



**МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)**

---

**Особенности выбора связующих и  
наполнителей для производства деталей  
машин из ПКМ**

**Баурова Н.И.  
доктор технических наук  
профессор кафедры  
«Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин»**

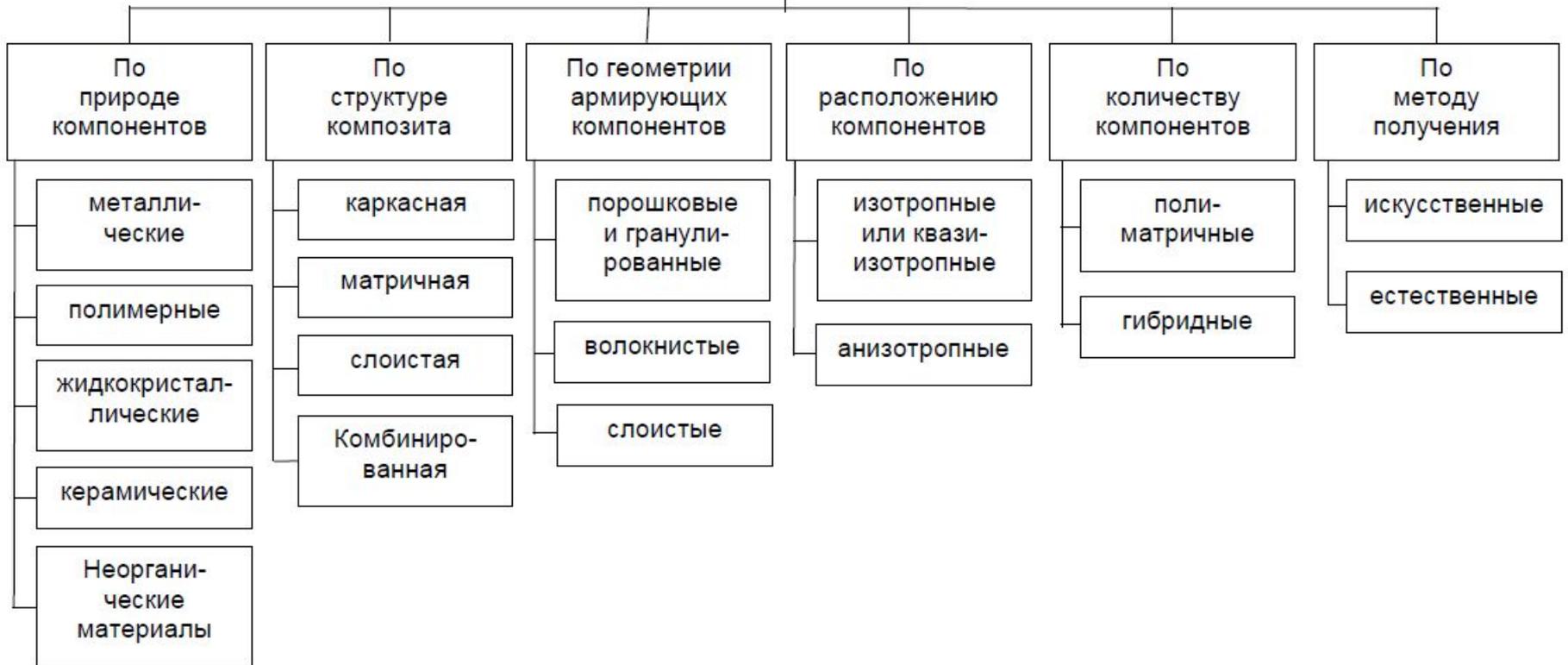
# Определение композиционного материала

Альберт Дитц (1950г.), проф. Массачусетского университета  
«Совместная работа разнородных материалов дает эффект равносильный созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих»

## Определения композиционного материала (КМ)

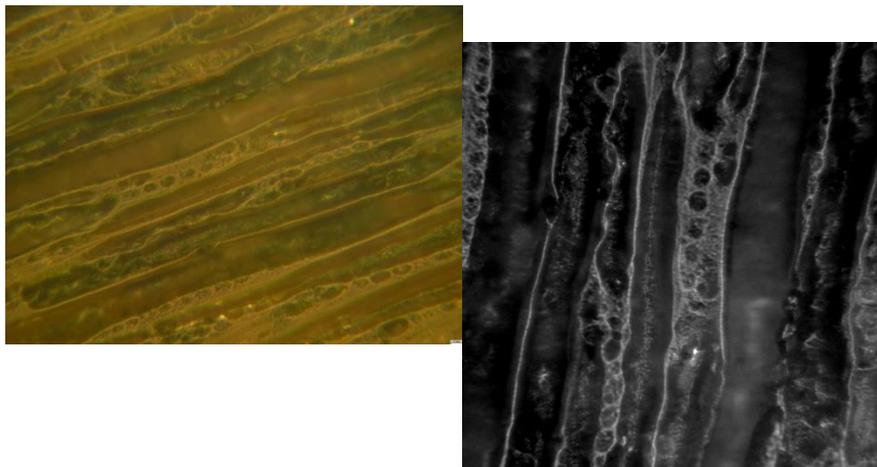
- КМ – монолитные гетерогенные системы где компоненты разграничены поверхностью раздела.
- КМ – это объемное искусственное сочетание разнородных по форме и свойствам двух и более компонентов с четкой границей раздела.
- КМ – материалы, состоящие из двух или более компонентов или фаз (это определение чаще других используется, но оно не корректно).

# Классификация композиционных материалов



# Примеры композиционных материалов

Дерево



Кости, ракушки



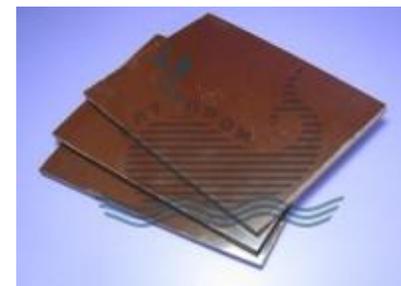
Армированная  
глиной солома



Пенобетон



**Фанера**  
(многослойный материал,  
состоящий из  
однаправленных  
слоев древесного  
шпона)



**Гетинакс** (ПКМ на основе бумажного наполнителя)

# Состав полимерного материала

## Наполнитель (1)

Основное назначение **наполнителя** (1) – армировать, т. е. упрочнять матрицу и при необходимости придавать материалу анизотропные свойства.

## Матрица (3)

Связывает между собой наполнитель и обеспечивает совместную работу всех моноволокон (частиц) наполнителя. Матрица представляет собой непрерывную фазу.

## Межфазный слой (2)

Свойства материала на границе раздела матрица – наполнитель существенно отличаются от свойств каждого из этих компонентов. Этот слой получил название – **межфазный слой** или межфазная зона. Его толщина обычно составляет несколько атомов.

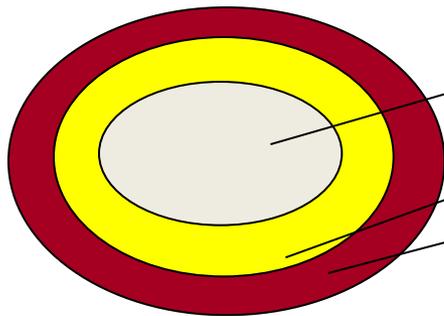
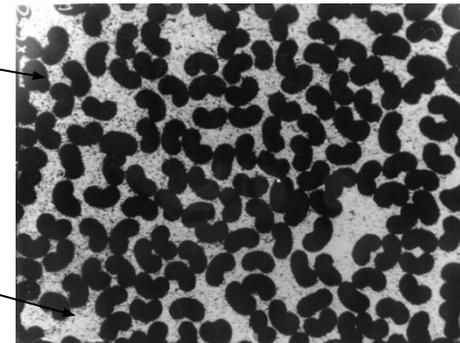


Схема структуры

1

2

3



Реальная структура

## Назначение компонентов

**Основное назначение связующего (матрицы)** – обеспечить монолитность материала и передачу (распределение) напряжений. От свойств связующего практически полностью зависят: тепло- и термостойкость, стойкость к действию различных рабочих сред (вода, пар, топлива, масла и др.), ударная вязкость, ударная прочность, стойкость к длительному воздействию знакопеременных нагрузок, ползучесть, релаксация напряжений. После отверждения (для терморезактивных материалов) или застывания (для термопластичных) связующее превращается в матрицу.

### **Идеальное связующее должно обладать следующими свойствами:**

1. Деформационные свойства матрицы должны быть не ниже, чем у наполнителя  $\varepsilon_{\text{м}} > \varepsilon_{\text{н}}$ ;
2. Относительно большой модуль упругости ( $E > 2000$  МПа);
3. Хорошая адгезия к наполнителю ( $\tau_{\text{сд}} > 20$  МПа).

### **Выбор связующего определяется:**

- 1) Предполагаемой технологией формования;
- 2) Типом производства;
- 3) Геометрическими особенностями и массой детали;
- 4) Технологическими и эксплуатационными свойствами детали.

# Назначение компонентов

**Основное назначение наполнителя** – придание полимеру требуемых специальных свойств и уменьшение стоимость детали.

От свойств наполнителя практически полностью зависят: предел прочности при растяжении, модуль упругости, твердость, коэффициент трения, износостойкость, теплопроводность, электрические и акустические свойства.

**Идеальный наполнитель должен обладать следующими свойствами:**

1. Большой модуль упругости (чем больше, тем лучше);
2. Хорошей адгезией к связующему ( $\tau_{сд} > 20$  МПа);

**Выбор наполнителя определяется:**

- 1) Предполагаемой технологией формования;
- 2) Назначением детали и ее эксплуатационными свойствами ;
- 3) Геометрическими особенностями и массой детали;
- 4) Экономическими факторами.

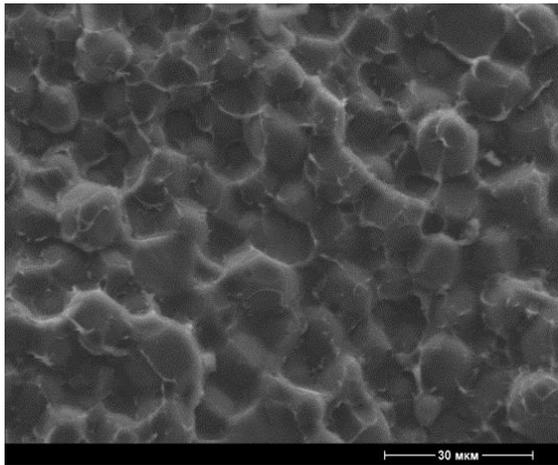
# Состав материала

В одном материале может быть несколько матриц и (или) несколько типов наполнителей.

Если в качестве связующего используют смеси полимеров (или олигомеров), то такие связующие называют **гетерогенными**, **полиматричными** или **гетероматричными**.

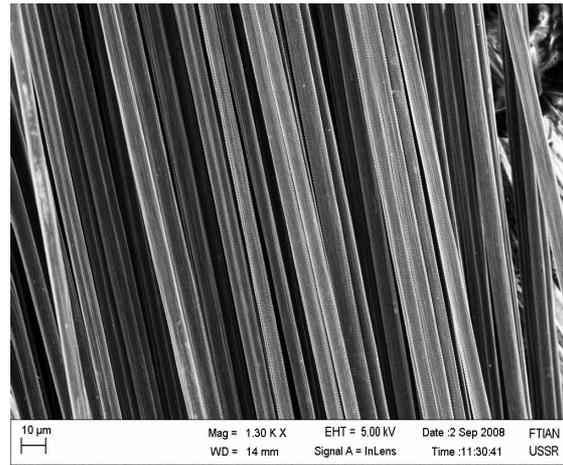
Если в качестве наполнителей используются разные типы волокон или дисперсных наполнителей, то такие материалы называют **гибридными**.

## Гибридная матрица

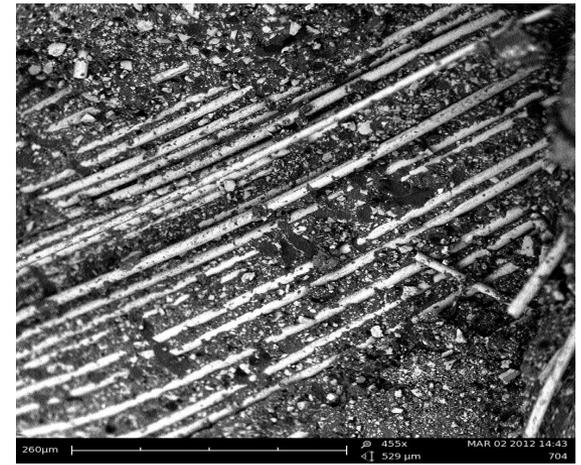


Структура эпокси-полисульфоновой матрицы (содержание полисульфона 20 мас.ч.)

