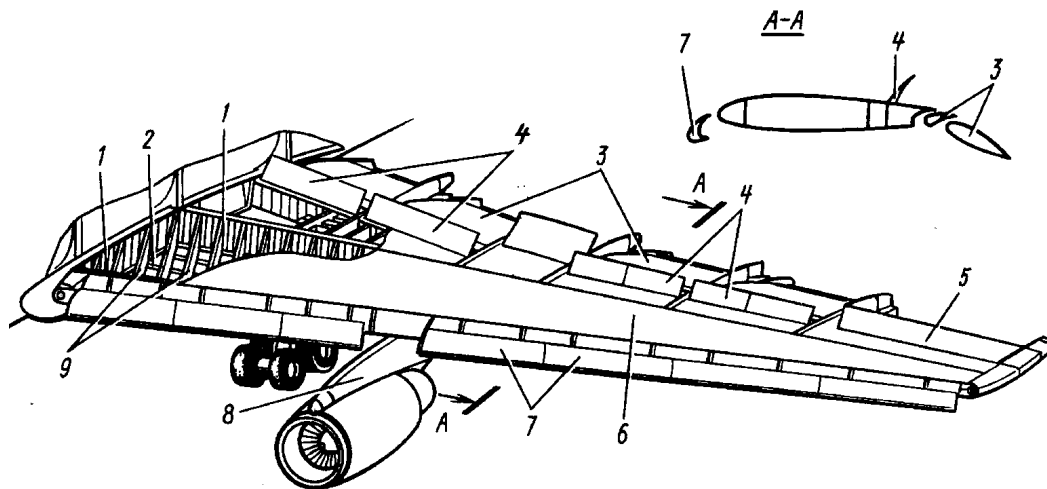
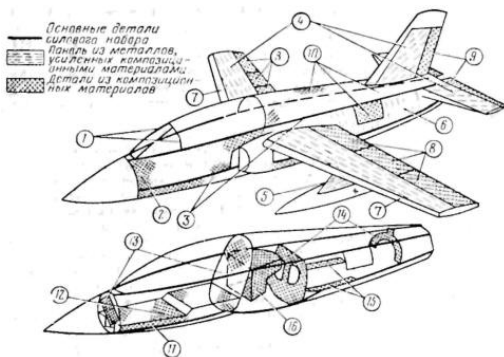


Рис. 1.3-4 Конструктивно-силовая схема горизонтального оперения





# Достоинства боропластиков

- высокая жесткость;
- высокая твердость и прочность;
- малая ползучесть и отличные усталостные свойства.

	13	14	15	16	17
2	<b>B</b> Бор	C Углерод	N Азот	O Кислород	F Фтор
3	Al Алюминий	<b>Si</b> Кремний	P Фосфор	S Сера	Cl Хлор
4	Ga Галлий	<b>Ge</b> Германий	<b>As</b> Мышьяк	Se Селен	Br Бром
5	In Индий	Sn Олово	<b>Sb</b> Сурьма	<b>Te</b> Теллур	I Иод
6	Tl Таллий	Pb Свинец	Bi Висмут	<b>Po</b> Полоний	At Астат

Полуметаллы (металлоиды) — химические элементы, расположенные в периодической системе на границе между металлами и неметаллами. Для них характерно наличие ковалентной кристаллической решётки и металлической проводимости.



# Недостатки боропластиков

---

- сложность механической обработки из-за высокой жесткости;
- высокая стоимость армирующего наполнителя;
- повышенная хрупкость, малая трещиностойкость и ударная вязкость.



# Применение боропластиков

---

Боропластики – конструкционные материалы, применяемые главным образом в авиационной и космической технике для снижения массы (на 20-40%) высоконагруженных деталей, например панелей стабилизаторов, поверхностей управления. Мировое производство боропластиков ограничивается высокой стоимостью наполнителя и составляет около 100 т/год (1985).



# Способы переработки

---

В изделия боропластики перерабатывают послойной выкладкой или (и) намоткой пропитанного связующим наполнителя (препрега) на станках-автоматах с программным управлением и последующим формованием в автоклавах при давлениях до 1,6 МПа и температурах до 300 °С. Из-за большой хрупкости и твердости борных нитей радиус их перегиба в изделии не должен превышать 50 мм, а механическая обработка изделий возможна только с применением алмазного инструмента.



# Физико-механические свойства боропластиков

Основные физико-механические свойства боропластиков, применяемых для изготовления изделий колесных машин, приведены в табл.

