



# Проектирование элементов автомобиля из композиционных материалов

## Лекция 1. «Введение»

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

**Карташов Александр Борисович**



## Виды занятий

Вид занятий	Объем занятий, академический час	Количество занятий
Лекции	34	17
Лабораторные работы	24	4
Самостоятельная работа	15	—

## Самостоятельная работа

Виды самостоятельной работы	Неделя выполнения, неделя выдачи/сдачи	Объем, академический час
Рубежный контроль №1	9	2
Рубежный контроль №2	15	2
Домашние задание	10/15	6
Проработка лекций, подготовка к рубежному контролю	1/17	5



Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

## Учебное пособие

Б.А. Афанасьев, И.З. Даштиев

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ  
АВТОМОБИЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана



Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

## Учебное пособие

Б.А. Афанасьев, И.З. Даштиев

**Проектирование элементов  
подсистем автомобиля  
из композиционных материалов**

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана



Афанасьев Б.А., Даштиев И.З.  
Проектирование элементов автомобиля  
из полимерных композиционных  
материалов: Учебное пособие  
2006 – 92с.

Афанасьев Б.А., Даштиев И.З.  
Проектирование элементов подсистем  
автомобиля из композиционных  
материалов: Учебное пособие.  
2007 – 136с.

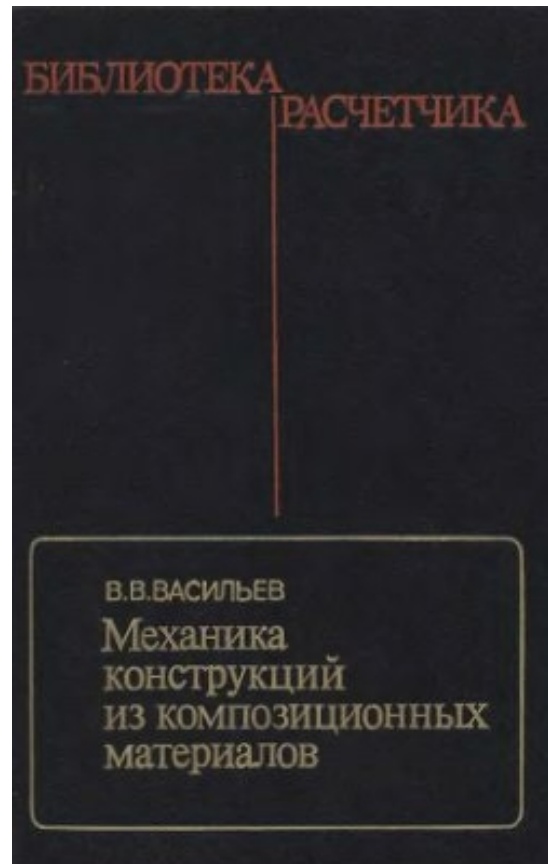
Проектирование  
полноприводных колесных  
машин: Учебник для вузов.  
Под ред. А.А.Полуняна  
2008 в 3 т



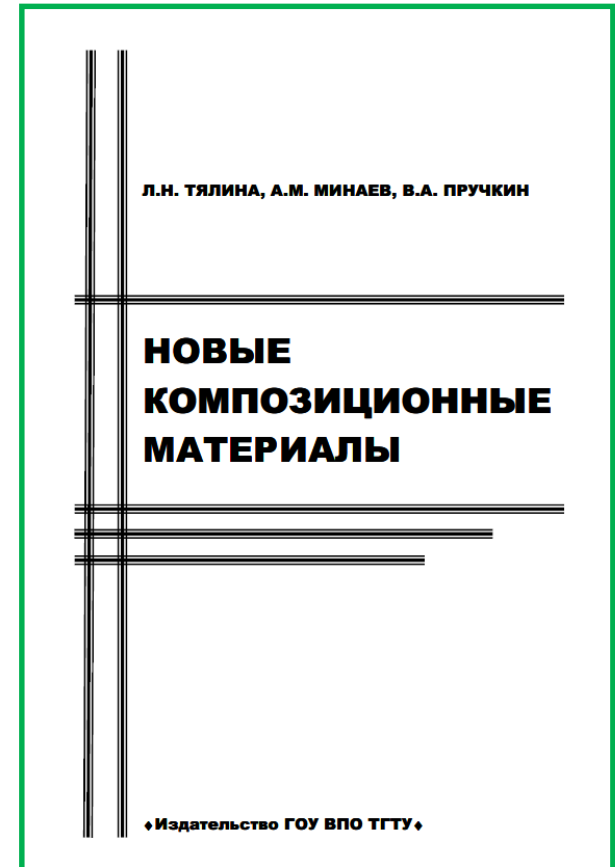
# Дополнительная литература



Буланов И.М., Воробей В.В.  
Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учеб. Для вузов.  
1998 – 516 с.



Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов.  
1988 – 272 с.



Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. Новые композиционные материалы.  
2011 – 80 с.



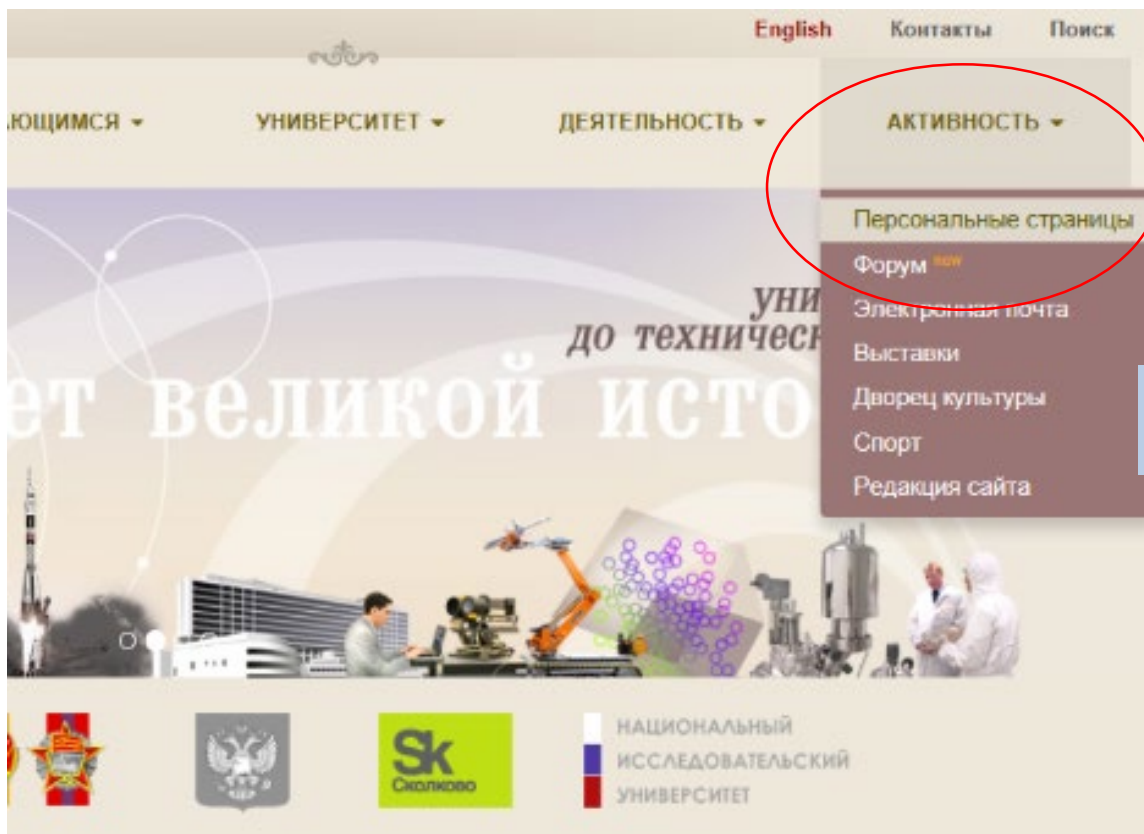
1. Карташов А.Б. Курс лекций «Композиционные материалы» для специалистов ПАО «Камаз» URL: <http://www.bmstu.ru/ps/~kartashov/>
2. Ананьева Е.С. Механика композиционных материалов: Курс лекций.  
URL: <http://www.chem-astu.ru/chair/study/mech-compos-mat/>
3. Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. Новые композиционные материалы.  
URL: <http://window.edu.ru/resource/541/76541/files/pruchkin-t.pdf>



# Электронный ресурс курса



<http://www.bmstu.ru/ps/~kartashov/>



Переход на  
персональные  
страницы  
преподавателей

## Персональная страница Карташова Александра Борисовича



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н. Э. БАУМАНА

[Главная](#) [Войти](#)

Доцент  
Александр Борисович Карташов

► [Файловый браузер](#)

Файлы ► ПКМ

имя	размер	дата публикации
<a href="#">назад</a>		
<a href="#">2012</a>	4.0 КБ	26 Дек 2013
<a href="#">toWeb.rar</a>	5.9 МБ	26 Дек 2013
<a href="#">toWeb.zip</a>	5.9 МБ	26 Дек 2013
<a href="#">Вопросы к экзамену по ПКМ 2013 RC3.pdf</a>	72.9 КБ	26 Дек 2013
<a href="#">Маршрут в Хотьково.docx</a>	393.4 КБ	26 Дек 2013
<a href="#">Результаты РК 1 по ПЭА из ПКМ (Группа SM10-101-2013).pdf</a>	109.3 КБ	26 Дек 2013
<a href="#">Результаты РК 1 по ПЭА из ПКМ (Группа SM10-102-2013).pdf</a>	109.3 КБ	26 Дек 2013
<a href="#">Результаты РК2 по ПЭА из ПКМ (Группа SM10-101-2013).pdf</a>	109.3 КБ	26 Дек 2013
<a href="#">Результаты РК2 по ПЭА из ПКМ (Группа SM10-102-2013).pdf</a>	109.2 КБ	26 Дек 2013