## Гибридный наполнитель

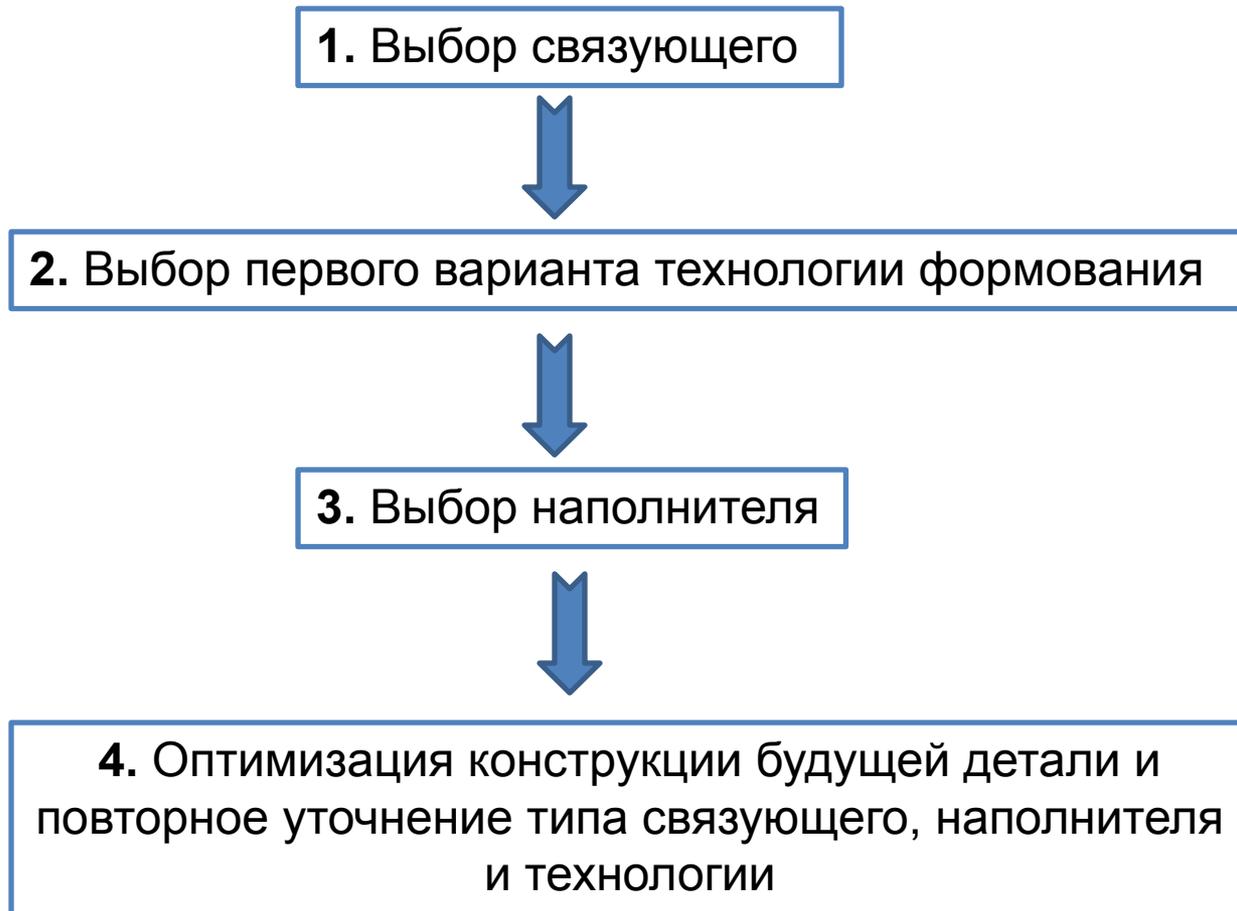


Углеродная лента, содержащая органическую нить



Структура стеклопластика на основе полиэфирной матрицы с содержанием гидроксида алюминия 50 мас.ч.

# Выбор компонентов ПКМ

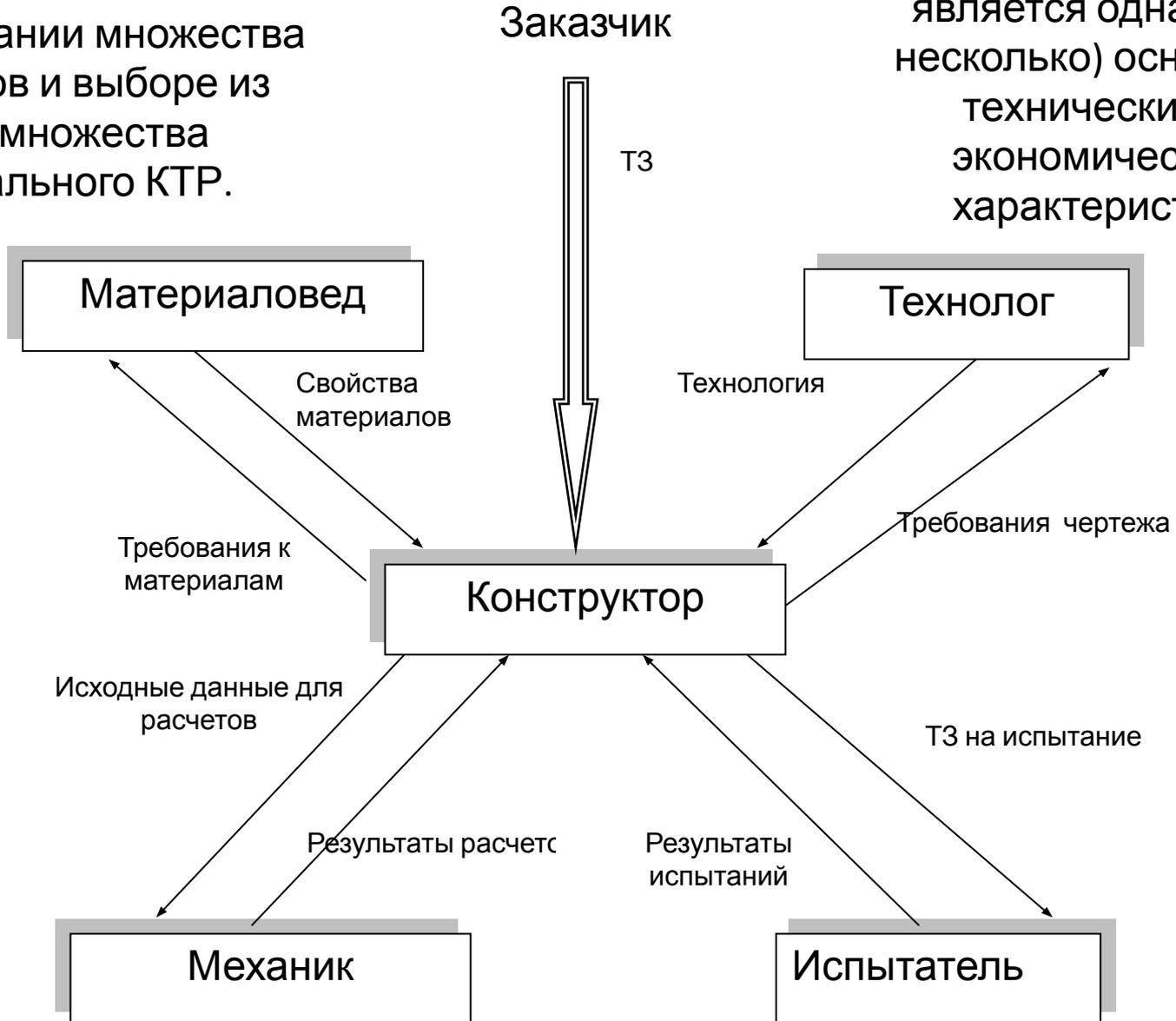


Выбор компонентов связующего нельзя проводить в отрыве от конструкции детали и технологии ее формования. При проектировании изделий из ПКМ не разделяют работу конструктора, материаловеда и технолога и говорят о **едином конструкторско-технологическом решении** (КТР).

# Особенности проектирования изделий из полимеров

Единое КТР заключается в генерировании множества вариантов и выборе из этого множества оптимального КТР.

Критерием оптимальности является одна (или несколько) основных технических и экономических характеристик.



# Особенности изготовления композиционных материалов

1. Свойства формируются в процессе производства конкретных конструкций;
2. Процесс проектирования детали начинается с проектирования (а не с выбора) самого материала;
3. Без учета особенностей технологии формообразования детали нельзя определить свойства композита;
4. Конструирование материала, разработка технологии и конструирование детали – это единый, взаимосвязанный процесс с несколькими этапами оптимизации.
5. Принципиальная особенность технологии КМ заключается в том, что два вещества с контролируемыми свойствами (матрица и наполнитель), наделяемые различными функциями в конструируемом материале изготавливаются отдельно, а затем совмещаются.

# Факторы, определяющие свойства композита (правило смесей)

**Один компонент + второй компонент = новый материал**  
**(матрица) + (наполнитель) = композит**  
 25-50 об.%                      75-50 об. %                      = 100 об. %

$X_K = X_M v_M + X_N v_N$  – правило (закон) смесей или аддитивности       $v_M + v_N = 1$

$\sigma_K = \sigma_M v_M + \sigma_N v_N$

$\rho_K = \rho_M v_M + \rho_N v_N$

$E_K = E_M v_M + E_N v_N$

$v_M$  – объемная доля матрицы;       $X_N$  – некоторая характеристика наполнителя;  
 $v_N$  – объемная доля наполнителя;       $X_M$  – некоторая характеристика матрицы.

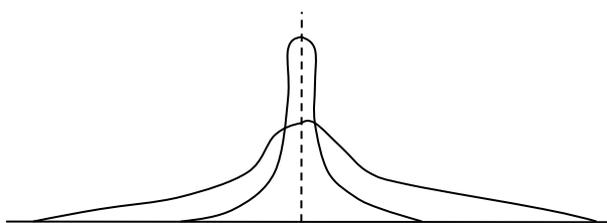
Свойства	Углеродное волокно		Эпоксидная матрица
	Высокомодульное	Высокопрочное	
Модуль, ГПа	230...530	210...350	4
Прочность при растяжении, ГПа	1,9...2,1	2,5...3,2	0,09

# Правило смесей для волокнистых композитов

Правило смесей **выполняется** для определения:

- **продольного модуля упругости;**
- **модуля сдвига** однонаправленного материала в плоскости волокон;
- **прочности** при продольном растяжении;
- **плотности.**

Правило смесей справедливо только при малой дисперсии прочности волокон. Узким распределением обладают только металлические волокна.



Правило смесей **НЕ выполняется** для определения:

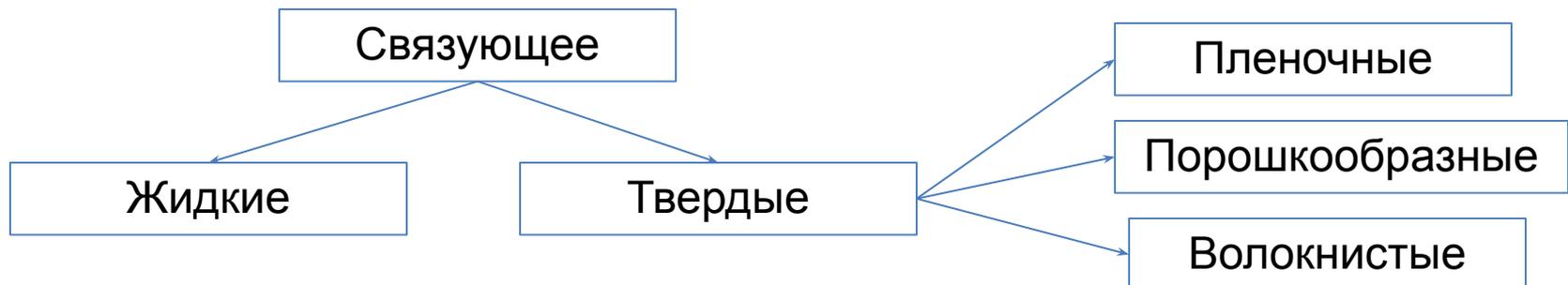
- **поперечного модуля упругости** (определяется жесткостью матрицы и ее объемным содержанием);
- **прочности при поперечном растяжении** (определяется прочностью матрицы);
- **прочности при продольном сдвиге** (сдвиговая нагрузка приложена параллельно волокнам. Определяется адгезионной прочностью матрица-волокно);
- при низких концентрациях коротких волокон.