Показатель	<u>Эпоксидный боропластик</u>	<u>Полиимидный боропластик</u>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,1	2,0
Модуль упругости, ГПа	250	215
Прочность, МПа при растяжении	1300	1000
при изгибе*	1750	1550
при сжатии	1160	1250
при сдвиге	60	60
усталостная (10 <sup>7</sup> циклов деформации)	400	400
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	90	ПО
Предельная температура эксплуатации, °С	200	300
<u>Температура</u> , при которой сохраняется 70% исходной прочности, °С	180	250



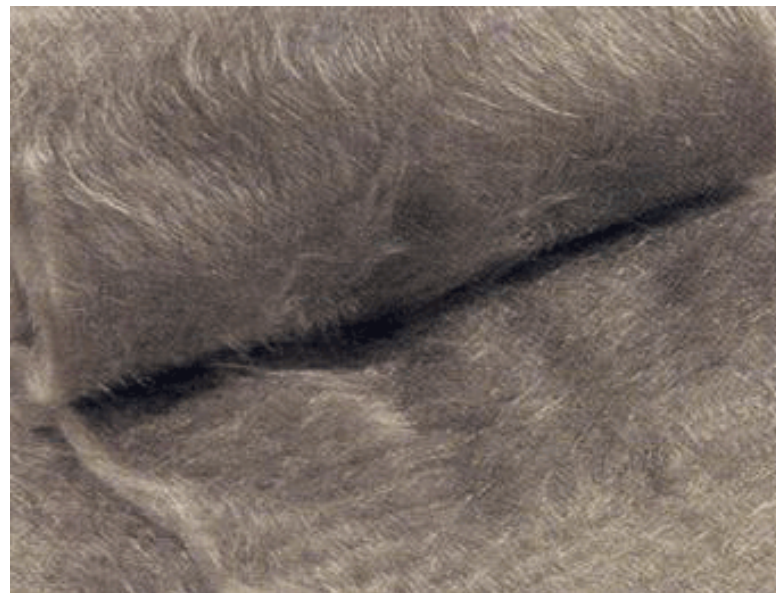
# Уровень рабочих температур

Уровень рабочих температур и ресурс эксплуатации изделий определяются термостойкостью связующего. Некоторые свойства боропластиков существенно зависят от геометрических параметров нитей. Так, с увеличением их диаметра снижаются плотность и прочность боропластиков при растяжении и повышается прочность при сжатии. Для увеличения прочности сцепления арматуры со связующим борные нити подвергают травлению в  $\text{HNO}_3$  (например, прочность при сдвиге эпоксидного боропластика повышается благодаря этому в 2 раза).



## 3.5.1 Борные волокна

Борные волокна имеют диаметр 90...200 мкм, прочность волокон  $\sigma_{\text{раст}}=2500...4000$  МПа, модуль упругости 380...420 ГПа.

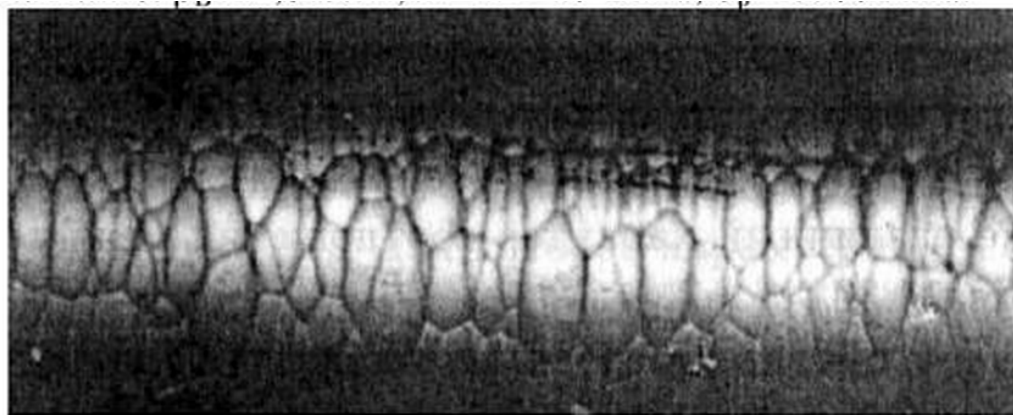




# Арматура из борных волокон

Армирующий наполнитель применяют в виде:

- мононити;
- жгутов из нескольких таких нитей, оплетенных вспомогательной стеклянной или органической нитью;
- тканей и лент, в которых борные нити или жгуты переплетены другими нитями.

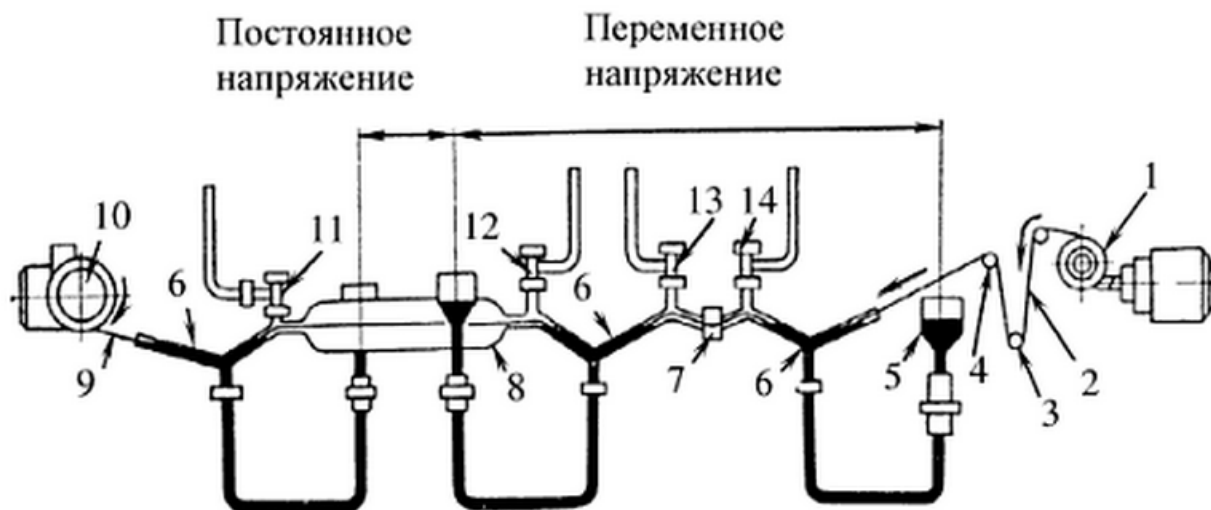
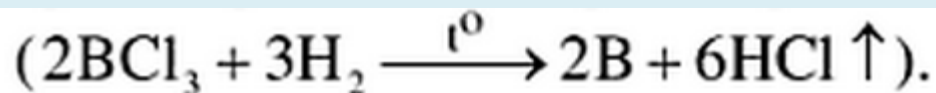