# Место композиционных материалов в автомобилестроении



Повышение удельных мощностей автомобилей



Повышение средней скорости движения



Ужесточение требований безопасности



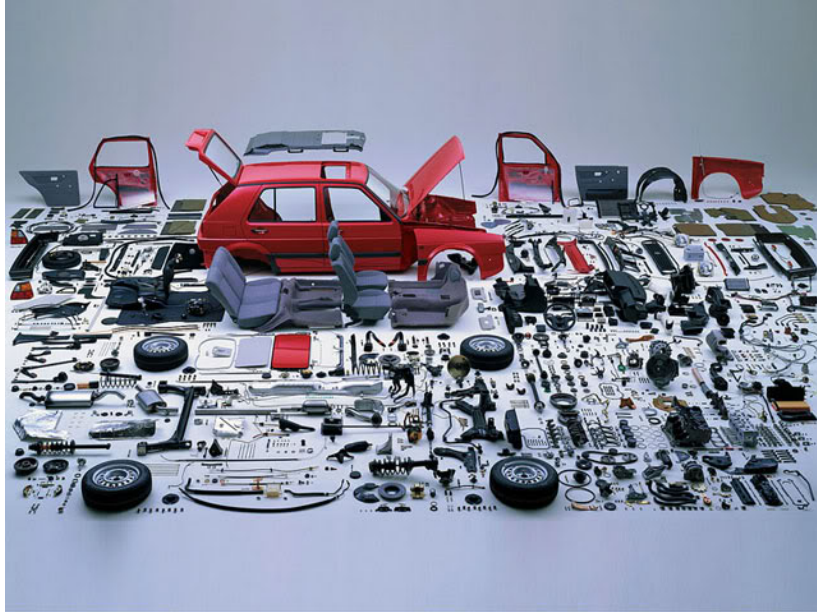
Автоматизация работы водителя



Усложнение конструкции автомобиля



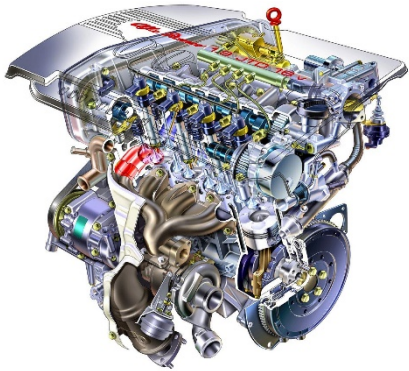
Десятки тысяч деталей



Сотни узлов

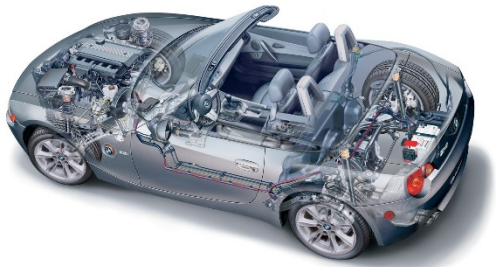
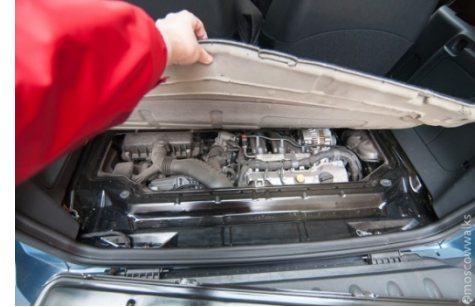
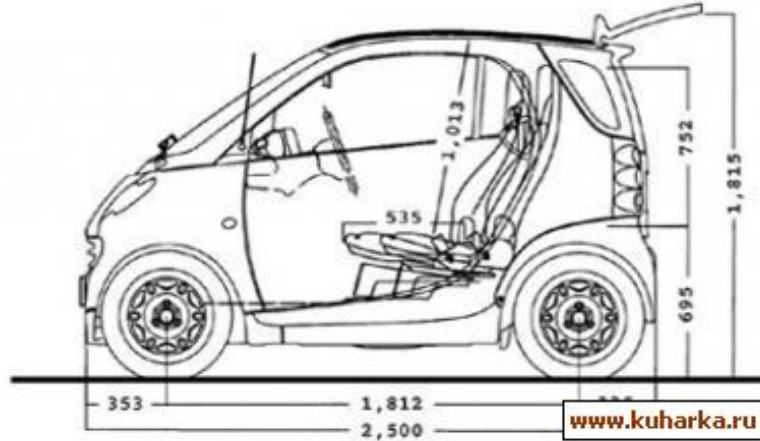
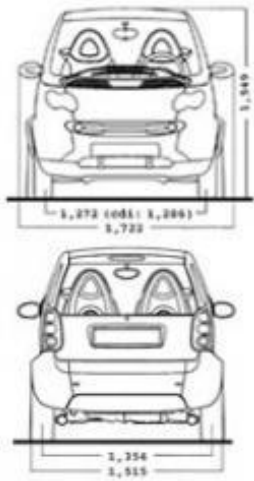


Десятки систем





# Ограниченное внутреннее пространство





# Требования к автомобилю



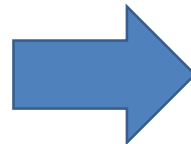
Современный автомобиль должен удовлетворять определенным, часто противоречивым требованиям, таким как:

- ✓ безопасность;
- ✓ экономичность;
- ✓ минимальная масса;
- ✓ высокая средняя скорость;
- ✓ большая грузоподъемность;
- ✓ вместимость и т.д.

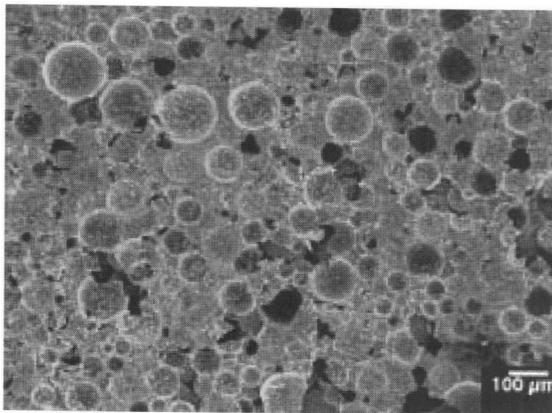
Возрастающая всемирная конкуренция



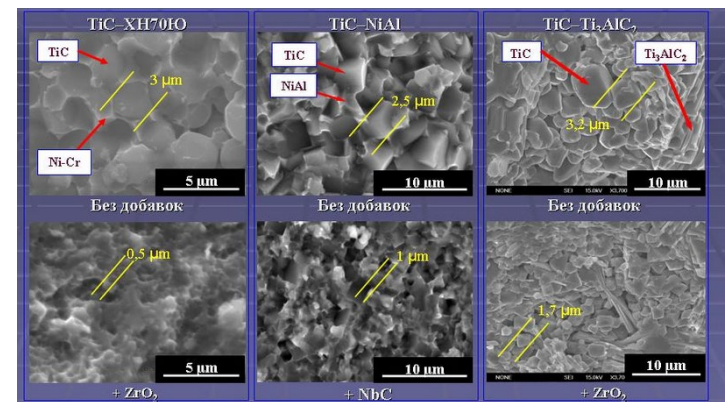
- ✓ Лучшее качество
- ✓ Лучшие эксплуатационные качества
- ✓ Низкая стоимость
- ✓ Меньшее время разработки



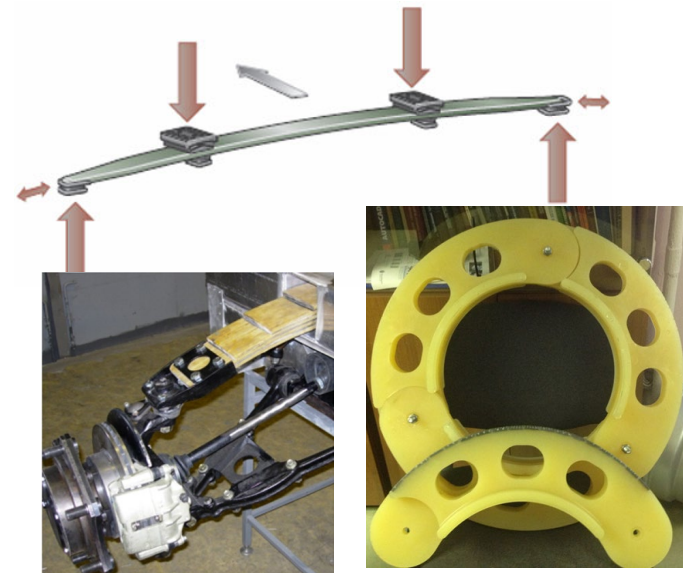
Очевидно, что одновременное удовлетворение всех этих требований к современному перспективному автомобильному транспорту невозможно без применения новых современных конструкционных материалов – композиционных материалов.

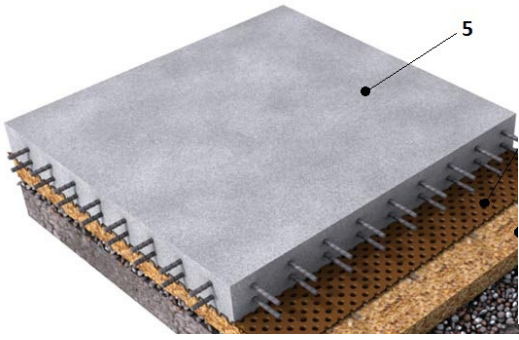


ФИГ. 1



Высокого качества автомобильной техники нельзя добиться без применения полимерных материалов вообще и полимерных композиционных материалов (ПКМ) в частности. Полимерные материалы и ПКМ позволяют снизить массу автомобилей, материалоемкость и трудоемкость их изготовления, повысить надежность и комфортабельность, улучшить эксплуатационные параметры и конкурентоспособность.





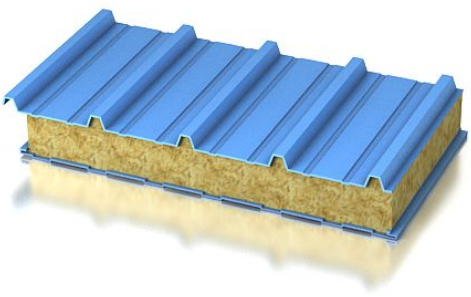
Бетонная плита



Пневматическая шина



Плиты ДСП и МДФ



Сэндвич панели



Утеплительные панели



Бытовые изделия из пластика



# Композиты в автомобилестроении

Наиболее широко ПКМ применяются в крупногабаритных конструкциях, где можно получить наибольшую эффективность.

Как показывает практика использования ПКМ в автомобилестроении, основные области их применения:

- различные крупногабаритные кузовные конструкции (кузова, кабины, капоты, крылья, двери, бамперы и др.);

- корпуса плавающих машин;

- узлы трансмиссии (трубы карданных передач, фрикционные накладки дисков сцепления, фрикционные элементы управления коробок передач и др.);

- узлы ходовой части автомобиля (упругие элементы систем поддрессоривания, подшипники скольжения, рычаги подвески, фрикционные элементы тормозных механизмов, ободья колес, декоративные колпаки колес легковых автомобилей и др.).