# Классификация связующих

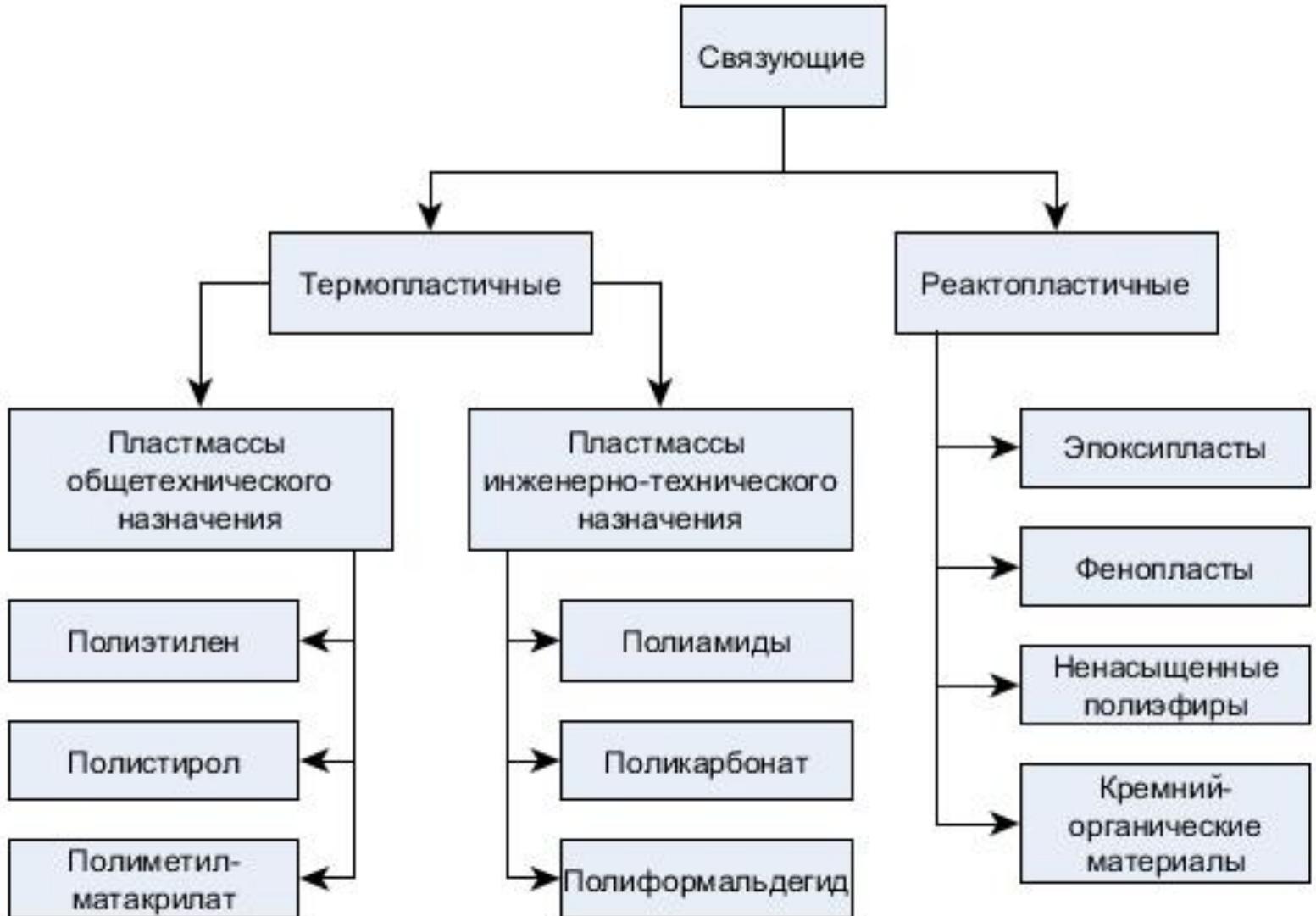
**ТЕРМОПЛАСТЫ** – термопластичные полимеры (в исходном состоянии представляют собой твердые материалы), которые при нагревании размягчаются, а при охлаждении затвердевают. Это обратимый процесс, полимеры в этом случае не претерпевают никаких химических изменений, и у них сохраняется способность к повторным переработкам в новые изделия.

**РЕАКТОПЛАСТЫ** – терморезактивные полимеры, которые при нагревании структурируются и превращаются в твердые неплавкие и нерастворимые продукты, не способные к повторному формованию. В исходном состоянии представляют собой чаще всего жидкие материалы.

**ОТВЕРЖДЕНИЕ** – это процесс, при котором жидкие полифункциональные мономеры либо реакционно-способные олигомеры необратимо превращаются в твердые, нерастворимые и неплавкие полимеры. Отверждаются только реактопласты.



# Классификация связующих



# Физические состояния матриц до и после формования

	Матрица		Наполнитель
	Терморреактивная	Термопластичная	
Исходное фазовое состояние	Может быть жидкой или твердой	Только твердая (порошок, гранулы, пленка)	Только твердый
Физическое состояние до отверждения	Высокоэластическое; Вязкотекучее	Кристаллическое; Аморфное (стеклообразное)	В процессе отверждения не изменяется
Физическое состояние после отверждения	Стеклообразное	Нет процесса отверждения (затвердевание при охлаждении)	В процессе отверждения не изменяется

# Классификация и свойства термопластичных связующих

Назначение	Материалы	Свойства
Пластмассы общетехнического назначения	Полиэтилен	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 900-970 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 10-20; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 15-40; Относительное удлинение, % 70-700.
	Полистирол	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1000-1100 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 30-60; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 50-100; Относительное удлинение, % 1-3.
	Полиметилметакрилат	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1100-1300 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 10-50; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 100-120; Относительное удлинение, % 50-250.

# Классификация и свойства термопластичных связующих

Назначение	Материалы	Свойства
Пластмассы инженерно-технического назначения	Полиамиды	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1000-1200 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 50-120; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 60-120; Относительное удлинение, % 80-280
	Поликарбонат	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1200-1400 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 50-70; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 80-120; Относительное удлинение, % 5-120.
	Полиформальдегид	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1400-1450 Разрушающее напряжение при растяжении, МПа 70-80; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 100-120; Относительное удлинение, % 15-50.

# Классификация и свойства термореактивных связующих

Материал	Свойства	Режим отверждения
Фенопласты	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1200-1500 Разрушающее напряжение при сжатии, МПа 50-100; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 50-60; Относительное удлинение, % 5-20	Только при повышенных температурах
Эпоксипласты	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1200-1300 Разрушающее напряжение при сжатии, МПа 120-150; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 80-110; Относительное удлинение, % 0,1-3	При комнатой и при повышенной температурах
Ненасыщенные полиэфирные	Плотность, кг/м <sup>3</sup> 1300-1600 Разрушающее напряжение при сжатии, МПа 80-140; Разрушающее напряжение при изгибе, МПа 60-180; Относительное удлинение, % 0,5-8	При комнатой и при повышенной температурах

# Классификация и свойства термореактивных связующих

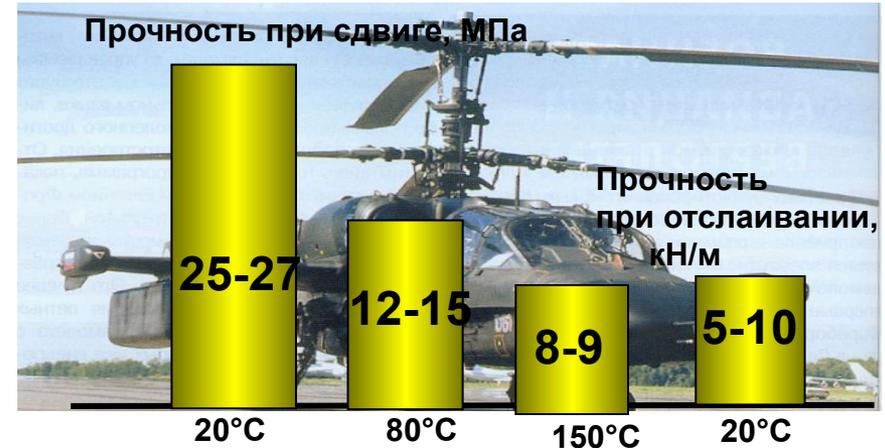
Материал	Преимущества	Недостатки
Фенопласты	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Относительно высокая обратимая деформация (до 8%);</li> <li>2. Высокая теплостойкость (до + 250°C);</li> <li>3. Большой сухой остаток (кокс) до 40 %.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая адгезионная прочность;</li> <li>2. Большая усадка.</li> </ol>
Эпоксипласты	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность получать связующие в жидком и твердом состоянии;</li> <li>2. Способность отверждаться в широком диапазоне температур;</li> <li>3. Хорошие конфигуционные и адгезионные свойства;</li> <li>4. Хорошие механические и диэлектрические свойства;</li> <li>5. Стойкость к действию воды, кислот и щелочей.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Высокая хрупкость;</li> <li>2. В процессе отверждения может иметь место экзотермическая реакция, сопровождающая сильным разогревом;</li> <li>3. Низкая теплостойкость (как правило, не более 200°C).</li> </ol>
Ненасыщенные полиэфирные	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Удовлетворительная прочность;</li> <li>2. Минимальная (по сравнению с другими связующими) стоимость.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Низкая адгезионная прочность;</li> <li>2. Большая усадка.</li> </ol>

# Высокопрочные пленочные эпоксидные связующие конструкционного назначения

Высокопрочные клеи ВК-36, ВК-36Р,  
ВК-41М, ВК-46Б, ВК-51 и их модификации



Высокоэластичные клеи ВК-25, ВК-32-200,  
ВК-50, ВК-3



Предназначены для изготовления сотовых и слоистых силовых конструкций из металлов и ПКМ

Наименование свойств	Марка клея (НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ!)	
	ВК-36РМ	ВК-36Т
Предел прочности при сдвиге, МПа, при температуре испытания, °C		
20	34,5	29,0
150	20,5	28,0
180	-	20,0
Температура отверждения, °C	155±5	175±5
Особые свойства	Пониженная температура отверждения	Повышенная теплостойкость

# Классификация наполнителей

## Волокнистые наполнители



- тканые наполнители (ткани, маты);
- непрерывные волокна (ленты, нити);
- рубленные волокна.



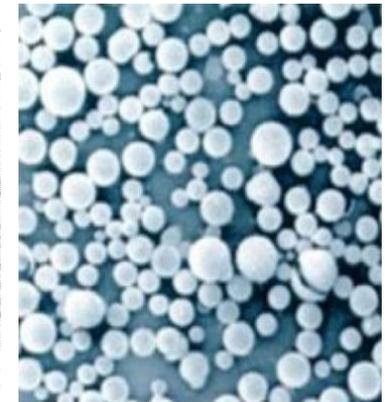
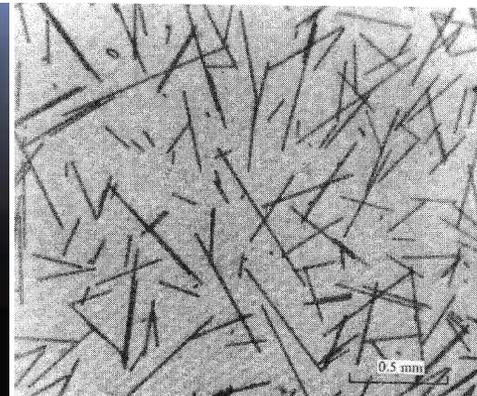
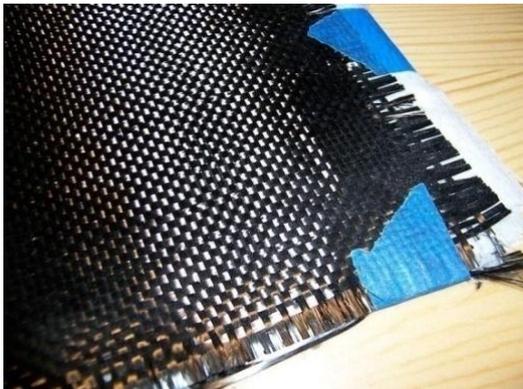
### **Типы упаковок частиц наполнителей:**

- 1) Наполнитель одного типа;
- 2) Несколько однотипных наполнителей;
- 3) Волокна распределенные среди дисперсных наполнителей;
- 4) Дисперсные наполнители распределенные среди волокон.

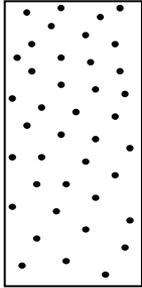
## Дисперсные наполнители



- сферические;
- пластинчатые;
- игольчатые и др.

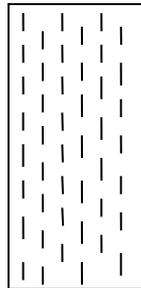


# Примеры схем армирования композиционных материалов



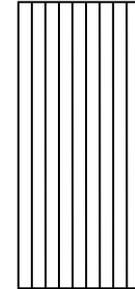
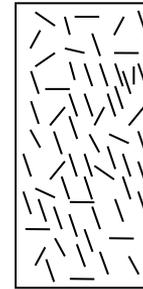
Наполненный случайно  
распределенными  
частицами

Однонаправленный,  
короткие волокна



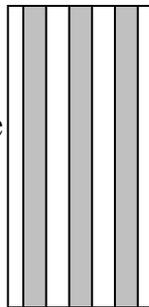
Случайно  
ориентированные  
короткие волокна

Короткие волокна с  
преимущественной  
ориентацией

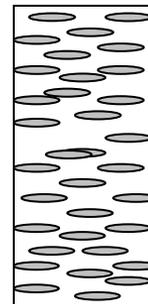


Однонаправленные  
непрерывные волокна

Ленточные наполнители  
(ленту условно  
рассматривают как  
волокно, у которого  
поперечное сечение больше  
по ширине, чем по  
толщине. Такие  
композиции значительно  
более изотропны в  
плоскости листа, чем  
волокнистые КМ.



Чешуйчатые  
наполнители. На  
практике очень  
сложно добиться  
регулярной  
ориентации чешуек.  
Неориентированные  
чешуйки создают  
дефекты, резко  
снижающие  
прочность.