*Структура поверхности борного волокна (Б.Н. Арзамасов и др. Материаловедение. МГТУ им. Н.Э. Баумана)*



# Получение борных волокон

Непрерывные борные волокна получают путем осаждения бора из газовой фазы на предварительно очищенную и нагретую электротоком вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм. Для осуществления процесса осаждения используют химическую реакцию восстановления бора из его газообразного соединения треххлористого бора, при взаимодействии с водородом



Принципиальная схема установки для производства непрерывного борного волокна в однокамерном реакторе: 1 - подающая бобина; 2 - вольфрамовая пить; 3 - натяжное устройство; 4 - направляющее устройство; 5 - сосуд с ртутью; 6 - ртутный затвор; 7 - дегазационная камера; 8 - реактор осаждения; 9 - борное волокно; 10 - приемная бобина; 11- кран впуска водорода и треххлористого бора; 12- кран выпуска отходящих газов; 13, 14 - краны впуска и выпуска водорода



## 3.5.2 Связующие, применяемые в боропластиках

В качестве связующих в боропластиках распространение получили:

- эпоксидные смолы,
- полиимидные смолы
- другие полимеры, главным образом термореактивные.





### 3.5.3 Усталостные и демпфирующие свойства боропластиков

---

Длительная прочность при изгибе (испытания в течение 1000ч) эпоксидного и полиимидного боропластиков составляет соответственно 1370 и 1200 МПа.

Для боропластиков характерна малая ползучесть (до 0,2%) в направлении ориентации нитей.



## 3.5.4 Стойкость боропластиков к воздействию агрессивных сред

---

При длительном (до 10 лет) воздействии воды, смазочных материалов, атмосферных факторов механические свойства боропластиков снижаются не более чем на 10-15%.



## 3.5.5 Ударная вязкость боропластиков

---

Боропластики обладают малой ударной вязкостью, которая может быть улучшена введением в их состав стеклянных или других волокон; при этом снижается и стоимость боропластиков.



# Отличительные особенности армированных пластиков

Композиционный материал	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении / сжатии	Модуль упругости при растяжении	Деформативность и демпфирующая способность	Сопротивление многоцикловой и длительной усталости	Особенности
Стеклопластик	1,6 до 2	1,6-2,1 ГПа	36-70ГПа	Средняя	Низкое	Низкая теплостойкость
Углепластик	1,45 до 1,54	0,4-,1,5 ГПа	120-180ГПа	Низкая	Очень высокое	Хрупкие, очень высокие теплофизические свойства
<u>Базальтопластик</u>	1,36 до 1,88	0,290-0,440 ГПа	23-37 (реже до 75) ГПа	—	—	<u>Экологичность</u> , высокая термостойкость, хорошие антифрикционные свойства
Органопластик	1,25 до 1,58	1,2-2,5 ГПа	53-95 ГПа	Высокая	Высокое	Очень низкий модуль упругости при сжатии (E=13-16 ГПа)
<u>Боропластики</u>	2,0 до 2,1	1,3 – 1,6 ГПа	215-250 ГПа	Низкая	Высокое	Хрупкость, высокая стоимость



## 3.6 Гибридные композиционные материалы

Гибридными композиционными материалами (ГКМ) называют материалы, содержащие в своем составе три или более компонентов, регулирующие свойства композитов.

Полиматричными (или гетероматричными) называют материалы, состоящие из двух или более матричных компонентов, отделенных один от другого поверхностями раздела, причем армирующие волокна могут сохранять непрерывность на границе раздела матриц.