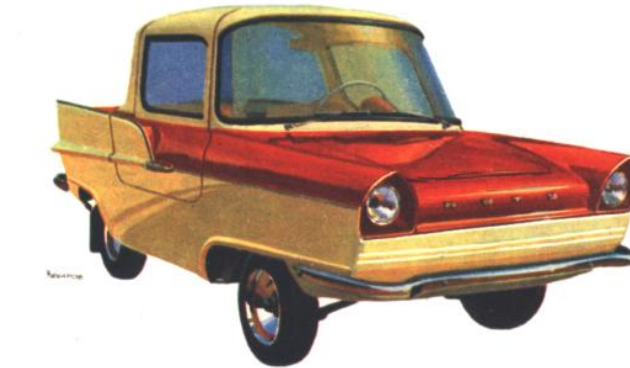


# Основные области применения КОМПОЗИТОВ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ



## 1. Различные крупногабаритные кузовные конструкции:

- ✓ кузова,
- ✓ кабины,
- ✓ капоты,
- ✓ крылья,
- ✓ двери,
- ✓ бамперы и др.

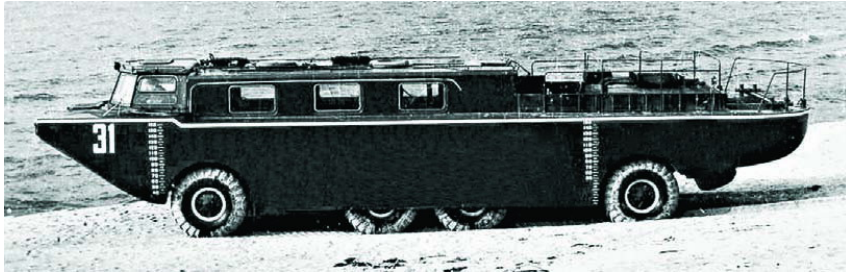




# Основные области применения КОМПОЗИТОВ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ



## 2. Корпуса плавающих машин





# Основные области применения КОМПОЗИТОВ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ



## 3. Узлы трансмиссии:

- ✓ трубы карданных передач,
- ✓ фрикционные накладки дисков сцепления,
- ✓ фрикционные элементы управления коробок передач и др.



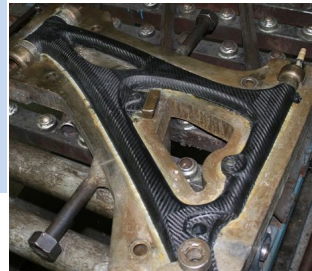


# Основные области применения композитов в автомобилестроении



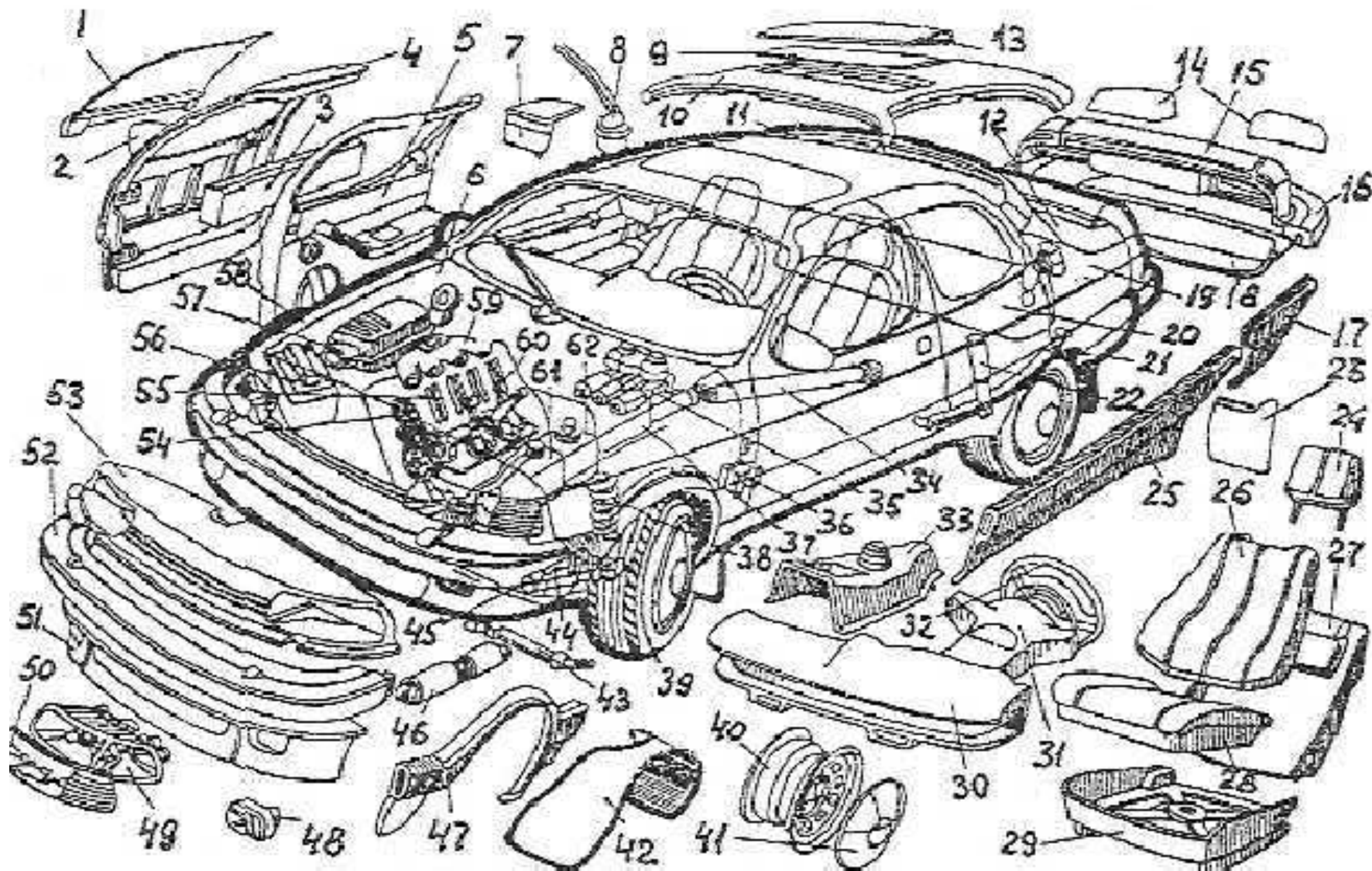
## 4. Узлы ходовой части автомобиля:

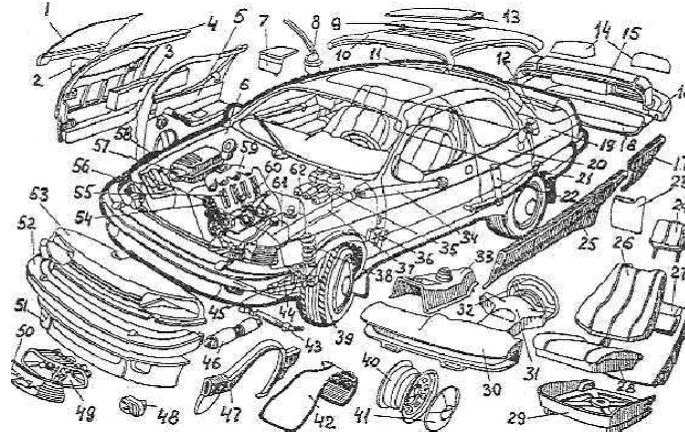
- ✓ упругие элементы систем поддрессоривания,
- ✓ подшипники скольжения,
- ✓ рычаги подвески,
- ✓ фрикционные элементы тормозных механизмов,
- ✓ ободья колес,
- ✓ декоративные колпаки колес легковых автомобилей и др.



- ❑ Начало 40-х годов прошлого века – созданы первые высокопрочные композиты с использованием хлопкового волокна, пропитанного фенольной смолой, полиэфирным связующим.
- ❑ Из всех производимых ПКМ в настоящее время 50% используется в авиакосмической промышленности, 25 % в автомобильной, медицинской, строительной и военной отраслях и 25% в производстве спортивных товаров.







1 – стекло двери; 2 – зеркало наружное; 3 – брус пояса жесткости; 4 – двери; 5 – внутренняя панель двери; 6 – капот; 7 – внутреннее зеркало; 8 – стеклоочиститель; 9 – прозрачная крыша вентиляционного люка; 10 – крыша; 11, 51 – спойлеры; 12 крышка багажника; 13 – обтекатель; 14 – задние фонари; 15, 18 – детали задней панели кузова; 16, 52 – бамперы; 17, 25, 47 – противокоррозионные накладки; 19, 58 – крылья; 20 топливный бак; 21 рессора подвески; 22 – амортизатор подвески; 23 – грязезащитный фартук; 24 – подголовник; 26 – спинка сиденья; 28 – подушка сиденья; 30 – панель приборов; 31 – кожух рулевой колонки; 32 – рулевое колесо; 33 – кожух тоннеля пола; 34 – труба карданного вала; 35 – цилиндры гидроприводов; 36 – петля двери; 37 – картер сцепления и коробки передач; 38 – пружина подвески; 39 – шина; 40 – колесо; 41 – декоративный колпак; 42 – противокоррозионный вкладыш крыла; 44 вал привода переднего колеса; 44 – рычаг независимой подвески колес; 45 – стабилизатор поперечной устойчивости; 46 – амортизатор бампера; 48 – противотуманная фара; 49 – блок-фара; 50 – рассеиватель блок-фары; 53 – передняя панель кузова; 54 – привод газораспределительного механизма; 55 – толкатели двигателя с нижним распределительным валом; 56 – корпус и крыша аккумулятора; 57 – корпус воздушного фильтра; 59 – впускной коллектор 60 – шатуны; 61 – расширительный бачок; 62 – бачок омывателя.



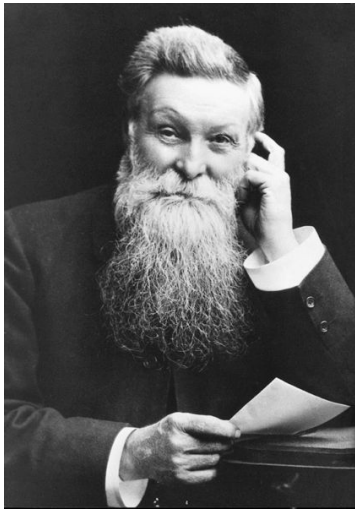
Конструкция современной пневматической шины – это одна из самых совершенных и сложных композитных конструкций, которые применяются в настоящее время в автомобилестроении.