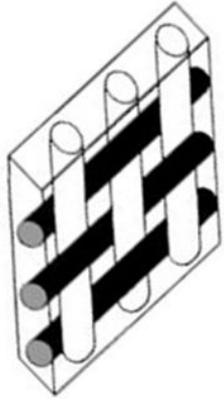


Взаимопроникающие  
структуры. К ним  
относятся пенопласты  
с открытыми порами,  
проволочные маты  
после спекания,  
полимер-полимерные  
композиции.



# Примеры схем армирования композиционных материалов

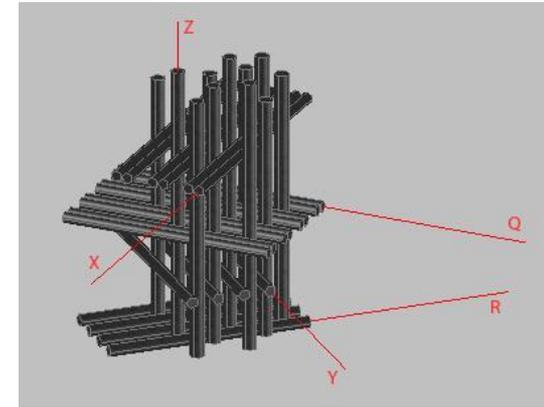
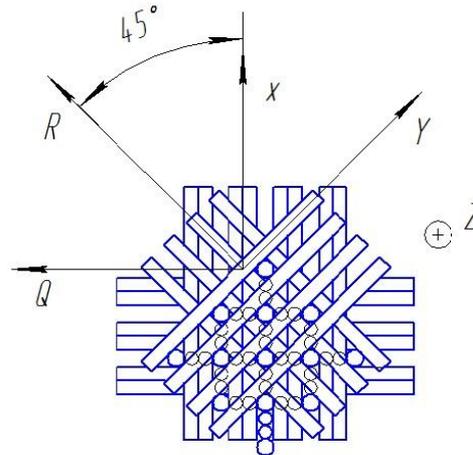
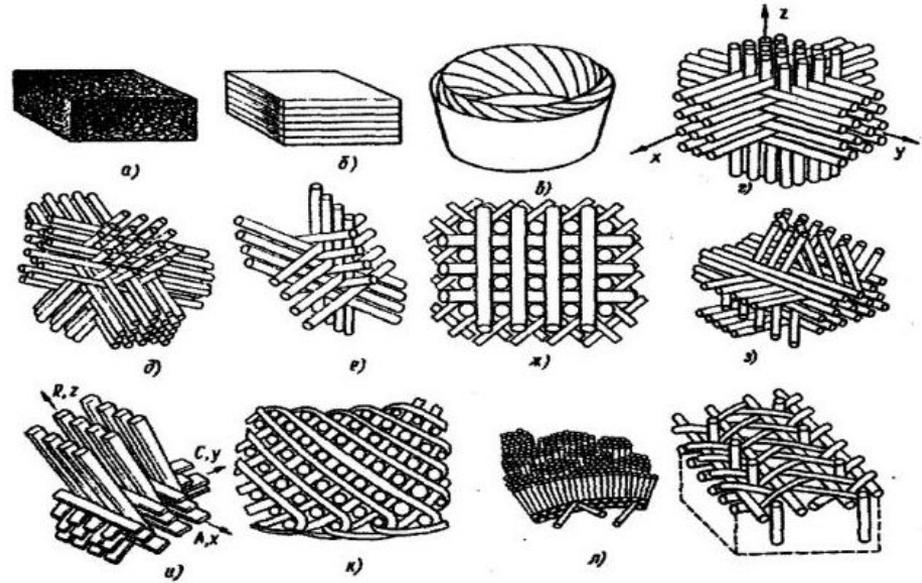
## материалов



Двумерно армированный



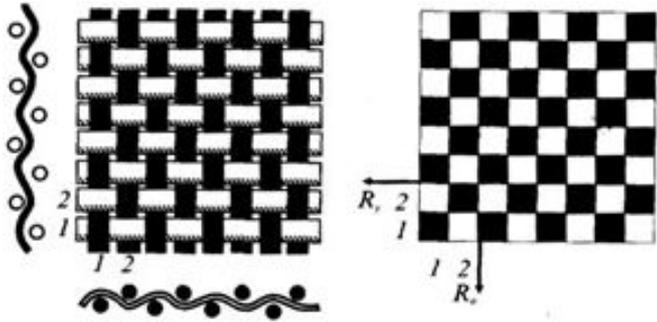
Пространственно-армированный



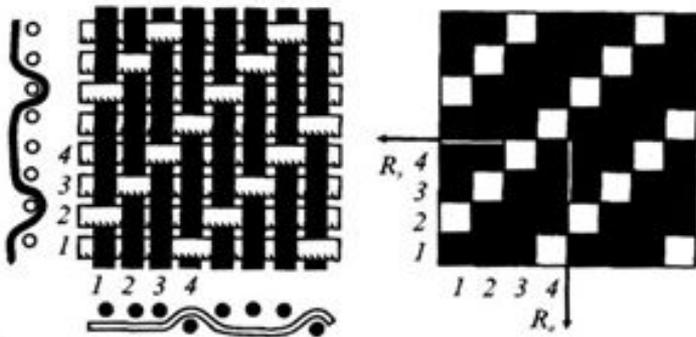
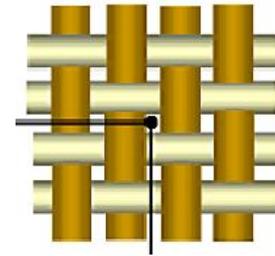
Объемные каркасные структуры подразделяются на классы: 3D-, 4D-, 5D- и т.д. Цифры указывают число жгутов УВ в каждом направлении.

# Виды тканых наполнителей

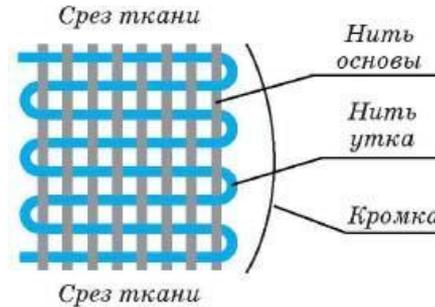
Ткань **полотняного плетения** на сложной оснастке дает дефекты.



**Сатин** относится к группе несбалансированных тканей, поскольку при выкладке одной стороной она дает кривизну (эта ткань не удобна при формовании).

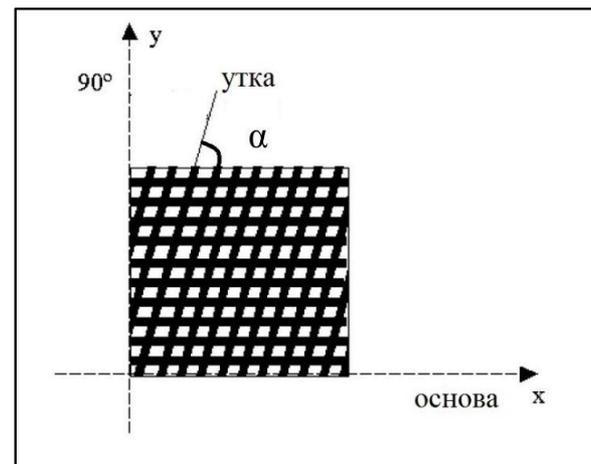
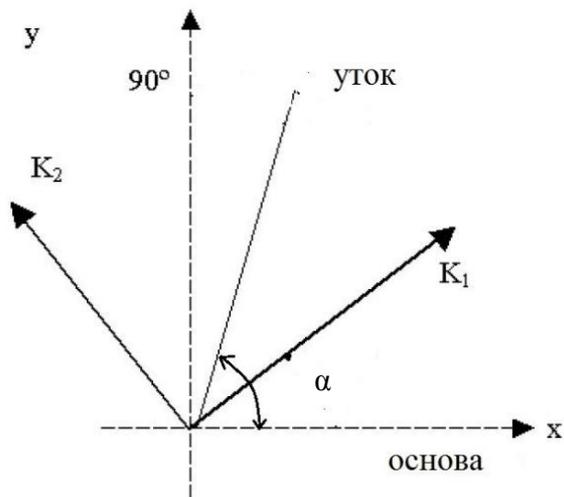


**Саржа** очень легко натягивается на любую оснастку и поэтому получила наибольшее распространение. Но она относится к группе несбалансированных тканей, т.е. при выкладке на поверхности образуется определенный рельеф.



**Основа** – нить расположенная вдоль волокна. **Уток** – нить расположенная поперек волокна.

# Формообразующие свойства тканых наполнителей



При выкладке ткани на поверхность оснастки происходит изменение сетевых углов внутри каждой ячейки. **Сетевым углом** любой текстильной ткани представляет собой угол, между нитями основы и утка.

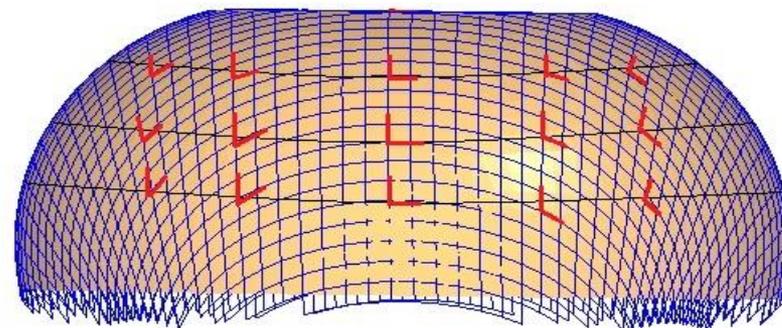


Схема изменения сетевого угла при выкладке ткани на поверхность двойной кривизны

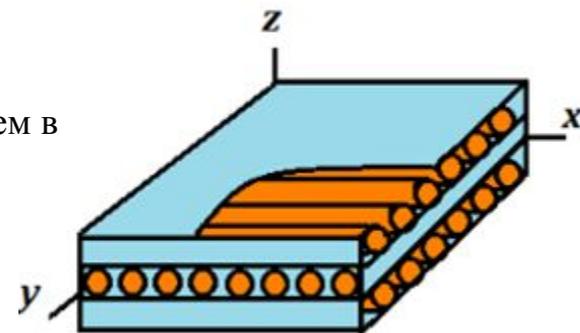
# Свойства ПКМ на основе волокнистых наполнителей

**Изотропия** – одинаковость свойств материала во всех направлениях (например, дисперсно наполненный литевой пластик)

**Анизотропия** – неодинаковость количественных характеристик свойств материала по различным направлениям (например, фанера). Например, модуль упругости однонаправленного углепластика вдоль волокон в 10-15 раз выше, чем в поперечном.

**Степень анизотропии** варьируется при помощи разных способов укладки (или углов намотки).

Ориентация наполнителя влияет на степень **анизотропии** (в том числе и на упругие свойства в разных направлениях различны).



Для компенсации анизотропии увеличивают коэффициент запаса прочности. Таким примером может служить опыт применения КМ при изготовлении вертикального оперения истребителя МиГ-29. Из-за анизотропии применявшегося КМ вертикальное оперение было спроектировано с коэффициентом запаса прочности кратно превосходящим стандартный в авиации коэффициент 1,5, что в итоге привело к тому, что композитное вертикальное оперение МиГ-29 оказалось равным по весу конструкции классического вертикального оперения, сделанного из дюралюминия.

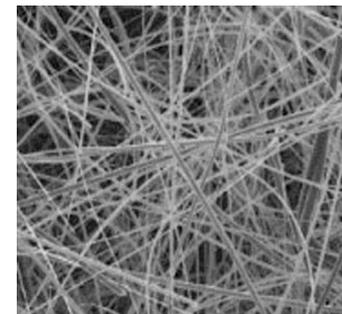
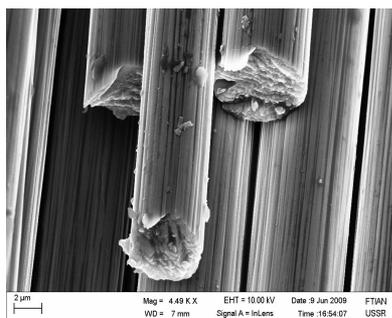
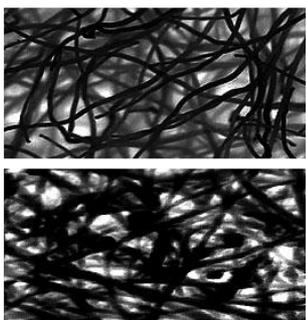
Тем не менее, во многих случаях анизотропия свойств оказывается **ПОЛЕЗНОЙ**. Например трубы, работающие при внутреннем давлении испытывают в два раза большие разрывающие напряжения в окружном направлении по сравнению с осевым. Следовательно, труба не должна быть равнопрочной во всех направлениях. В случае композитов это условие легко обеспечить, увеличив вдвое армирование в окружном направлении по сравнению с осевым.