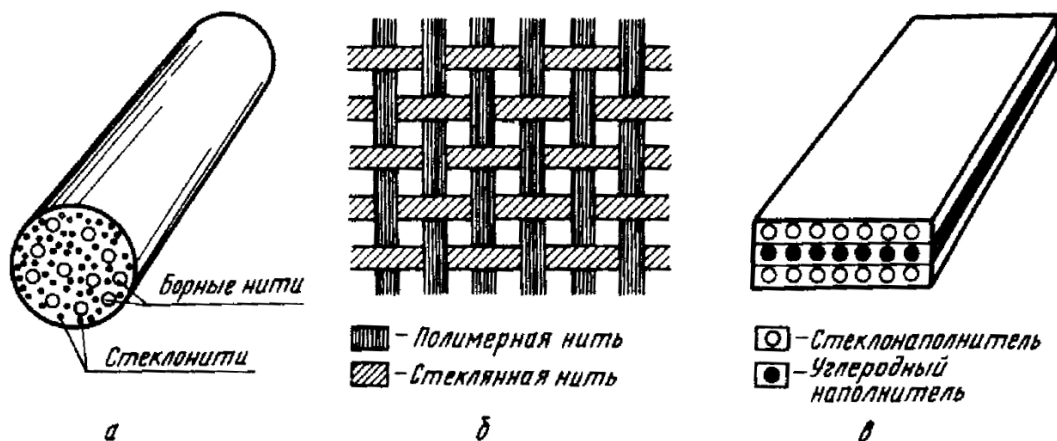
Полиармированные (поливолокнистые) КМ состоят из одной матрицы с распределенными в ней армирующими компонентами различных видов.



# Варианты гибридных структур

Возможны различные варианты сочетаний непрерывных армирующих волокон:

- создание гетероволокнистых материалов по принципу однородных смесей – волокна различных типов равномерно распределяются в первичной нити, ленте или жгуте (рис. а);
- использование многокомпонентного армирующего материала – ткани, мата или шпона из различных нитей и жгутов (рис. б);
- чередование слоев листовых армирующих материалов с различными волокнами по слоям (рис. в).



Варианты гибридных структур:

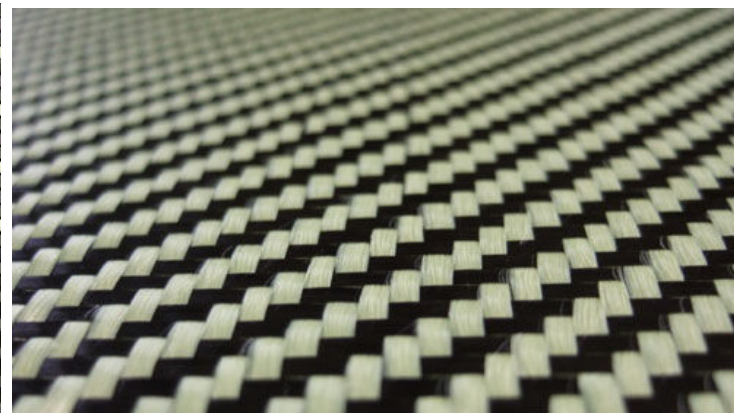
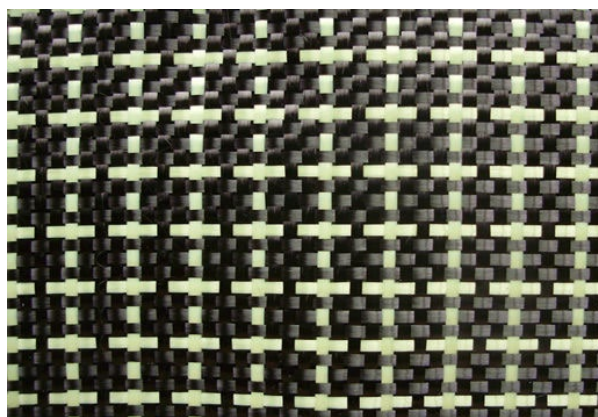
- а – гетероволокнистые нити; б – многокомпонентные ткани;  
в – слоистые ГКМ



# Причины использования ГKM

Существуют две основные причины, приводящие к необходимости использования гибридных композитов:

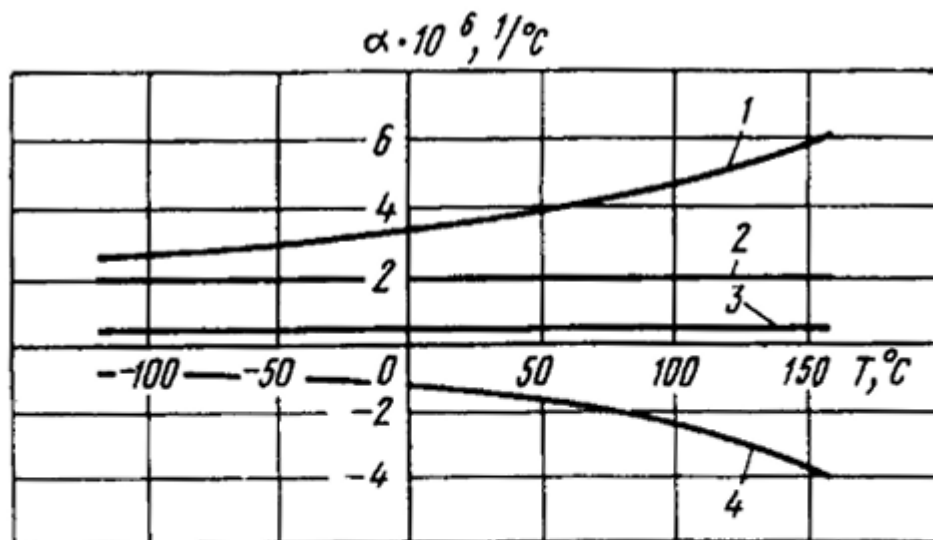
- включение волокон, превосходящих по каким-либо параметрам другие волокна, входящие в композит, помогает ликвидировать недостатки этих волокон;
- снижение цены получаемого ГKM.