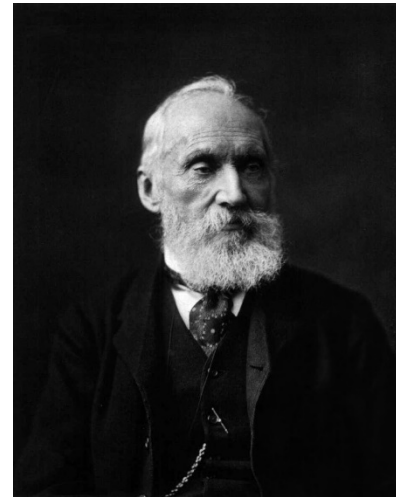
# Изобретение пневматической шины



Изобретение первой конструкции пневматической шины, послужившей отправной точкой в развитии шинной промышленности, приписывают английским изобретателям Джону Бойду Данлопу и Роберту Уильяму Томсону. Данлоп изобрел надувную велосипедную шину, запатентовав своё изобретение в 1888 году, однако в последствии его патент был аннулирован в интересах поданного ранее патента Томсона, который уже запатентовал пневматическую шину в 1845 году. С тех пор конструкция пневматической шины претерпевала множественные изменения, что привело к большому многообразию типов пневматических шин, классифицируемых по десяткам признаков.



Джон Бойд Данлоп  
(англ. John Boyd Dunlop;  
5 февраля 1840—23 октября 1921)

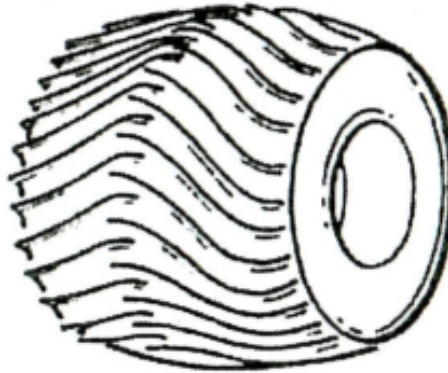


Уильям Томсон  
(англ. William Thomson; 26 июня 1824  
— 17 декабря 1907)



Авиационные шины

Автомобильные шины

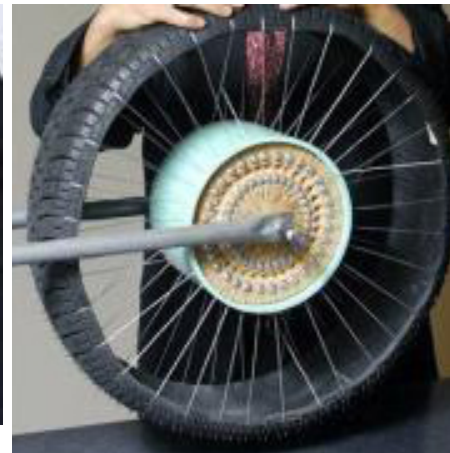


Шины специального назначения

Пневмококки и абочные шины



# Непневматические шины





# Место композиционных материалов в автомобилестроении. Корпуса колесных машин (2)



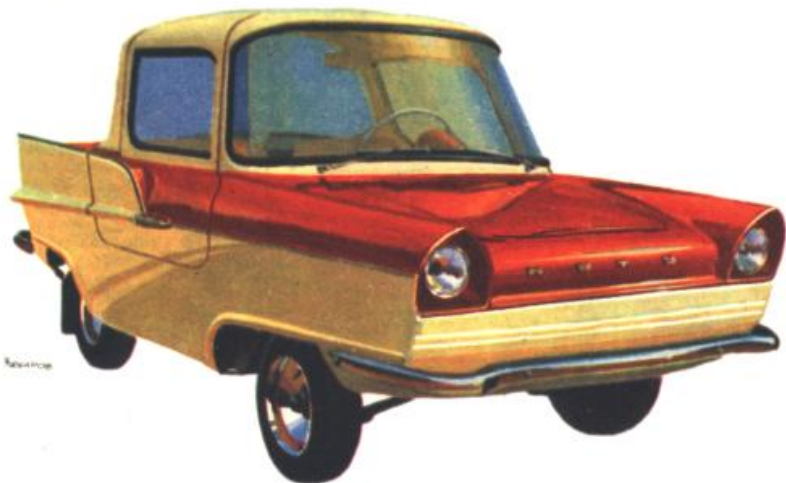
Колесная машина  
ЗИЛ-БАЗ-135 кабиной, облицовкой  
мотоотсека и оперением из полимерных  
композиционных материалов



Плавающая колесная машина ЗИЛ-  
135П с несущим (безрамным)  
корпусом из полимерных  
композиционных материалов



# Автомобиль «МВТУ»



В 1958 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана был создан экспериментальный автомобиль “МВТУ”. Микролитражный автомобиль имел кузов каркасно-панельного типа с панелями из стеклопластика. 8 панелей, составлявших кузов, содержали от 11 до 20 слоев стеклоткани. Масса несущей системы составляла 47 кг, автомобиль был продемонстрирован на выставке в ВДНХ.



# Плавающий автомобиль ЗИЛ-135П



Несущая система плавающего автомобиля ЗИЛ-135П, созданного в 1965 г., состоит из лодкообразной трехслойной конструкции. Пространство между внутренней и наружной стеклопластиковыми оболочками заполнено армированным бакелизированной фанерой пенопластом. Толщина наружной стеклопластиковой оболочки составляет от 4 до 5 мм, внутренней – до 3 мм. Толщина пенопласта достигает 30 мм.



# Серийные поисково-эвакуационные автомобили ЗИЛ-4906 и ЗИЛ-49061



Серийные поисково-эвакуационные автомобили ЗИЛ-4906 и 49061 имели корпуса из полиэфирного стеклопластика со встроенными алюминиевыми рамами лонжеронного типа. Такая конструкция проще в изготовлении, чем конструкция ЗИЛ-135П.



# Автобус Evopro Modulus



Автобус венгерской фирмы Evopro Modulus имеет модульную конструкцию из стеклопластиковых секций, и может быть изготовлен в 2-х и 3-х дверном вариантах. Автобус может выпускаться в электрическом и гибридном исполнениях. Использование стеклопластика позволило значительно уменьшить массу несущей системы. Панели автобуса изготавливаются методом вакуумной инфузии.



# Применения несущих систем из композиционных материалов

Перспективным методом совершенствования несущих систем является применение для их изготовления полимерных композиционных материалов.

Раньше остальных, для изготовления композитных несущих систем автомобилей начали применяться стеклопластики. Компактные автомобили с несущей системой из стеклопластика получили распространение в Англии в 1950-х годах. Большинство этих автомобилей имели переднемоторную компоновку и двухместные кузова типа купе. Наиболее яркими представителями являются автомобили Lotus Elite, Rochdale Olympic и Mini Marcos. В отличие от автомобилей Chevrolet Corvette и Pontiac Firebird, которые имели несущую систему каркасно-панельного типа с панелями из стеклопластика, в этих автомобилях стеклопластиковый корпус являлся несущим.



# Lotus Elite



Стеклопластиковый кузов был усилен стальной конструкцией для крепления передней подвески и двигателя, а также стальной рамкой ветрового стекла, повышающей безопасность. Снаряженная масса двухместного автомобиля составляла 504 кг. При мощности двигателя 75 л.с. автомобиль обладал относительно высокими скоростными показателями, что обуславливало его участие в автогонках. Lotus Elite производился с 1957 по 1963 гг.



# Rochdale Olympic и Mini Marcos



Rochdale Olympic, автомобиль был выпущен в 1959 году, имел 4 посадочных места, оснащался двигателем мощностью 78 л.с., и имел снаряженную массу 650 кг.



Автомобиль Mini Marcos имел 2 посадочных места и снаряженную массу всего 476 кг, выпуск начался в 1965 году.



# Chevrolet Corvette и Pontiac Firebird



Chevrolet Corvette, автомобиль был выпущен в 1958 году, имел 2 посадочных места, оснащался двигателем мощностью 150 л.с.



Pontiac Firebird автомобиль, выпускавшийся концерном General Motors с 1967 по 2002 года, оснащался двигателем мощностью 250 л.с.



# McLaren MP4



Прежде чем найти применение в легковых дорожных автомобилях, несущие системы из углепластика начали применяться в конструкции гоночных автомобилей. Впервые такая несущая система была применена в 1978 году на автомобиле McLaren MP4, выступавшем в классе “Формула 1”.



# McLaren F1



Впервые несущая система из композиционных материалов для изготовления несущей системы автомобиля, предназначенного для движения по дорогам общего пользования, была применена в 1992 году в автомобиле McLaren F1.



# Несущая система автомобиля Alfa Romeo 4C



В отличие от большинства спортивных автомобилей высшей ценовой категории, выпускаемых ограниченными сериями, автомобиль Alfa Romeo 4C выпускается серийно с объемом выпуска 2500 автомобилей в год. Средняя часть автомобиля изготовлена из углепластика, к ней крепится передняя подвеска. В передней части установлен алюминиевый энергопоглощающий элемент. Задняя часть автомобиля изготовлена из алюминия, к ней крепится задняя подвеска и двигатель. Деформируемая зона в передней части изготовлена из алюминия. Автомобиль имеет среднемоторную компоновку с приводом на задние колеса. Производство началось в 2013 году. Автомобиль является примером использования несущей системы из композиционных материалов в серийном автомобиле в ценовой категории до 100000\$.



# Несущая система автомобиля BMW i3



Несущая система электромобиля BMW i3 состоит из плоской алюминиевой рамы, на которой закреплены элементы подвески, аккумуляторы и электродвигатели. На алюминиевую раму устанавливается модуль, полностью изготовленный из углепластика, в котором размещаются пассажиры и груз. По словам представителей компании BMW использование углепластика позволило снизить массу автомобиля на 300 кг, таким образом, скомпенсировав большой вес аккумуляторных батарей. Снаряженная масса автомобиля составляет 1195 кг.



# Несущая система автомобиля BMW i8



Еще одним автомобилем от компании BMW с несущей системой из композиционных материалов является BMW i8. Это двухместное купе имеет среднюю часть из углепластика, в то время как подвеска, электрический и бензиновый двигатели крепятся к алюминиевым передней и задней частям. Автомобиль обладает высокими скоростными характеристиками и низким расходом топлива. Стоимость автомобиля начинается от 135 925\$. При этом за 1 месяц 2014 года был продан 1741 автомобиль.



# Несущая система автомобиля Volkswagen XL-1



Фирма Volkswagen для своего гибридного автомобиля также выбрала несущую систему из полимерных композиционных материалов. Заявленный расход топлива на 100 км пути для автомобиля Volkswagen XL-1 составляет 0,9л. Кроме использования гибридной силовой установки и низкого коэффициента лобового сопротивления, такие показатели также обеспечиваются снижением массы несущей системы.