# Сравнительные характеристики наполненных ПМ

Характеристики	Полимерные композиционные материалы	
	Дисперсно-упрочненные	Армированные волокнами
Роль матрицы	Несет основную нагрузку.	Передает нагрузку на волокно. Обеспечивает жесткость. Перераспределяет напряжения.
Роль наполнителя	Упрочняет матрицу. Степень упрочнения зависит от формы частиц наполнителя, их количества и распределения.	Волокно несет основную нагрузку при растяжении.
Степень наполнения, масс.ч.	1 – 200	50 – 75
Оптимальное наполнения, масс.ч.	2 – 4	65 – 75
Коэффициент упрочнения *	1,1 – 15	2 – 50
Прочность ПМ	Зависит от прочности полимерной матрицы и мало зависит от количества наполнителя.	Зависит от прочности волокон, схемы армирования и изменяется пропорционально содержанию волокон.
Свойства ПМ	Изотропные	Анизотропные

# Волокнистые наполнители

Вид волокна	Прочность при растяжении, ГПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
1. Полиэтиленовые (ПЭНД)	0,45-0,80	3,0-8,5
2. Полипропиленовые	0,30-0,70	3,3-10,0
3. Полиамидные	0,50-0,95	2,0-4,5
4. Кевлар 149	3,80-4,20	150,0-180,0
5. Углеродные	2,00-4,50	200,0-500,0
6. Стекланные	2,00-4,90	50,0-95,0
7. Базальтовые	1,80-2,80	95,0-100,0



Свойства определяются:

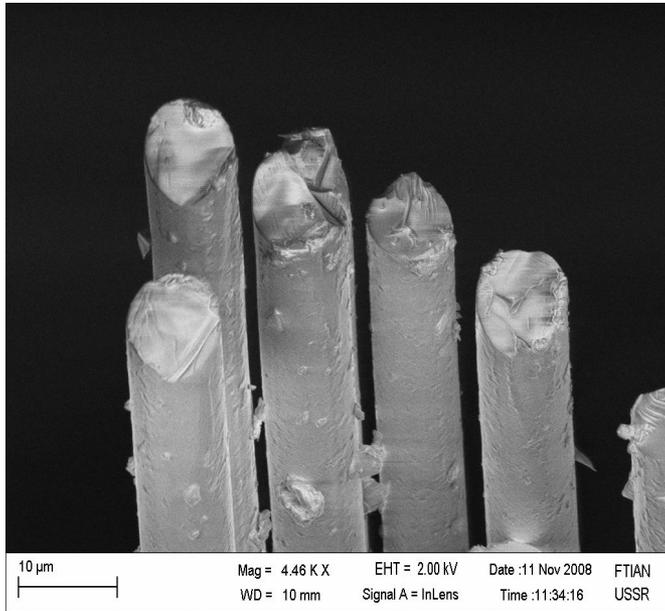
- у органических волокон степенью ориентации макромолекул;
- у углеродных волокон степенью кристалличности и ориентацией кристаллов графита вдоль оси волокна.

## Сравнение свойств волокон и материалов в блоке

Материал	Модуль упругости, ГПа	Прочность при растяжении, МПа
<b>Углерод:</b>		
- волокно	380	4000
- в блоке	10	20
<b>Стекло:</b>		
- волокно	80	3500
- в блоке	75	100
<b>Полиэтилен:</b>		
- волокно	170	3000
- в блоке	0,5	25
<b>Окись алюминия:</b>		
- волокно	300	2000
- в блоке	380	380
<b>Карбид кремния:</b>		
- волокно	400	4000
- в блоке	410	500

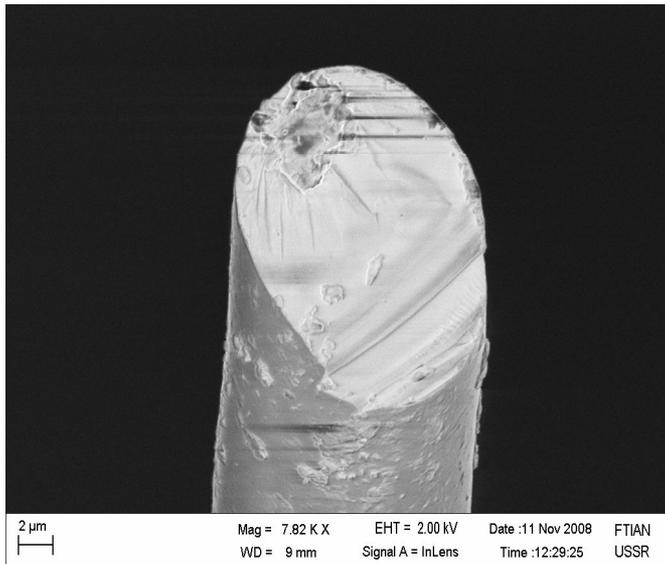
# Стекланные волокна

Стекланные волокна получают высокоскоростной вытяжкой из однородной стекловидной массы, представляющей собой сплав различных оксидов:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и др.



## Преимущества:

- низкая стоимость;
- химическая инертность;
- высокая водостойкость;
- низкая теплопроводность;
- высокий предел прочности при растяжении;
- низкий коэффициент теплового расширения.



## Недостатки:

- малое удлинение и, следовательно, хрупкость;
- нестойкость к истиранию;
- большая плотность ( $2500 \text{ кг/м}^3$ ).

# Классификация стеклянных волокон

Все стеклянные волокна условно можно разделить на два больших класса:

1. Относительно **дешевые волокна** общего применения (стекловолокно марки **E**);

2. **Дорогостоящие волокна** специального применения:

**S** – высокой прочности;

**C** – высокой химической стойкости;

**M** – с высоким модулем упругости;

**AR** – щелочестойкие;

**ESR** – устойчивые в агрессивных средах



**Стеклянные волокна марки E** (это самая распространенная марка)

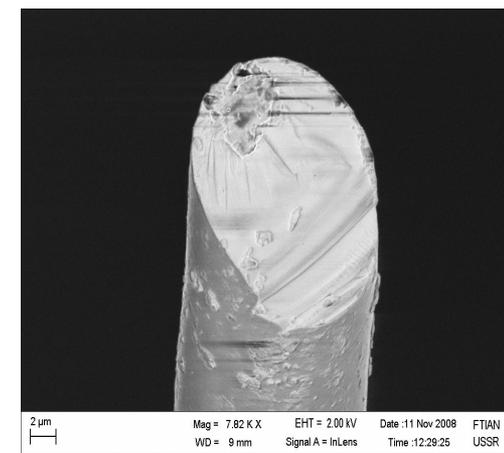
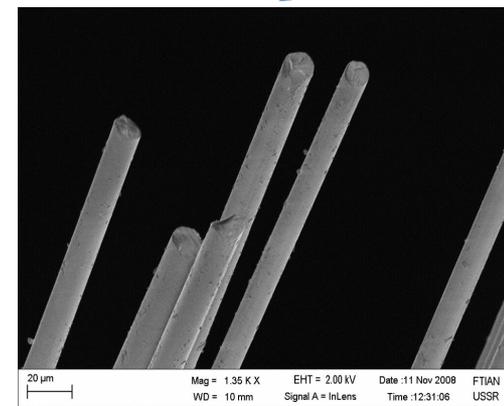
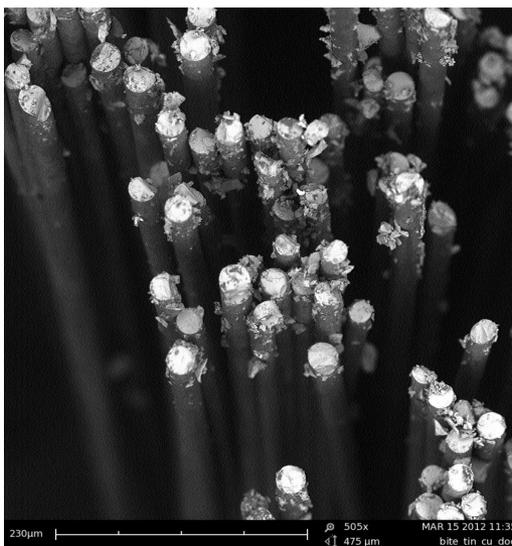
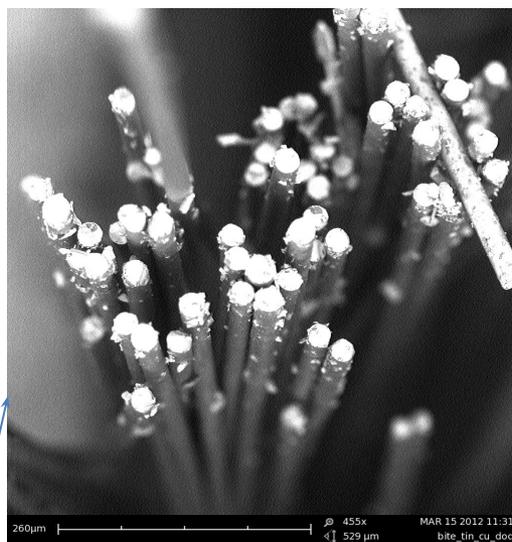
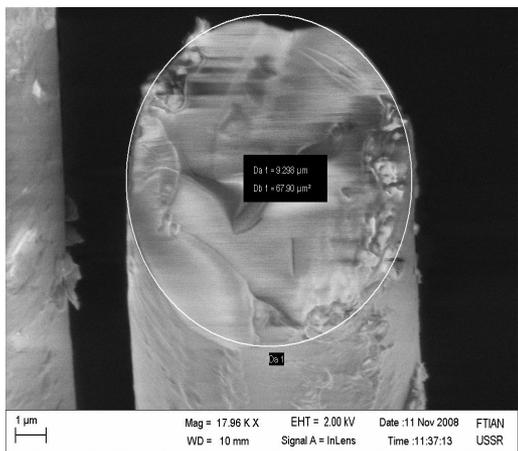
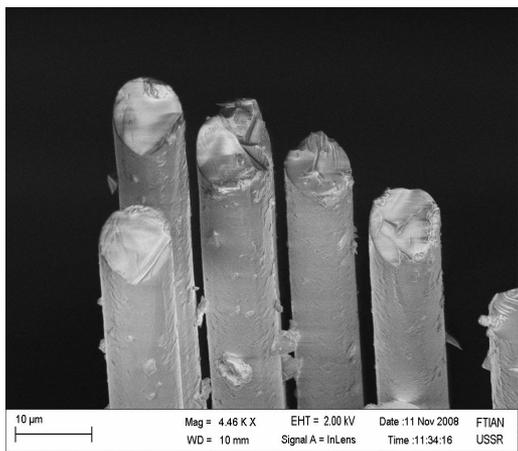
разделяются на:

1. Без оксида бора;

2. С оксидом бора.

Механические свойства обоих видов волокон на основе E-стекла почти одинаковы. Прочность на разрыв составляет от 3100 до 3500 МПа. Однако модуль упругости у волокон без оксида бора несколько выше (80-81 ГПа), чем у обычных волокон (76-78 ГПа). Основным отличием стекловолокна марки E (без бора) является более чем в 7 раз большая кислотостойкость.

# Структура стеклянных волокон марки Е без и с оксидом бора



Рубленое стекловолокно

[Бородулин А.С. Свойства и особенности структур стеклянных волокон, используемых для изготовления стеклопластиков // Материаловедение. 2012. № 7. С.34-37.]

## Свойства стеклянных волокон разных марок

Стекловолокно марки **S** обладает рекордными значениями прочности и модуля упругости для данного класса материалов. Лучшая продукция из **S-стекла** близка по своему качеству к углеродному волокну. Прочность волокон марки S при комнатной температуре составляет 4380-4590 МПа, модуль упругости 88-91 ГПа, а прочность наилучших образцов волокна марки S доходит до 7000 МПа.

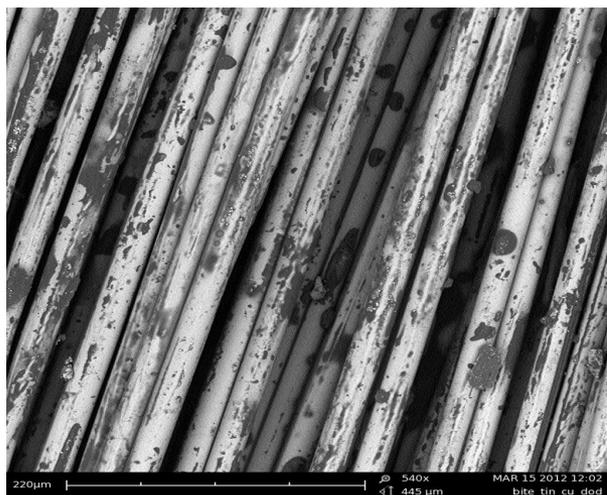
Прочность на разрыв волокон на основе **AR-стекла** довольно низка и составляет около 1500-1700 МПа, модуль упругости 72-74 ГПа. Такие волокна самые тяжелые среди всех видов стекловолокна, их плотность составляет около 2,7 г/см<sup>3</sup>. Основной характеристикой таких волокон является их устойчивость в щелочной среде.

**Стекловолокно ECR** было разработано специально для использования в агрессивных средах, например его устойчивость в кислых средах в 4-5 раз выше, чем у других марок стекловолокна. При этом прочность этих волокон остается на уровне стекловолокна марки E и составляет порядка 2800-3000 МПа, модуль упругости около 80-83 ГПа. Несмотря на то, что плавление и выработку волокна из ECR проводят при более низких температурах, его стоимость превышает стоимость стекловолокна E из-за наличия дорогих компонентов.