# Коэффициент линейного термического расширения ГKM

Коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) у стеклоуглепластиков и органоуглепластиков может не зависеть от температуры в диапазоне от  $-120$  до  $+166$  °C (рисунок), тогда как у обычного стеклопластика и углепластика эта характеристика значительно изменяется с увеличением температуры эксплуатации.



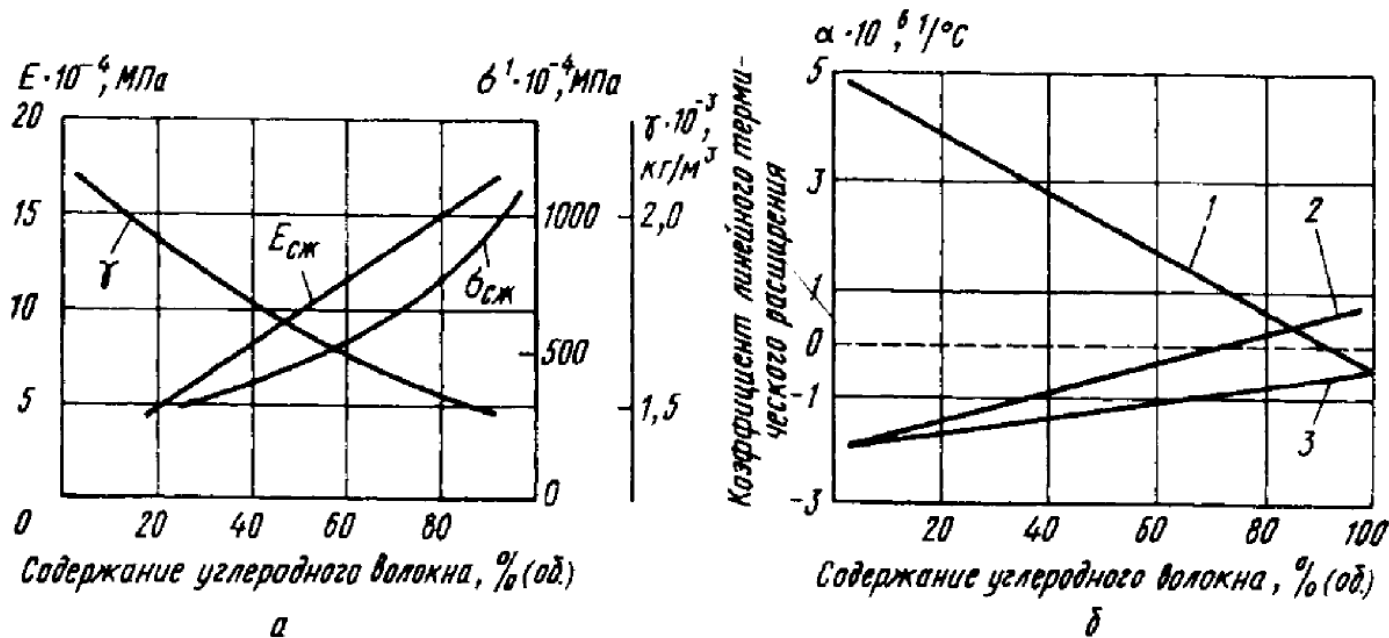
Зависимость коэффициента линейного термического расширения от температуры для различных ГKM:

1 – стеклопластик; 2 – стеклоуглепластик; 3 – органоуглепластик; 4 – углепластик



# Зависимость физико-механических свойств ГKM от содержания волокон

Гибридизация оказывает большое влияние на модуль упругости ГKM, прочность при сжатии, ударную вязкость, тепловые характеристики. Уровень этих и других свойств определяется относительным содержанием волокон в ГKM (рисунок).



Зависимость физико-механических свойств ГKM от содержания

волокон:

- а – для стеклоуглепластика; б – для различных ГKM; 1 – стеклоуглепластик;
- 2 – органоуглепластик (СВМ + УКИ); 3 – органоуглепластик (СВМ + ВМИ)



# Классификация ГKM

В соответствии с типом распределения компонентов ГKM обычно подразделяют следующим образом:

- однородные, характеризующиеся равномерным распределением каждого армирующего компонента по всему объему материала;
- материалы с линейной неоднородностью, в которых волокна одного вида (или обоих видов) объединяются в жгуты, равномерно распределенные по объему материала;
- композиты с плоскостной неоднородностью, когда волокна каждого вида образуют чередующиеся слои;
- макронеоднородные композиты, в которых разнородные волокна образуют зоны, соизмеримые с характерным размером изделия.



# Получение однородных ГКМ

Однородные полиармированные материалы получают двумя способами:

- 1) совместной намоткой мононитей двух видов, например, углеродных и стекловолокон;
- 2) использованием комплексных нитей, в которых равномерно распределены волокна

различных видов.

При таком взаимном расположении волокон остаточные напряжения КМ сводятся к минимуму и улучшаются условия перераспределения напряжений в процессе нагружения материала, однако технология получения таких КМ сложна в частности получение первичной нити или жгута из различных волокон не всегда возможно, так как технологические процессы изготовления волокон могут принципиально различаться, а собрать готовые разнородные волокна в жгут достаточно трудно.