## Тенденция изменения стоимости и объема выпуска автомобилей с несущей системой из композиционных материалов

Модель	Годы производства	Объем выпуска	Цена
McLaren F1	1992-1998	106	\$1 200 000
Ferari F50	1995-1997	349	\$528 000
Pagani Zonda	1998	135	\$500 000
Ferari Enzo	2002	400	\$659 330
Porsche Carrera GT	2003-2006	1270	\$540 000
Mercedes-Benz SLR	2003-2010	1400	\$450 000
Lexus LFA	2010-2012	500	\$540 000
McLaren 12C	2011	4000	\$231 400
Lamborghini Aventador	2011	2536	\$393 695
Alfa Romeo 4C	2013	2500 в год	\$55 000
BMW i3	2013	16 000 в год	\$42 275
BMW i8	2014	5000 в год	\$135 000



## Основные преимущества КМ для автомобилей:

- 1) снижение массы;
- 2) снижение материалоемкости и трудоемкости изготовления изделий;
- 3) снижение энергоемкости производства;
- 4) снижение затрат на борьбу с коррозией;
- 5) повышение безопасности эксплуатации и долговечности;
- 6) повышение конкурентоспособности автомобилей.



# Получение композитов с заданными физико-механическими характеристиками



Получение КМ с заданными физико-механическими характеристиками имеет ряд особенностей.

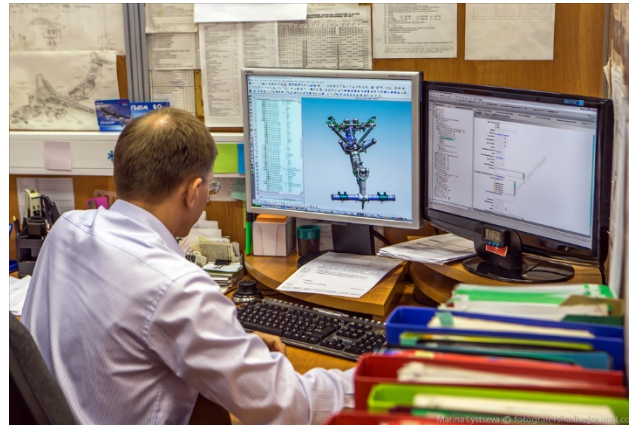
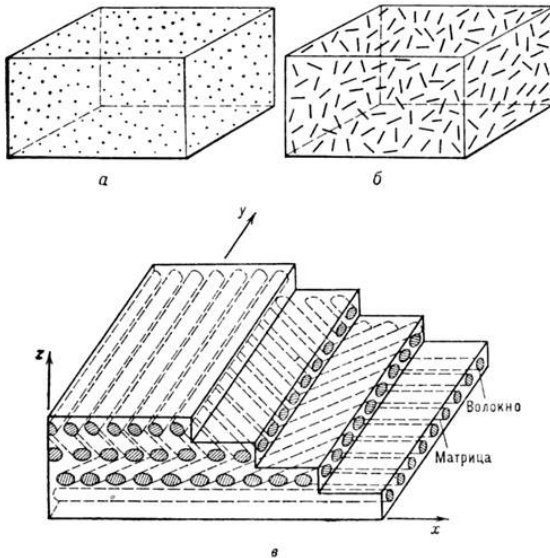
1. Свойства композита формируются в процессе производства конкретной конструкции.

2. Процесс проектирования изделия начинается с конструирования самого материала — выбора его компонентов и назначения оптимальных режимов производства.

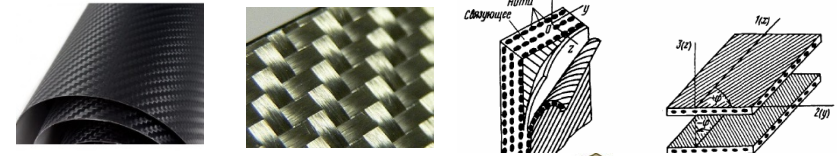
3. Без учета особенностей технологии производства нельзя правильно назначить требования к композиту (как к конструкционному материалу) и тем более к самой конструкции.

Главная особенность создания конструкций из КМ, в отличие от традиционных конструкций, заключается в том, что конструирование материала, разработка технологического процесса изготовления и проектирование самой конструкции – это единый взаимосвязанный процесс, в котором каждая из составляющих не исключает, а дополняет и определяет другую.

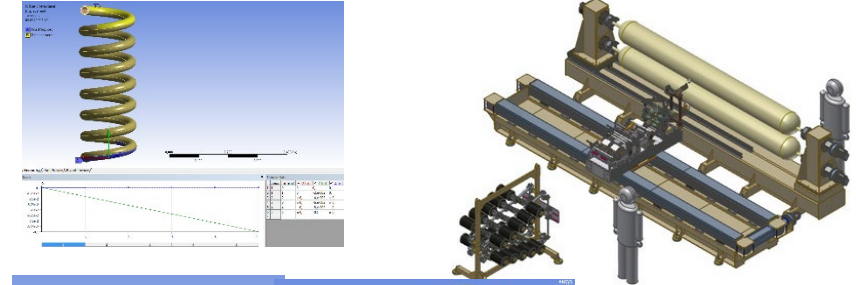
Триада: материал—конструкция—технология неразделима.



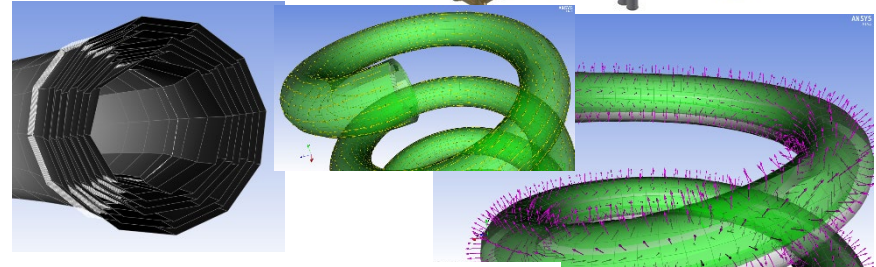
Выбор композитного материала с учетом его структуры



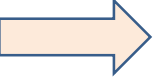
Конструирование изделия и выбор технологии изготовления



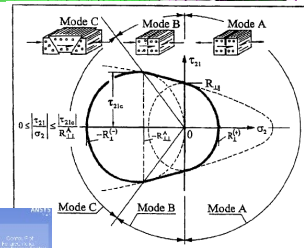
Создание расчетной модели изделия с учетом структуры композита (анизотропии свойств материала)



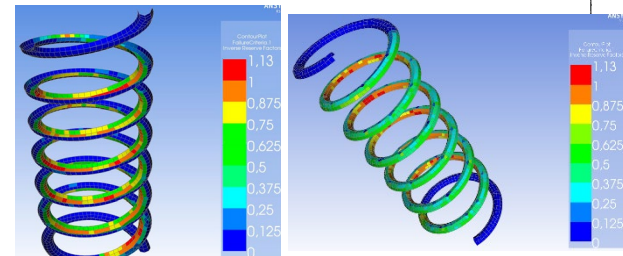
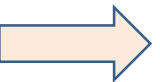
Выбор критериев разрушения композиционного материала



$$f = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{xy}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{yz}^2} - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} - 1.0 \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\sqrt{Y_t Y_c Z_t Z_c}} - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{\sqrt{X_t X_c Z_t Z_c}} + \sigma_1 \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_2 \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) + \sigma_3 \left( \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right)$$