# Свойства стеклянных волокон

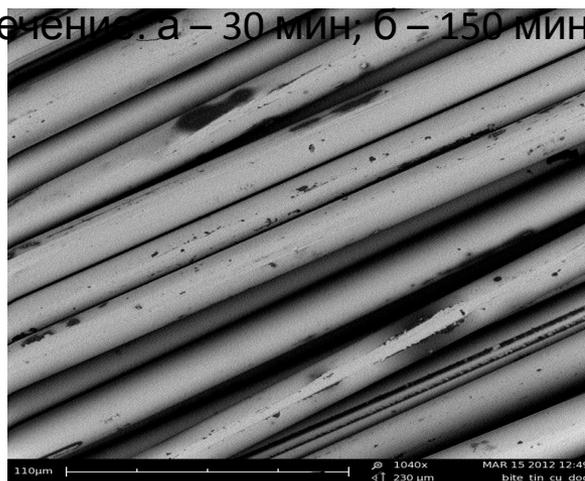
Свойства	Тип волокна					
	Е (с бором)	Е (без бора)	S	AR	ECR	Базальт
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	2540-2550	2620	2480-2490	2600-2700	2660-2680	2670
Прочность, МПа	3100-3500	3100-3500	4380-4590	3100-3500	2800-3000	2700-3500
Модуль упругости, ГПа	76-78	80-81	88-91	72-74	80-83	70-90
Удлинение до разрыва, %	4,5-4,9	4,6	4,5-4,9	2,0-2,4	4,5-4,9	3

## Стеклянные волокна после отжига при температуре 200°C



а)

в течение: а – 30 мин, б – 150 мин.



б)

[Бородулин А.С. Свойства и особенности структур стеклянных волокон, используемых для изготовления стеклопластиков // Материаловедение. 2012. № 7. С.34-37.]

## Свойства стеклотканей

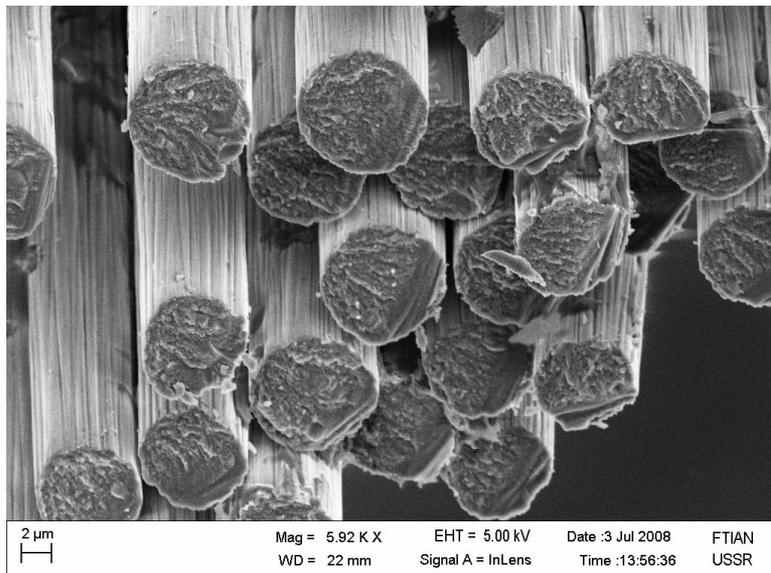
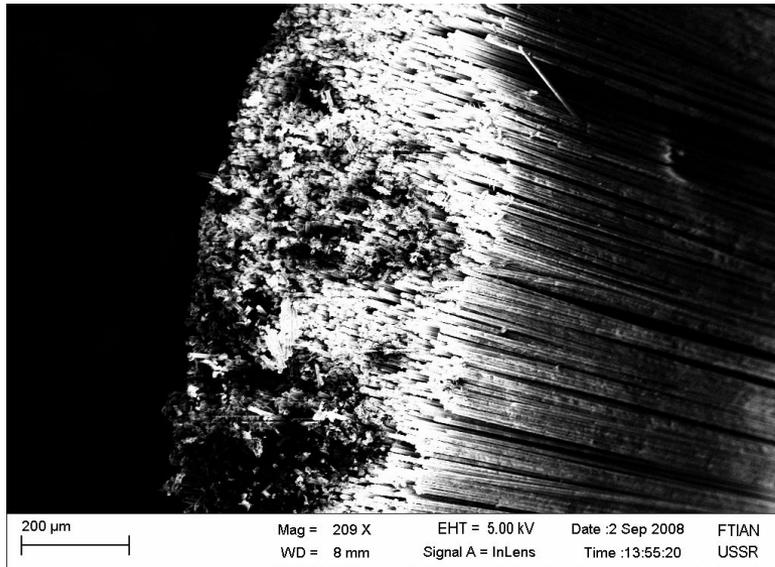
Марка ткани	Номинальная масса единицы площади, г/м <sup>2</sup>	Номинальная толщина ткани, мм	Разрывная нагрузка Н, не менее	Разрывная нагрузка Н, не менее
			Основа	Уток
T-10	290	0,23	2450 - 2940	1323 - 1568
T-10 (ВМП)	310	0,25	3136	1764
T-25 (ВМП)	365	0,25-0,30	3920 - 4410	294 - 343
T-50	360± 30	0,31± 0,03	4704	686
T-60	235± 15	0,22	2546	-
T-15	160± 16	0,19± 0,03	785	687
T-45	216± 16	0,26± 0,03	1176	784

Любой тканый наполнитель состоит из двух типов нитей, которые расположены по отношению друг к другу, как правило, под углом 90 градусов. Нити, расположенные вдоль ткани называют – основа, а нити, расположенные поперек – уток. При испытании тканей на растяжение, нагрузка как правило, прикладывается вдоль нитей основы.

[Бородулин А.С. Свойства и особенности структур стеклянных волокон, используемых для изготовления стеклопластиков // Материаловедение. 2012. № 7. С.34-37.]

# Углеродные волокна (УВ)

УВ – органический материал, содержащий 92-99,99% углерода. УВ получают путем термообработки различных химических волокон (в основном на основе полиакрилонитрила ПАН) при температурах до 3200°C.



## Преимущества:

- высокий модуль упругости (у графитизированных УВ);
- высокая прочность (у карбонизированных УВ);
- высокая теплостойкость;
- малая плотность;
- высокая электропроводность;
- низкий коэффициент трения;
- очень низкий коэффициент линейного термического расширения (КЛТР);
- высокая химстойкость.

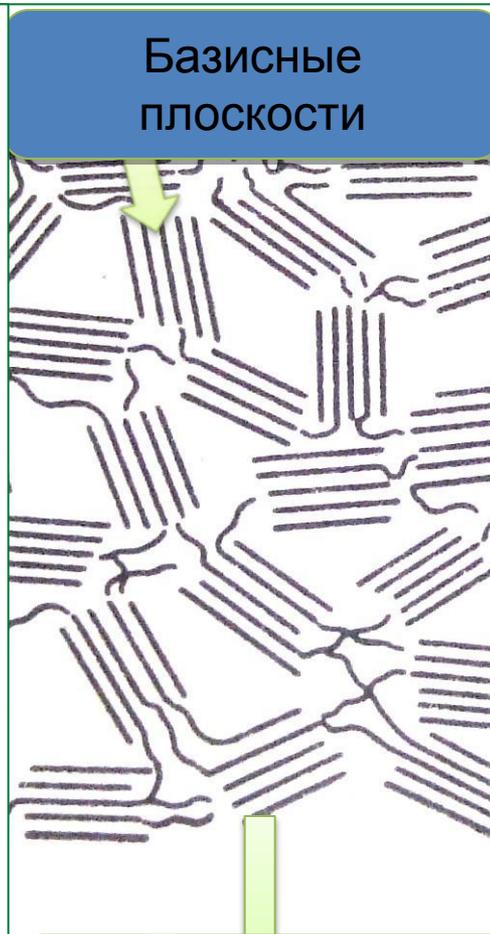
## Недостатки:

- высокая стоимость;
- большой разброс свойств.