# Получение линейно неоднородного ГКМ

Для формирования линейно неоднородного полиармированного КМ используют:

- 1) совместную намотку жгутов различных типов или жгутов из моноволокон;
- 2) создание многокомпонентного наполнителя – тканей, матов или шпона.

Второй способ, несомненно, более технологичен, однако и в этом случае возникают затруднения, связанные с текстильной переработкой хрупких высокомодульных волокон.



# Получение ГКМ с плоскостной неоднородностью

Наиболее технологичными являются композиты с плоскостной и макронеоднородностью, получаемые выкладкой однородных слоев согласно заданной схеме армирования.

К недостаткам таких материалов относится наличие в них термических напряжений, возникающих в процессе формования КМ или при изменении температуры его эксплуатации. Эти напряжения необходимо учитывать при выборе состава, схемы армирования и технологии изготовления деталей.



# Технологические свойства ГКМ

---

Следует отметить, что принцип полиармирования помимо возможности регулирования физико-механических свойств композитов позволяет заметно улучшить их технологические свойства. Так, применение стеклянных волокон в качестве оплеточных в комплексной нити препятствует вытеканию связующего при формировании и способствует уменьшению пористости конечного продукта.



# Модели механического поведения ГКМ

К наиболее изученному типу ГКМ относятся полиармированные. Одновременно с накоплением экспериментальных данных об упругомеханических свойствах КМ предпринимались попытки теоретически оценить основные характеристики материалов и разработать модели их механического поведения (деформирования и разрушения).

Характеристиками структуры ГКМ обычно считают:

- 1) направление и взаимное расположение разнородных армирующих волокон (тип и схема армирования),
- 2) объемное содержание волокон и относительное содержание одного из армирующих компонентов в другом.



# Диаграмма растяжения ГКМ

Диаграмма растяжения моноармированных КМ с высокопрочными высокомодульными волокнами практически линейна вплоть до разрушения. Лишь для органопластиков наблюдается заметное отклонение от линейности при напряжениях, составляющих более 0,6 от предельных.

Для ГКМ, в которых совмещены волокна с различным предельным удлинением, вид диаграммы зависит от соотношения компонентов.

При возрастании доли низкомодульных волокон на диаграммах появляется излом при деформации, примерно соответствующей предельной для высокомодульных волокон. Далее на кривых может появиться провал, площадка “псевдотекучести” или последовать плавное повышение нагрузки с меньшим эффективным модулем упругости, примерно равным модулю упругости КМ с соответствующим содержанием низкомодульных волокон.



# Прочность и предельная деформация ГКМ

---

На кривых зависимости прочности и предельной деформации КМ от относительного содержания низкомодульных волокон можно выделить два участка:

- на первом предельное удлинение гибридного КМ примерно равно предельному удлинению высокомодульных волокон, а прочность ГКМ меньше прочности моноармированного КМ с высокомодульными волокнами;
- на втором участке предельное удлинение КМ резко возрастает до значений, близких к предельному удлинению моноармированного КМ с низкомодульными волокнами, а прочность начинает линейно возрастать, приближаясь к прочности КМ с низкомодульными волокнами.



# Надежность ГKM

ГKM могут быть более надежными, чем моноармированные. Так для углестеклопластика с увеличением доли стеклянных волокон относительная деформация (прогиб) при ударном растяжении или изгибе возрастает в 3,5 раза, в несколько раз увеличивается время до разрушения, максимальная нагрузка сохраняется на прежнем уровне, а при некоторых схемах армирования даже возрастает.

Еще одной характеристикой надежности KM является вязкость разрушения (трещиностойкость), которая часто определяется коэффициентом интенсивности напряжений, характеризующим степень возрастания напряжений при приближении к дефектной области в материале, например, к вершине трещины.



# Длительная прочность и ползучесть ГКМ

Используя принцип полиармирования, длительную прочность и ползучесть КМ можно регулировать либо введением более высокомодульного армирующего компонента, либо улучшением сопротивления ползучести матрицы армированием ее дисперсными частицами. При этом следует помнить, что их содержание должно быть таким, чтобы предельные деформации матрицы, превышающие предельную деформацию волокон, сохранялись на требуемом уровне.

Основным достоинством волокнистых конструкционных КМ является возможность их работы без снижения несущей способности при значительном количестве накопленных повреждений, другими словами, – повышенное сопротивление развитию разрушающих трещин.



# Перспективы применения ГКМ

---

Возможность варьирования свойств гибридных КМ в достаточно широком интервале путем изменения комбинаций армирующих волокон и их соотношения делает эти материалы весьма перспективными для использования в различных областях промышленности. Такие гибридные композиты более дешевы и обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными КМ. Например, гибридный материал, содержащий 20 % углеродных волокон и 80 % стеклянного волокна, обладает прочностью, равной 75 % от прочности КМ, армированного только углеродными волокнами, а его стоимость составляет 30 % от стоимости обычного углепластика.



## 3.7 Интеллектуальные композиционные материалы (ИМ)

В настоящее время достаточно актуальна задача превращения композитов из «черного ящика» в надежные контролируемые системы с предсказуемым поведением материалов.