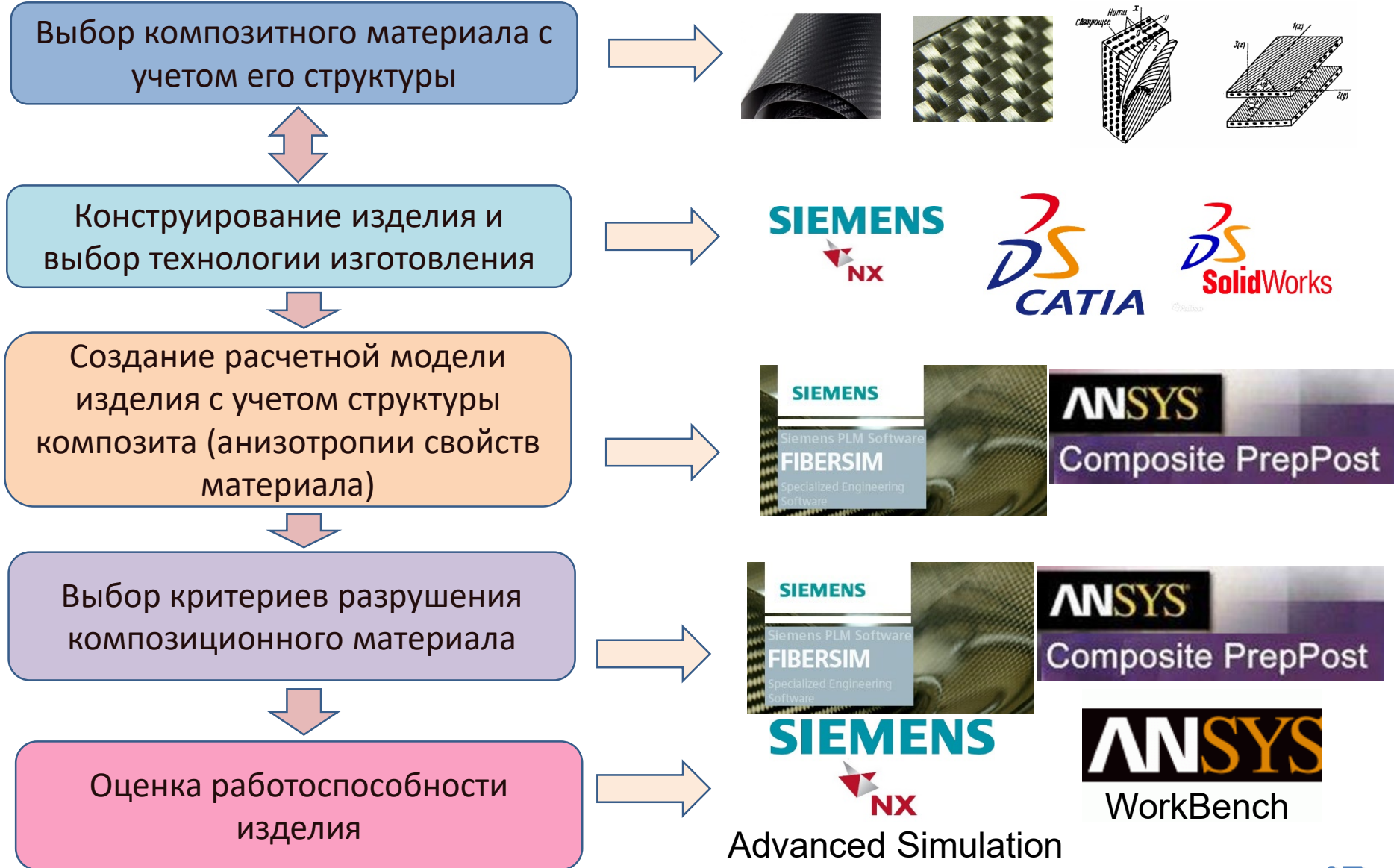


Оценка работоспособности изделия





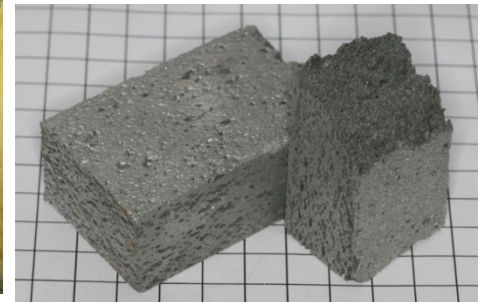
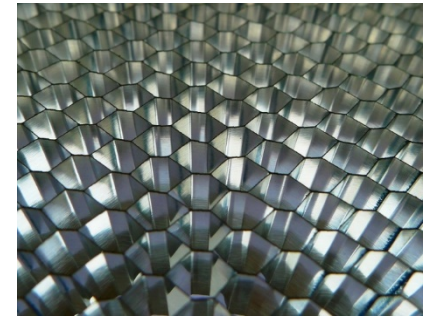
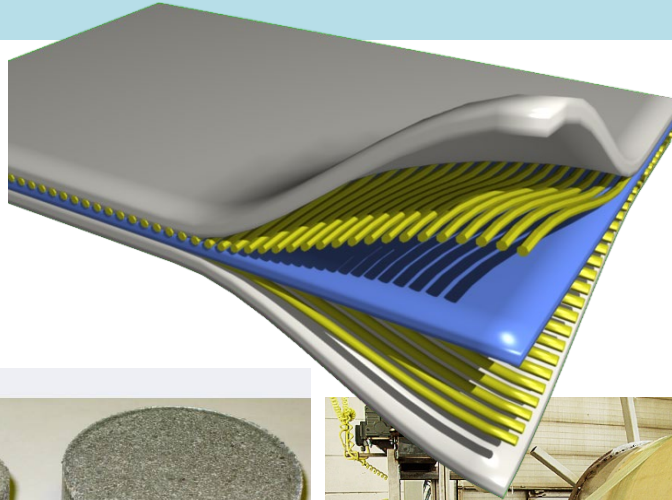
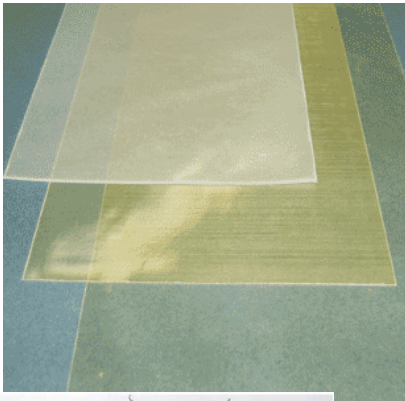
# Этапы разработки конструкций из композитов и CAD/CAM/CAE системы



## 1.1 Основные понятия и определения

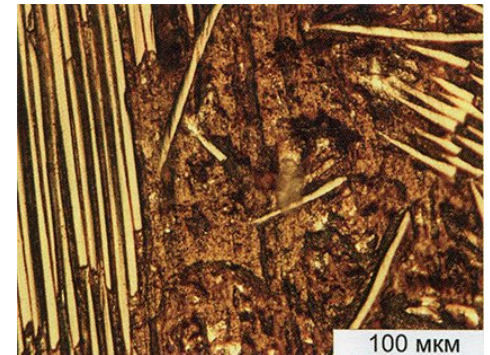
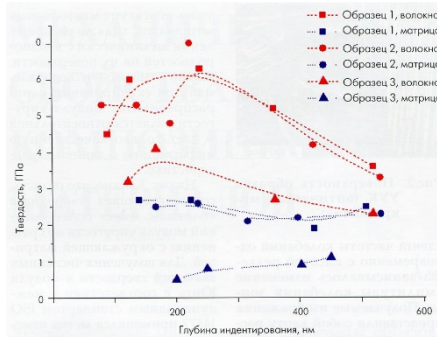
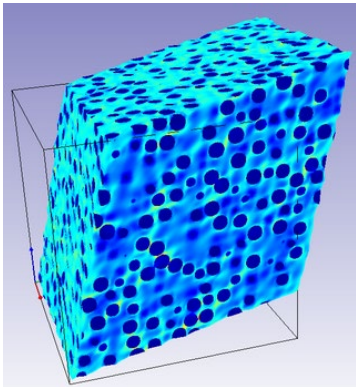
### Определение

*Композиционные материалы или композиты* (от лат. composition – сочетание) – многофазные анизотропные материалы, образованные объемным сочетанием химических разнородных компонентов с четкой границей раздела фаз между ними.

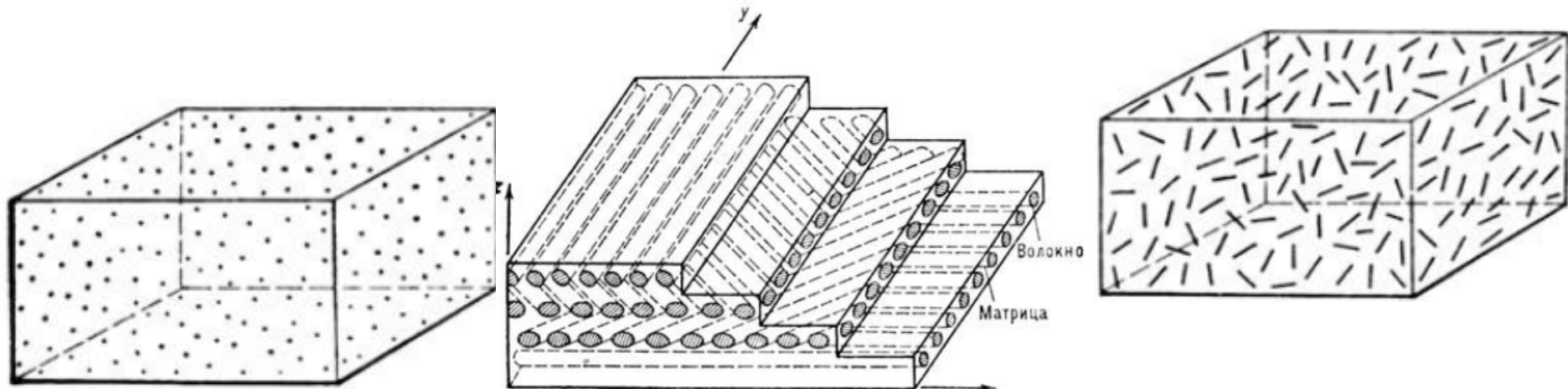


Основные признаки композиционного материала (КМ):

- 1) создан человеком;
- 2) состоит минимум из 2-х составляющих;
- 3) составляющие распределены по объему друг в друге;
- 4) характеризуется свойствами, которыми не обладают ни один из компонентов материала, взятый в отдельности.



Обычно композиционный материал состоит из *матрицы*, служащей связующим материалом и включений различных компонентов в виде *волокон*, *порошков*, *нитевидных кристаллов* и т.д. Варьируя объемное содержание компонентов можно получить КМ с требуемыми характеристиками: прочности, жесткости, плотности и т.д.





## 1.1 Основные понятия и определения (4). Терминология



**Матрица** – составляющая часть композита, обеспечивающая его монолитность и совместную работу арматуры.

**Армирующий элемент (арматура), наполнитель** – составная часть композита нитяной, жгутовой, проволочной, ленточной или тканевой структуры с известными физико-механическими характеристиками материалов.

**Связующие** – смола, раствор, газ, порошок или расплав образующий матрицу в процессе изготовления композита.

**Препрег** – полуфабрикат, представляющий собой волокнистый армирующий материал, пропитанный связующим в определенном весовом соотношении.

**Отверждение** – процесс затвердевания связующего при изготовлении композита в результате полимеризации, поликонденсации, перехода из жидкой фазы в твердую, а также кристаллизации.

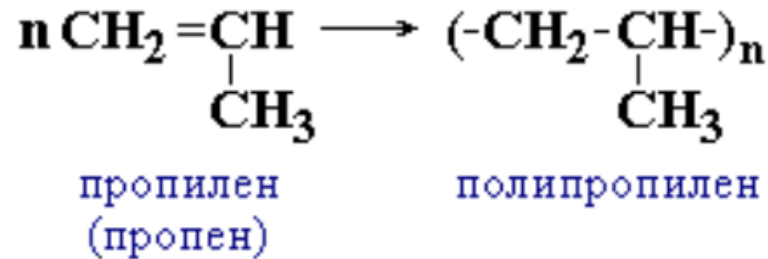
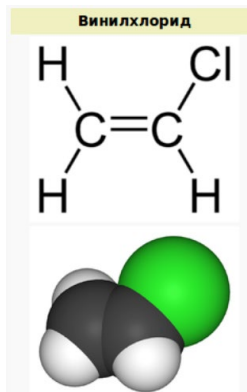


# 1.1 Основные понятия и определения (5). Терминология (2)



**Аппрет** – состав из крахмала, эфира, синтетических смол, жировых и других веществ, которым обрабатываются при отделке (аппретуре) такие текстильные материалы, как ткани и пряжа для придания им требуемых свойств: определённой эластичности или жёсткости, блеска, безусадочности, несминаемости.

**Мономер** (др.-греч. Μόνος – один; μέρος – часть) – это низкомолекулярное вещество, образующее полимер в реакции полимеризации. Мономерами также называют повторяющиеся звенья (структурные единицы) в составе полимерных молекул.