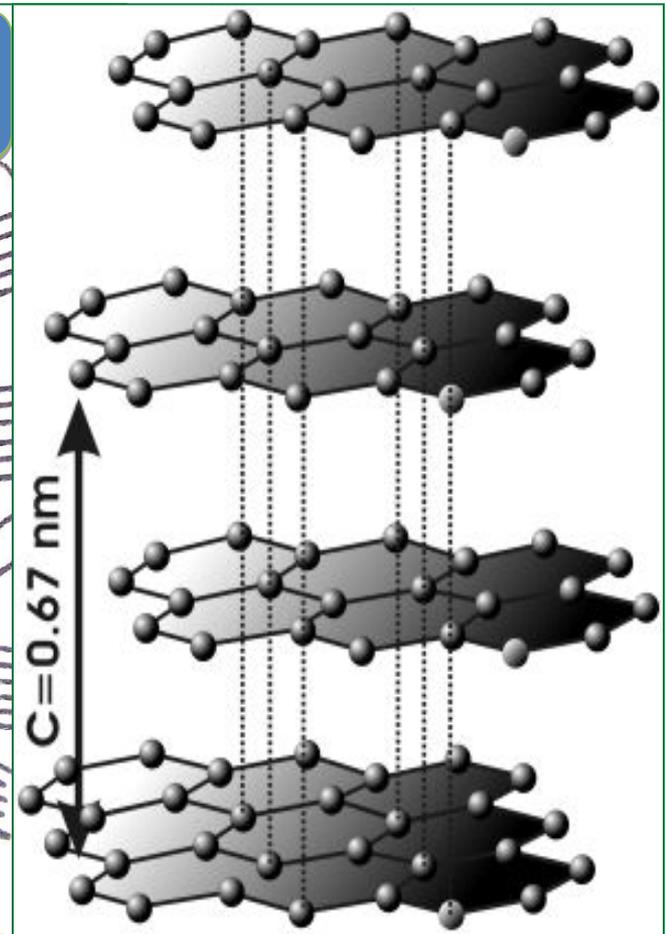
# Схема строения углеродного вещества



Диаграмма состояния углерода

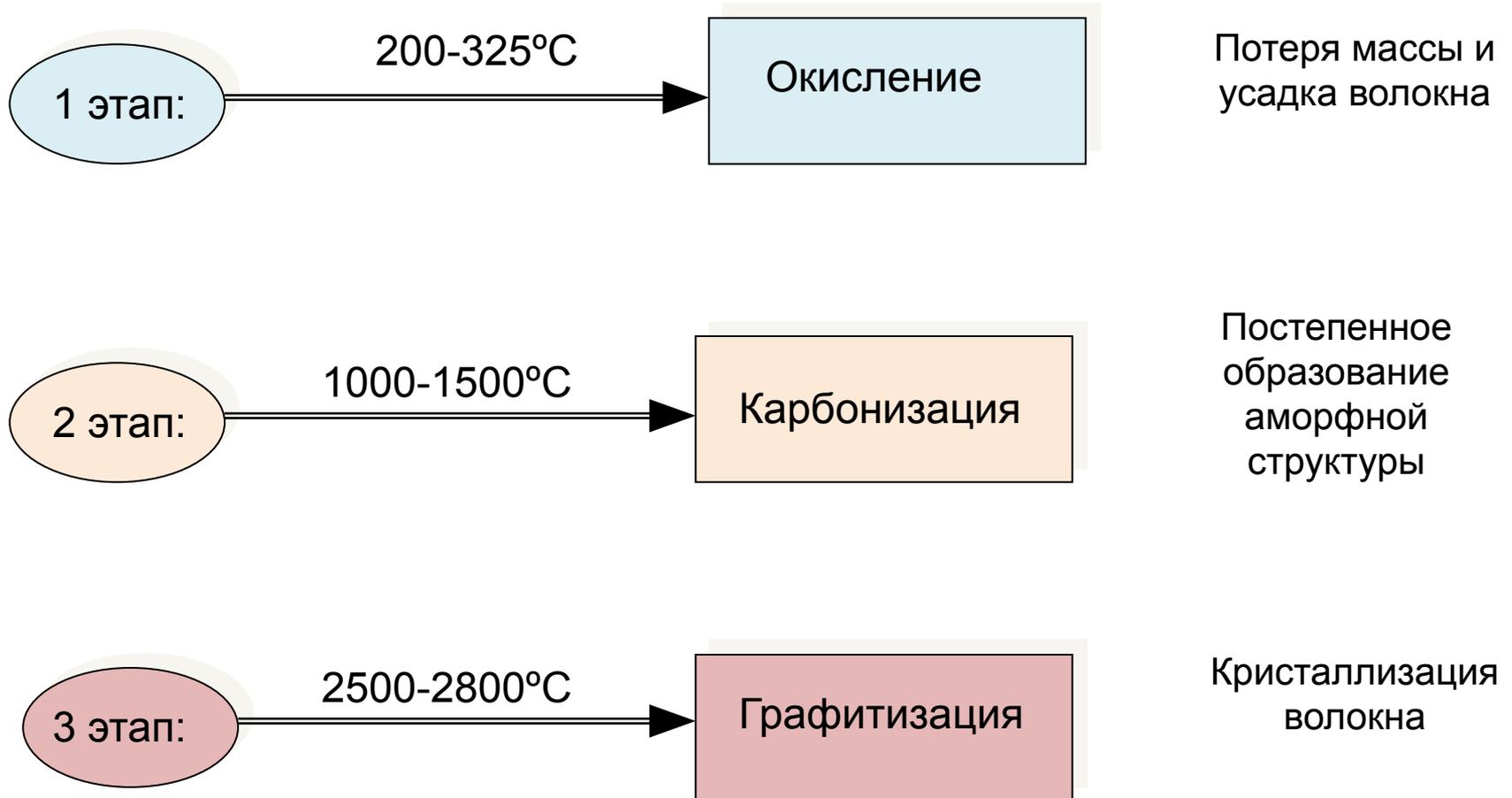


Прослойки аморфного углерода



Структура графита

# Технологические процессы получения углеродных волокон



## Получение волокнистой формы

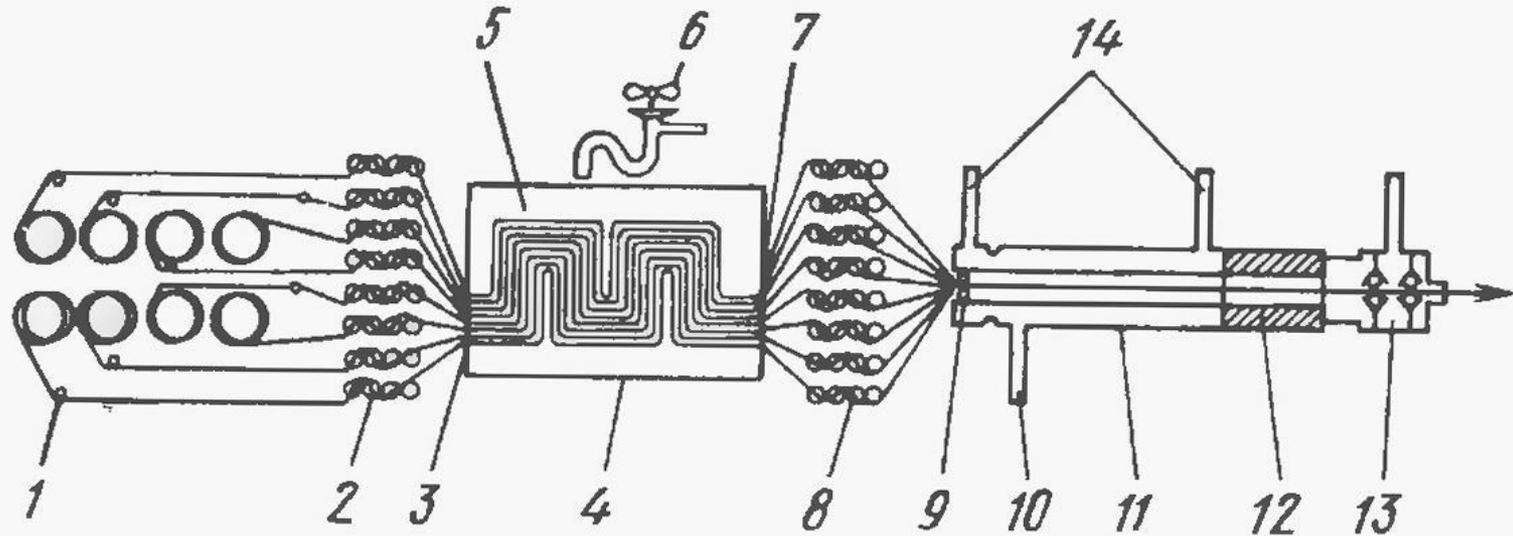


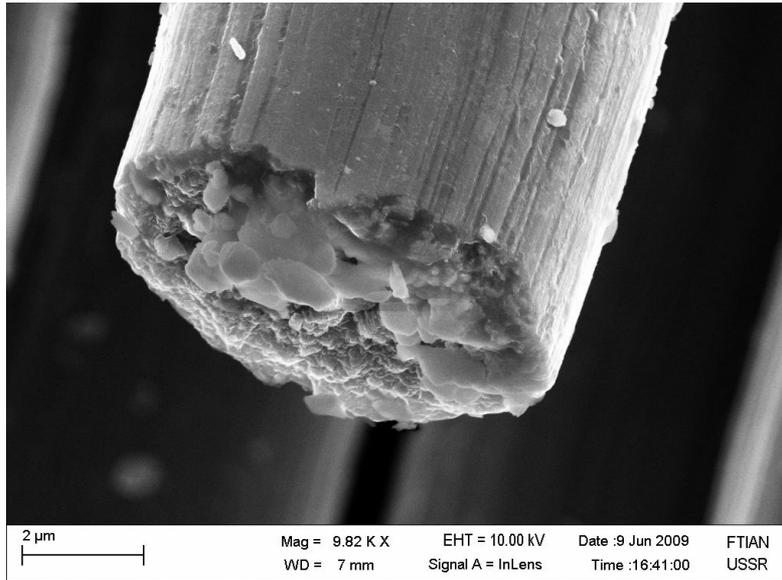
Схема совмещенного окисления и карбонизации ПАН-волокна:  
1 – шпулярник; 2 – система питающих роликов; 3 – впускное устройство; 4 – печь окисления; 5 – комплект роликов; 6 – вентилятор; 7 – выпускное устройство; 8 – система тянущих роликов; 9 – приемные вальцы; 10 – штуцер для подачи инертного газа; 11 – печь карбонизации; 12 – высокотемпературная зона печи карбонизации; 13 – вакуумная камера; 14 – штуцера для отвода отходящих газов

# Свойства углеродных волокон на основе ПАН-волокна

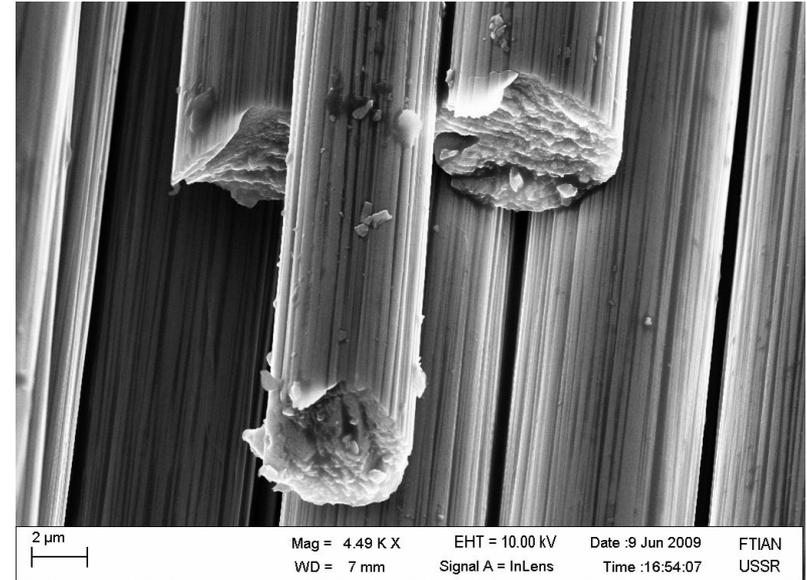
Показатели	Карбонизированные волокна	Графитизированные волокна
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1760	1940
Разрушающее напряжение при растяжении, ГПа	2,45 – 3,16	1,76 – 2, 28
Модуль упругости при растяжении, ГПа	250 – 295	350 – 420
Относительное удлинение при разрыве, %	0,8 – 1,3	0,15 – 0,4
Коэффициент линейного термического расширения $\alpha$ , К <sup>-1</sup> при температуре °С: 30 150	  - $10,3 \cdot 10^{-7}$ - $9,78 \cdot 10^{-7}$	  - $8,5 \cdot 10^{-7}$ - $6,4 \cdot 10^{-7}$
Удельное электрическое сопротивление. Ом · см	(50 – 150) · 10 <sup>-7</sup>	



# Структура углеродного волокна марки УТ900, полученного при различных температурах отжига



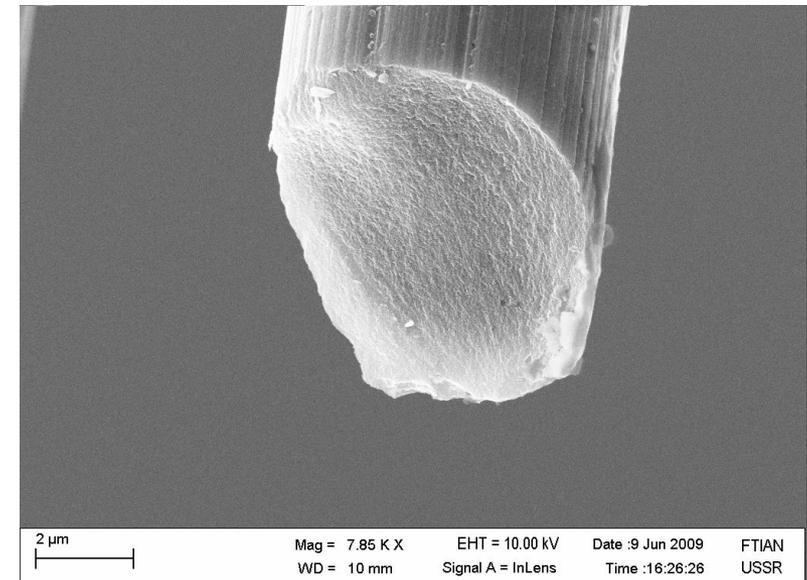
Неотожженное



Отожженное при 450°C

Свойства углеродных волокон сильно зависят от условий карбонизации и графитизации, поскольку именно они определяют степень дефектности кристаллов

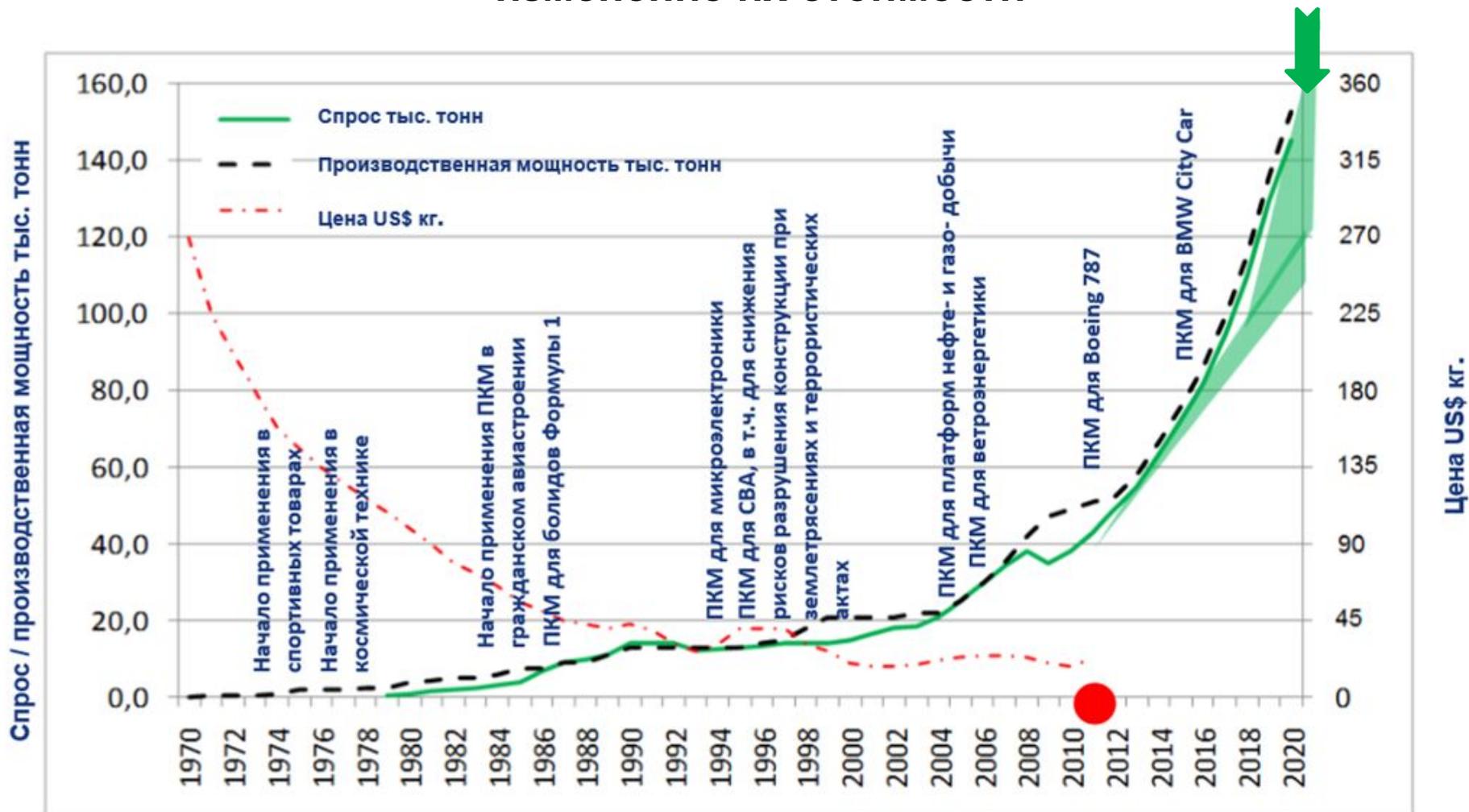
Отожженное при 1800°C



# Свойства различных марок углеродных волокон

Волокно	Фирма	Содержание углерода, %	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Нитей в жгуте	Свойства ПКМ		
						$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{B\text{ сж}}$ , МПа	$E_B$ , ГПа
IM-4	Hexcel	~94	4769	276	12К	2484	н/д	179
IM-7	Hexcel	~94	5175 (6К) - 5760 (12К)	276 (6К) - 290 (12К)	6К 12К	3036	н/д	176
IM-9	Hexcel	~94	6072 (6К) - 6141 (12К)	290 (6К) - 290 (12К)	6К 12К	3222	н/д	176
T700S	Toray	~93	4900	230	6К – 24К	2550	1470	135
T800S	Toray		5880	294	24К	2950	н/д	154
T800H	Toray	~96	5490	294	6К – 12К	2650	1570	170
T1000G	Toray	~95	6370	294	12К	3040	1570	165
M40J	Toray	>99	4410	377	3К – 12К	2450	1270	230
M55J	Toray	>99	4020	540	6К	2010	880	340
M60J	Toray	>99	3920	588	3К – 6К	2010	785	365
M70J	Toray		3810	690	3К – 6К	н/д	н/д	н/д