Введены два новых для материаловедения понятия:

«Приобретение материалом навыков»

«Ощущение материалом предельной ситуации»



# Приобретение материалом навыков

---

Под «приобретением навыков» понимается улучшение адаптивного ответа в результате обучения, т. е, достижение наилучшей реакции ИМ на изменяющиеся условия окружающей среды.

Материаловеды обеспечивают это выбором при проектировании ИМ соответствующего состава и конструкции для заданной функции.



# Ощущение материалом предельной ситуации

---

«Ощущении предельной ситуации» материалом базируются на нелинейных характеристиках компонентов и на модификация свойств.

Поскольку такой материал для своего выражения должен обновляться и становиться как бы другим, ему требуется несколько нелинейно меняющихся свойств.



# Элементы интеллектуального материала

---

Для обеспечения рассмотренных требований *концепция ИМ* включает следующие основные элементы:

- контроль базовых функций;
- оптимизацию свойств путем обучения;
- выбор нового поведения ИМ, исходя из настроенности на окружающую среду (датчик);
- анализ ситуации (процессор);
- способность реагировать (актуатор).



# Определение ИМ

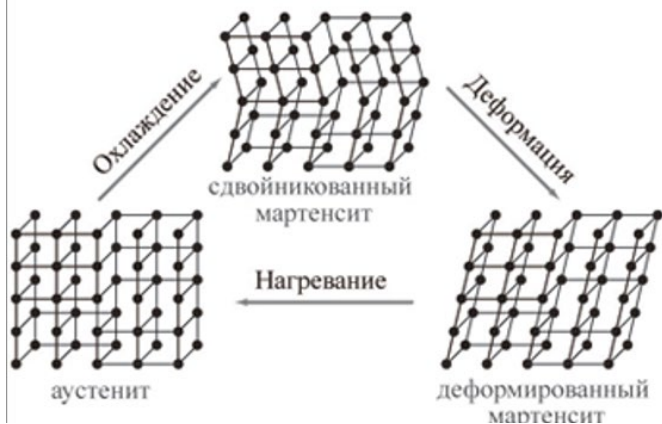
Таким образом, ИМ – это новые виды функциональных материалов, обладающих признаками целых устройств или узлов конструкций, способностью «ощущать» внешние воздействия и собственное состояние, контролируемым образом реагировать на эти ощущения.

«Умные» материалы иначе «интеллектуальные» материалы (англ. smart materials) — класс различных по химическому составу и агрегатному состоянию материалов, которые объединяет проявление одной или нескольких физических (оптических, магнитных, электрических, механических) или физико-химических (реологических и др.) характеристик, значительно (обратимо или необратимо) изменяющихся под влиянием внешних воздействий: давления, температуры, влажности, pH среды, электрического или магнитного поля и др.

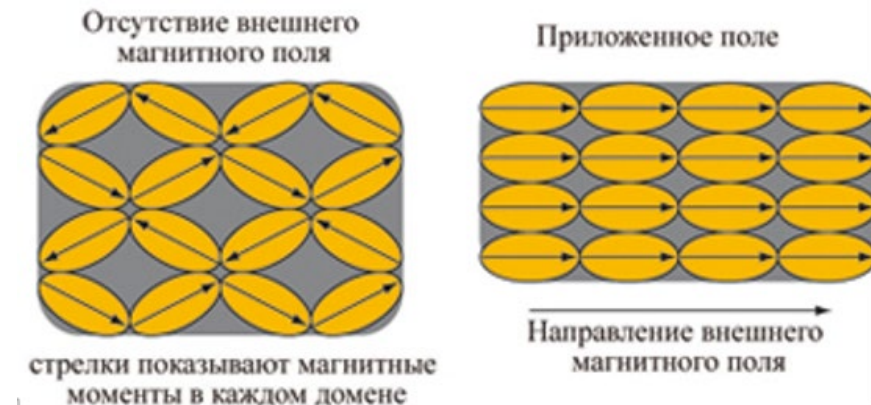


# Примеры материалов

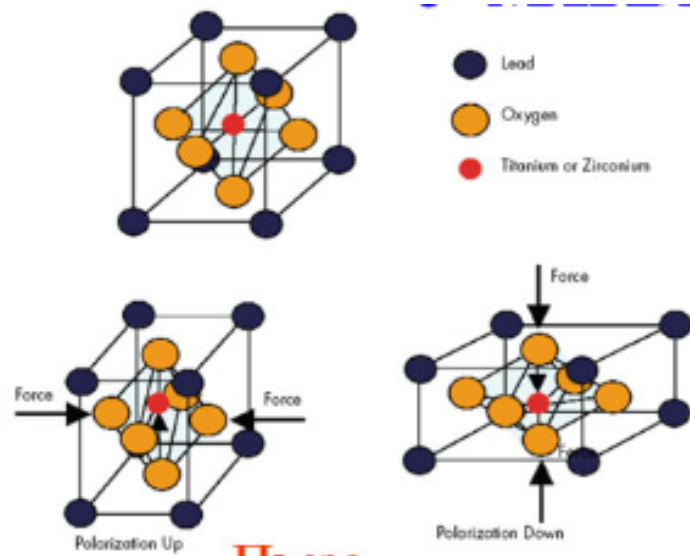
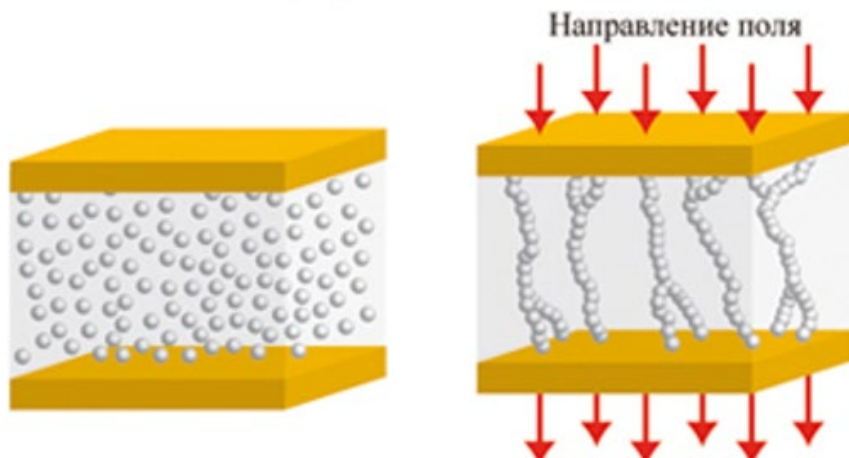
## Сплавы с памятью формы