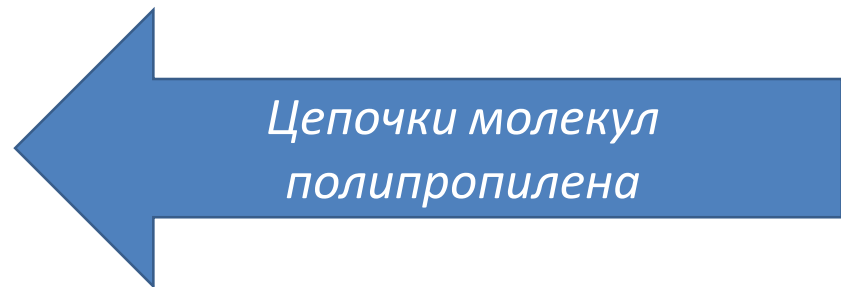
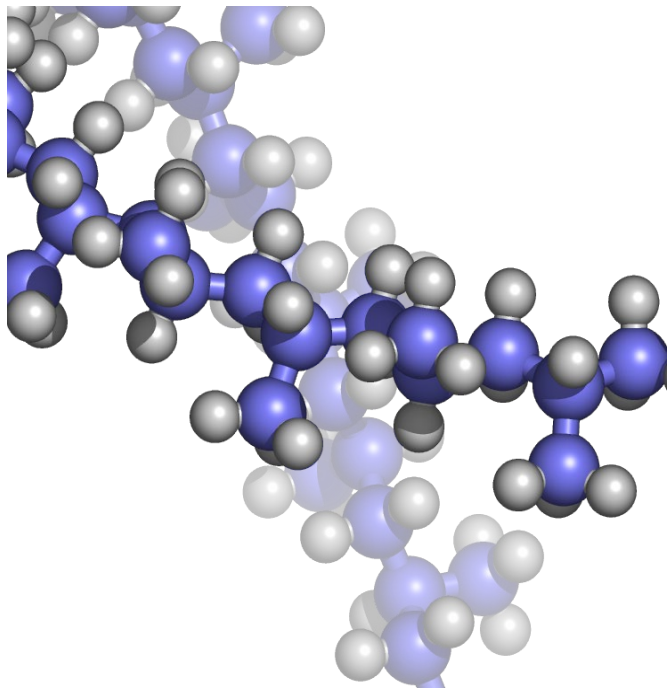


# 1.1 Основные понятия и определения (6). Терминология (3)



**Полимеры** (греч. πολύ – много; μέρος – часть) – неорганические и органические, аморфные и кристаллические вещества, получаемые путём многократного повторения различных групп атомов, называемых «мономерными звеньями», соединённых в длинные макромолекулы химическими или координационными связями.

Количество звеньев (степень полимеризации) может считаться достаточным, чтобы отнести молекулу к полимерам, если при добавлении очередного мономерного звена молекулярные свойства не изменяются. Как правило, полимеры – вещества с молекулярной массой от нескольких тысяч до нескольких миллионов.





# 1.1 Основные понятия и определения (7). Терминология (4)



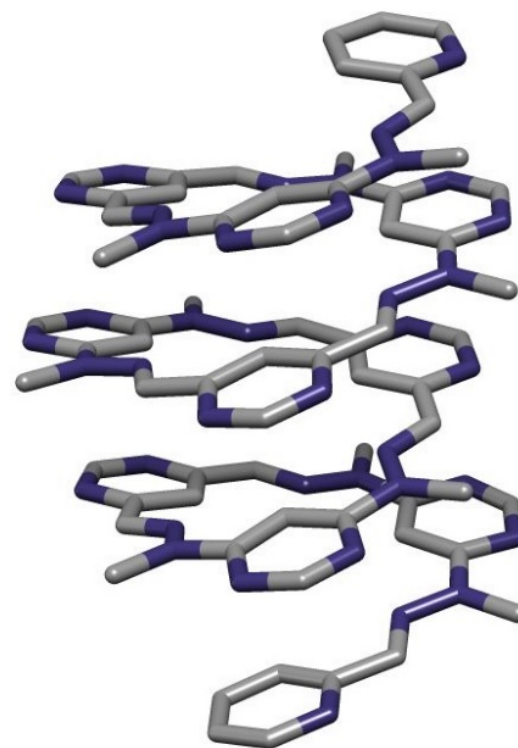
**Олигомер** (греч. Ολίγος – малый, немногий, незначительный; μέρος – часть) – молекула в виде цепочки из небольшого числа одинаковых составных звеньев.

Свойства олигомеров сильно зависят от изменения количества повторяющихся звеньев в молекуле и природы концевых групп.

Этим олигомеры отличаются от полимеров, в которых число звеньев теоретически не ограничено.

С момента, когда химические свойства перестают изменяться с увеличением длины цепочки, вещество называется полимером.

Олигомер из 11 звеньев, сложившийся во вторичную структуру — фолдамер



**Пластмáссы** (пластíческие мáссы) или плáстики – материалы, основой которых являются синтетические или природные высокомолекулярные соединения (полимеры и олигомеры).



**Реактопласты** (терморреактивные пластмассы) – композит, имеющий полимерную матрицу с пространственной молекулярной структурой, которая отверждается при нагреве или комнатной температуре в результате необратимой химической реакции, приводящей к образованию неплавкого и нерастворимого материала. В реактопластах связь между макромолекулами матрицы осуществляется с помощью химических связей.

**Термопласт** – полимерный композиционный материал, имеющий наиболее простую нелинейную молекулярную структуру, которая отверждается при охлаждении. Термопласты способны обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние. В термопластах связь между макромолекулами матрицы осуществляется с помощью слабых сил Ван-Дер-Ваальса.



**Эластомер** – это полимер, обладающий в диапазоне эксплуатации высокоэластичными свойствами. Эластомеры обладают низкими температурами стеклования, а термопластики – высокими (это правило работает только для аморфных полимеров, а не для кристаллизующихся).



# 1.1 Основные понятия и определения (9). Терминология (6)



**Полимерные композиционные материалы (ПКМ)** – композиты, содержащие полимерную матрицу.



**Металлические композиционные материалы** – композиты, содержащие металлическую матрицу.



**Керамические композиционные материалы** – композиты, содержащие керамическую матрицу.

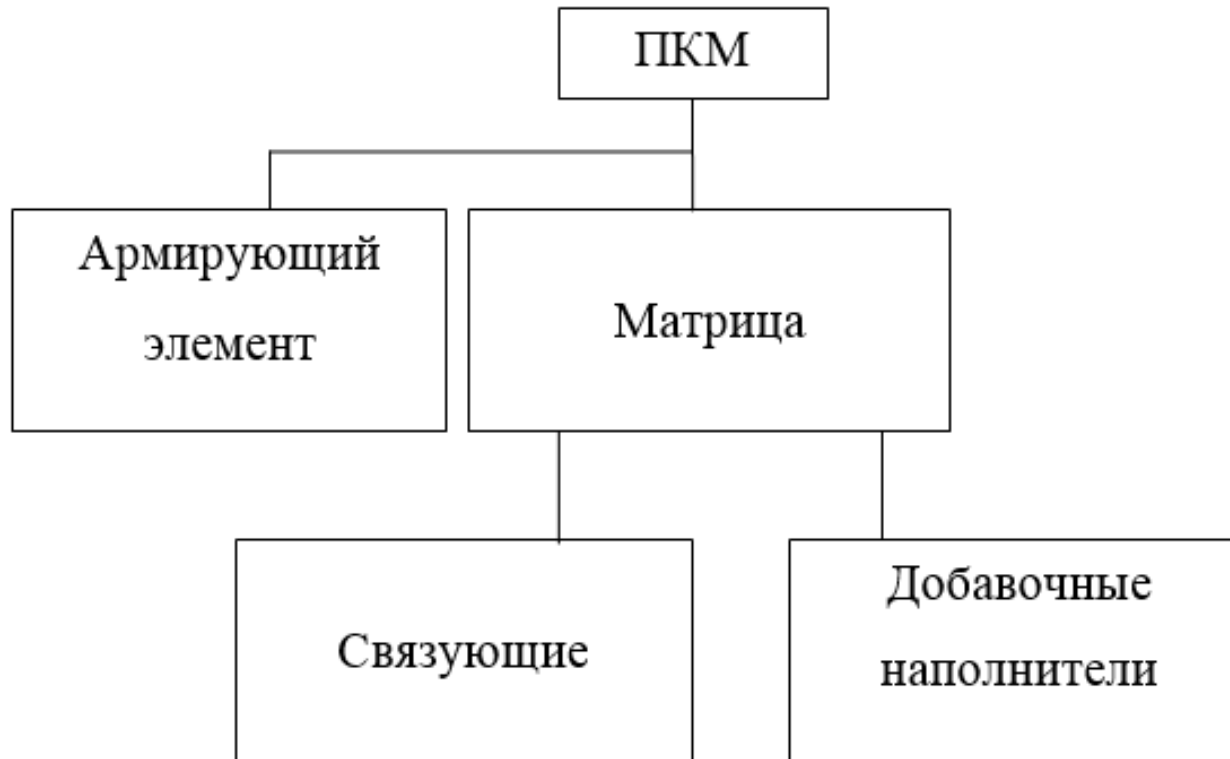


**Углерод-углеродные композиционные материалы** – композиты на основе углеродных волокон и углеродной матрицы.





## 1.2 Общая структура ПКМ





# Матрица



Понятие «матрица» характеризует непрерывную пространственную фазу, ответственную за сохранение конфигурации изделия, передачу эксплуатационных нагрузок на армирующие элементы (арматуру), сопротивление действию других внешних факторов. В отличие от более широкого понятия «связующее» понятие «матрица» применимо только к отвердевшему (готовому) АП.

Критериями оценки матричной фазы являются:

- пористость,
- герметичность,
- стойкость к действию эксплуатационных сред (влаго-, бензо-, масло-, кислотостойкость и т. п.),
- остаточная напряженность,
- прочность адгезионного взаимодействия с арматурой,
- механические свойства (при растяжении, сжатии, сдвиге),
- вязкость разрушения при различных нагружениях (статическое, динамическое, циклическое, ударное).