# Рост спроса на УВ в течение 50 лет (1970-2020) и изменение их стоимости



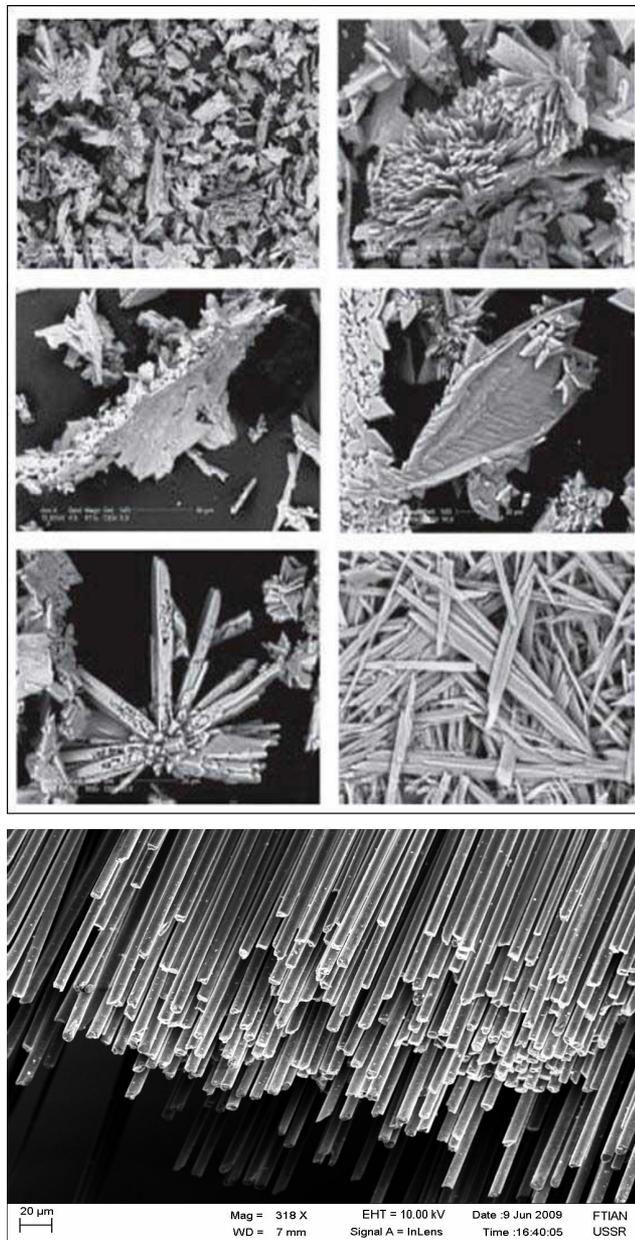
	1975-2004	2005-2020
Ежегодный рост спроса	5-8%	10-15%

# Крупнейшие производители углеродных волокон

Тип УВ	Фирма	Марка продукции	$\sigma$ , ГПа	E, ГПа	$\varepsilon$ , %
Сверхвысокопрочные	«Торей»	T1000	7,20	300	2,4
		T800	5,70	300	1,9
Высокомодульные и ультравысокомодульные	«Тохо Рейон»	JM-600X	5,70	300	1,9
	«Торей»	M40	2,80	400	0,6
		M50	2,50	500	0,5
		M55J	3,70	550	0,7
	«Тохо Рейон»	HM-45	2,20	450	0,5
		HM-40	3,00	400	0,8
	«Когосима Сэкию»	HM-50	2,80	500	0,6
		HM-55	2,90	550	0,5
		HM-60	3,00	600	0,5
		HM-80	3,24	785	0,4

# Классификация дисперсных наполнителей по форме частиц

Класс частиц	Идеализированная форма частиц	Пример наполнителя
Сфера или близкая к сферической		искусственные стеклянные шарики
Кубическая, призматическая		кальцит, полевой шпат
Нерегулярная		оксид кремния, оксид бария, технический углерод
Чешуйка, пластинчатая		слюда, тальк, каолин, графит
Игольчатая, волокнистая		волластонит, древесная мука



# Технический углерод (сажа)

## Преимущества:

- низкая стоимость;
- очень высокая стойкость к действию ультрафиолетового излучения;
- хорошая электропроводность.

## Недостатки:

- производство сажи относится к экологически опасным производствам.

## Области применения:

- для защиты полимеров от действия солнечного света (например, введение в полиэтилен 2% сажи с размерами частиц 15-20 нм позволяет увеличить срок его службы до 20 лет, тогда как не наполненный полиэтилен со временем обесцвечивается и теряет электрическую устойчивость уже через 6 месяцев);
- в качестве черного красителя;
- для улучшения перерабатываемости термопластичных полимеров;
- для регулирования электропроводности;
- около 90% всей выпускаемой сажи применяется при производстве шин и резиновых изделий.

# Карбонат кальция $\text{CaCO}_3$

## Преимущества:

- низкая стоимость;
- не токсичен;
- широкий интервал размеров частиц;
- стабильность свойств в широком интервале температур.

## Недостатки:

- слабый эффект увеличения прочности;
- низкая влагостойкость и необходимость дополнительной термообработки;
- может иметь место охрупчивание.

## Области применения:

- в составе полиэфирных связующих в количествах 20-100 мас.ч. на 100 мас. ч. смолы;
- в качестве наполнителя в большинстве составов на основе пластифицированного поливинилхлорида, полиэтилена, полипропилена.

# Диоксид кремния $\text{Si(OH)}_3$

## Преимущества:

- обеспечивает придания связующим тиксотропных свойств, даже при низком содержании (до 0,1 мас.ч.);
- модификация поверхности диоксида кремния позволяет регулировать его взаимодействие со связующим;
- не токсичен;
- химически активен.

## Недостатки:

- не позволяет увеличить прочность полимеров;
- высокая стоимость.

## Области применения:

- для регулирования реологических свойств большинства терморезистивных связующих (в первую очередь, кремнийорганических).

# Гидрооксид алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$

## Преимущества:

- низкая стоимость;
- не токсичен.

## Недостатки:

- понижает прочностные характеристики;
- ограниченная теплостойкость (разлагается при температуре + 205°C и поэтому его нельзя использовать, если формование ПКМ производится при этой или более высокой температуре).

## Области применения:

- в качестве антипирена, для придания полимерам огнестойкости и для уменьшения выделения дыма при их горении. Входит в состав всех связующих, используемых в авиастроении и строительстве (при отделке интерьеров). Используется в составах термопластиков и реактопластиков;
- позволяет повысить стойкость к воздействию электрических разрядов.

# Микросферы

Микросферы подразделяются на сплошные и полые. Полые микросферы используются для снижения массы деталей.

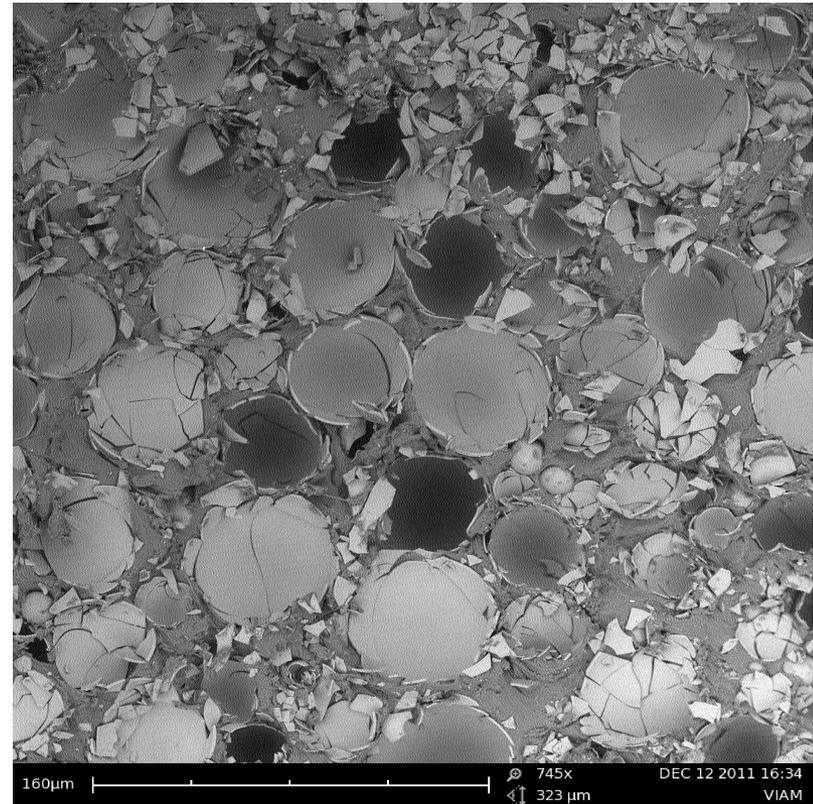
Наибольшее применение нашли стеклянные микросферы, но в настоящее время также используют и полимерные микросферы (например, из фенопластов).

## Преимущества:

- хорошее смачивание, которое обеспечивается за счет сферической формы;
- на поверхность микросфер можно наносить модификаторы (например, аппреты), увеличивающие адгезионную прочность;
- при использовании микросфер возможен точный контроль дисперсности.

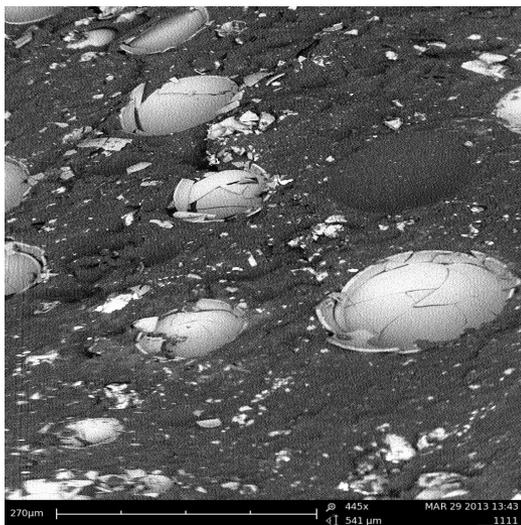
## Недостатки:

- очень высокая стоимость.

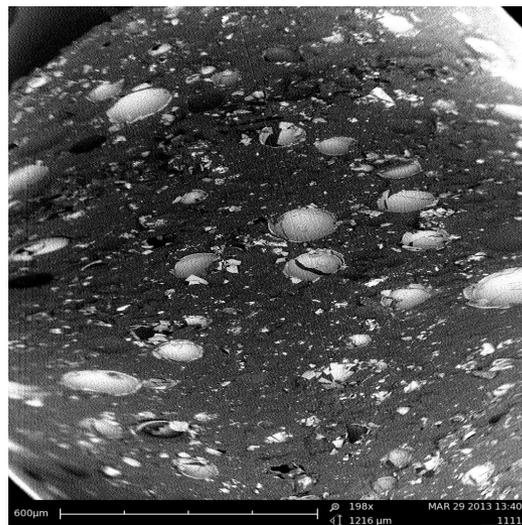


Структура кремнийорганического полимера со стеклянными микросферами после его разрушения

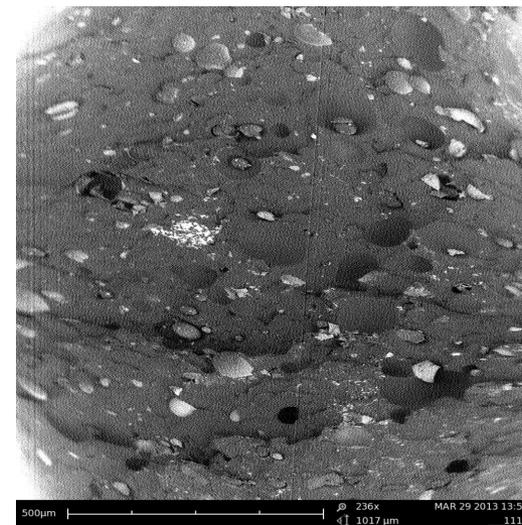
# Капсулированные наполнители, придающие ПКМ эффект самовосстановления



50% от разрушающей нагрузки



70% от разрушающей нагрузки



80% от разрушающей нагрузки

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**