## Магнитно (электро)-стрикционные материалы



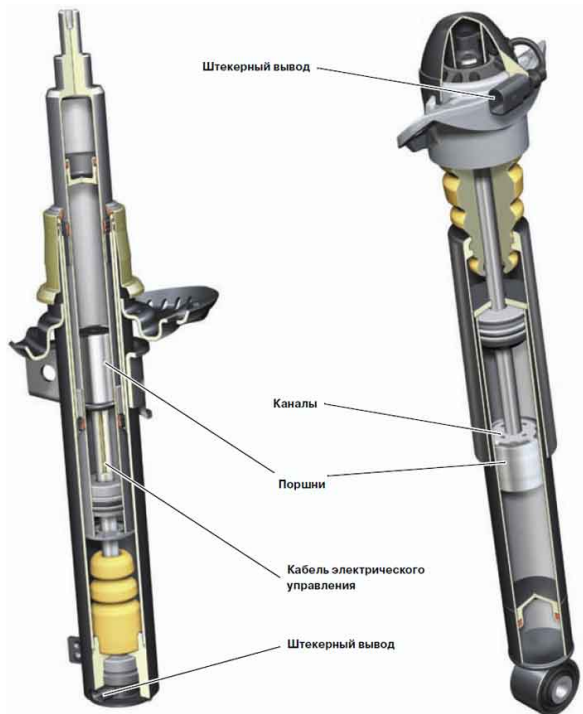
## Магнито- и электрореологические материалы



**Пьезо-**



# Примеры конструкций



Амортизатор  
передней оси

Амортизатор  
задней оси



Набухающий полимер  
для гидроизоляции.





# Типы конструкций ИМ

Конструкция интеллектуального композиционного материала

*Пассивная*

*Реактивная*

*Интеллектуальная*

- 1) *пассивная* – проектируемая для диагностики состояния;
- 2) *реактивная* – обладающая структурно-интегрированной системой оптических микродатчиков и актюаторной управляющей системой;
- 3) *интеллектуальная* – способная к адаптивному обучению и изменяющая характер своего реактивного ответа в зависимости от условий и приобретенного опыта.



# Основа ИМ

Современные ИМ – по сути КМ, основанные на использовании:

- компонентов с памятью формы;
- пьезоэлектрических и магнитных сплавов;
- полимеров;
- керамик;
- электрореологических жидкостей;
- волоконной оптики и др.

«Умная» конструкция, содержащая встроенные датчики, актуаторы и микропроцессоры, работающие в интерактивном режиме, может демпфировать свои опасные вибрации и «замечать» деструкцию, нарушение структурной целостности. Если при этом в качестве основного конструкционного материала применяются КМ, то актуаторами являются монолитные приводные элементы, не содержащие трущихся частей.



# Задачи, решаемые при изготовлении изделий из ИМ

---

Фундаментальные задачи, решаемые с помощью ИМ при создании изделий и конструкций, могут быть сформулированы следующим образом:

- 1) отслеживание конструкций и оценка повреждений;
- 2) обеспечение работоспособности, обслуживания и контроля систем и вспомогательных установок;
- 3) контроль хода технологических процессов, в частности при изготовлении изделий из ПКМ и при автоматизации технологических процессов.



# Технологические процессы при изготовлении изделий из ИМ

Особенности технологических процессов изготовления КМ, сложность и многостадийность делают эти материалы достаточно дорогими в обработке.

Попытки создания более дешевых материалов приводят к получению неконкурентоспособных в сравнении с другими материалами изделий. Поскольку сложность технологии, а иногда и дороговизна исходных материалов есть характерная черта армированных пластиков, пути их развития и коммерциализации лежат в области высоких технологий и, в частности, технологии ИМ.



# Контактная информация

---

e-mail: [abkartashov@mail.ru](mailto:abkartashov@mail.ru);  
рабочий телефон : 18-09;  
мобильный телефон: +7(926)275-0886.

**Спасибо за внимание!**