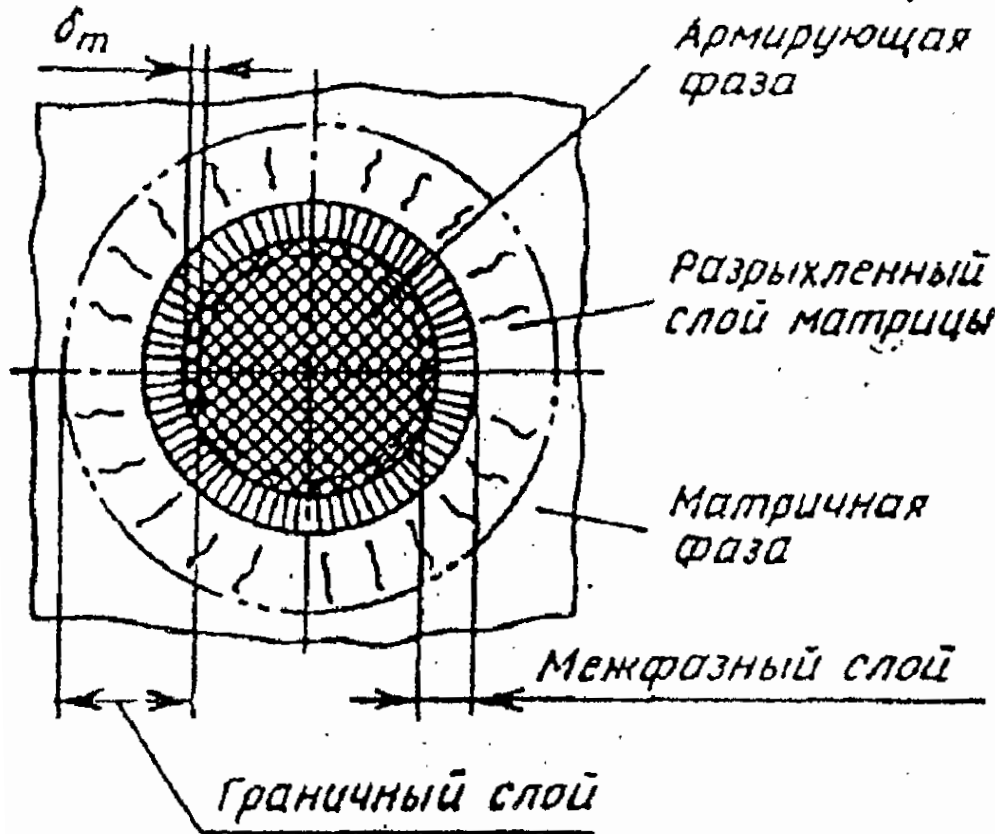
Понятие «связующее» имеет технологическое толкование – полимерный состав, который предназначается для изготовления полимерного материала и в зависимости от типа полимера (смолы) как основного компонента.

## Связующее содержит:

- *растворитель,*
- *катализатор,*
- *ускоритель,*
- *пластификатор,*
- *другие компоненты.*

## Связующее характеризуется:

- ✓ *жизнеспособностью,*
- ✓ *вязкостью,*
- ✓ *смачивающей способностью,*
- ✓ *адгезией,*
- ✓ *технологичностью,*
- ✓ *наличием побочных продуктов переработки,*
- ✓ *усадкой,*
- ✓ *экологичностью.*



Армирующая фаза – совокупность непрерывных волокнистых армирующих элементов в виде элементарных волокон, комплексных нитей, жгутов (ровингов), лент, тканей с различной текстурой, сеток с различной плотностью, а также короткими волокнами в составе штапельных тканей, матов и т. п.

Межфазный слой – слой непосредственно примыкающий к поверхности раздела, он вбирает в себя аппрет, замасливатель и другие низкомолекулярные включения связующего у поверхности армирующих волокон.



## **1) По материаловедческому аспекту:**

### ■ по материалу связующего:

- полимерные;
- металлические;
- керамические;
- углерод-углеродные;

### ■ по материалу арматуры:

- стекло-композиты;
- боро-композиты;
- органо-композиты;
- металло-композиты;
- керамика-композиты.



## ***2) По конструкционному признаку или по укладке:***

- хаотические армированные композиты;
  - упорядоченно армированные;
  - волокнистые однонаправленные;
- слоистые или двухмерноармированные  
(нить, жгут, ткань, пленка);
- пространственные многомерноармированные  
(система нитей или жгутов и система стержней).



## **3) По технологическому признаку:**

### **■ по типу армирования:**

- армированные короткими волокнами;
- армированные непрерывными волокнами;

- армированные тканями;

- армированные лентами;

### **■ по способу переработки:**

- изготовленные прессованием;

- изготовленные намоткой;

- изготовленные литьем;

- изготовленные контактным формованием.

Схема армирования	Виды армирующих элементов		
	Непрерывные волокна *	Пленки **	Дискретные волокна ***
Одномерная			
Двумерная			
Трёхмерная		—	—
Хаотическая		—	

Классификационные модели ПКМ по конструкционному признаку или по укладке

- \* - в том числе в составе лент и тканей;
- \*\* - направления ориентации пленок;
- \*\*\* - также в виде монокристаллов (усов) и нетканых материалов



**Композиционные материалы с полимерной матрице классифицируются по:**

**1) типу полимерной матрицы:**

- реактопласты (отверждающиеся);
- термопласты или термопластичные композиционные материалы (ТКМ);

**2) деформативности матриц:**

- вязкоупругие;
- эластичные композиты.

**3) количеству направлений армирования:**

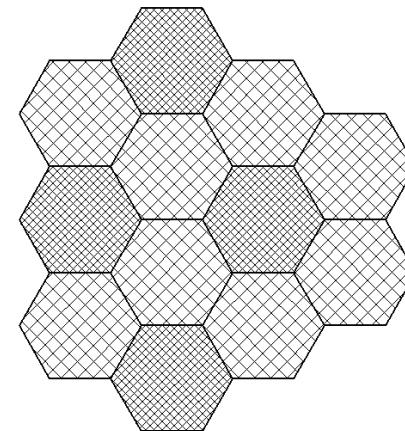
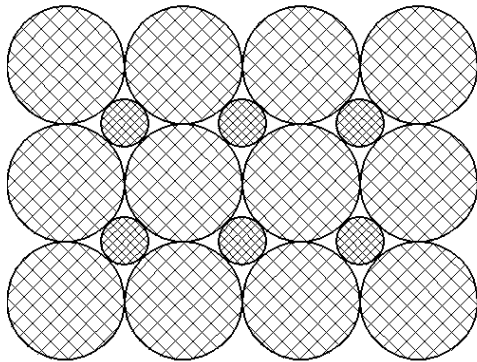
- однонаправленные ПКМ, они характеризуются соотношением 1:0, где показывается долевое количество армирующих волокон в продольном и поперечном направлениях;
- двухмерноармируемые ПКМ с соотношениями 1:1, 1:2, 1:3, 3:4 и т. д., в зависимости от числа волокон в смежных слоях.

## 4) вариантам армирования:

- армированные однородно;
- армированные комбинированно;

## 5) объему армирования:

- низкоармированные  
(содержащие дискретные волокна в объеме не более 30..40 %);
- высокоармированные  
(содержащие дискретные волокна в объеме не более 55..65 %);
- предельноармированные  
(содержащие дискретные волокна в объеме не более 90..99 %);





**б) эксплуатационному назначению ПКМ классифицируются на:**

- конструкционные материалы;
- функциональные материалы.

**Конструкционные ПКМ**, предназначенные для механического сопротивления эксплуатационным нагрузкам, характеризуются прочностью, жесткостью, а также тепло-, термо- и криостойкостью и т.д.

**Функциональные ПКМ** в зависимости от назначения могут быть:

- электротехническими (диэлектрики, полупроводники, электропроводники и т. п.);
- магнитными, устойчивыми к различным излучениям; оптическими, фрикционными и антифрикционными;
- тепло-, звуко-, газоизолирующими, стойкими к различным средам и др

## 7) уровням свойств:

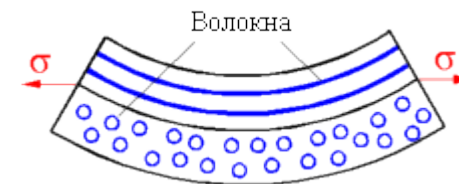
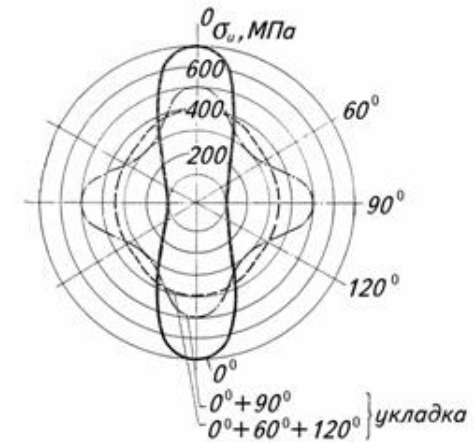
- низкопрочные,
- прочные,
- высокопрочные,
- сверхвысокопрочные;

## 8) модулям упругости:

- низкокомодульные,
- высококомодульные,
- сверхвысококомодульные;

## 9) стойкости к горению:

- горючие;
- трудносгораемые;
- негорючие.





**ПКМ могут получать наименование по одному из компонентов.**

- **По матрице:** фенопласты, эпоксипласты, имидопласты или соответственно различают: стекло-, угле- (углеродо-), боро-, эполиэфирные, полиамидные, кремнийорганические и т. п.
- **По волокнообразующим материалам:** органо-, базальтопластики и др.
- Более полными оказываются названия ПКМ, **объединяющие оба признака:** эпоксистеклопластики, феноуглепластики, имидобазальтопластики.
- Также применяют **названия в развернутом виде:** полиамидные органопластики, эполиэфирные стеклопластики и т. д.



## 1.4 Общие принципы подходов к проектированию изделий из КМ



При проектировании конструкций из однонаправленных волокнистых композитов существует два принципиально разных подхода:

1) подход базируется на том, что материал конструкции рассматривается как некоторая композиция, для которой известны все физико-механические характеристики, т.е. можно использовать соотношения теории упругости;

2) подход базируется на положении следующего характера: равновесие конструкции соблюдается тогда, когда в равновесии находится каждая отдельная нить или волокно.



## 1.5 Структурные особенности композитов

Рассмотрим типовые структуры композитов, образованные в результате совмещения описанных выше армирующих элементов и матриц. К таким структурам условно можно отнести:

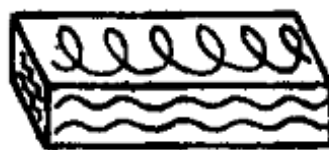
- 1) ориентированные материалы, армированные прямолинейными волокнами (а);
- 2) композиты, армированные тканями (б);
- 3) материалы, хаотически армированные непрерывными волокнами (в);
- 4) материалы, хаотически армированные дискретными волокнами (г);
- 5) пространственно армированные системы (д).



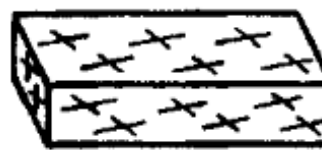
а)



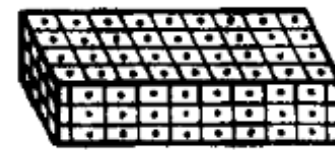
б)



в)



г)



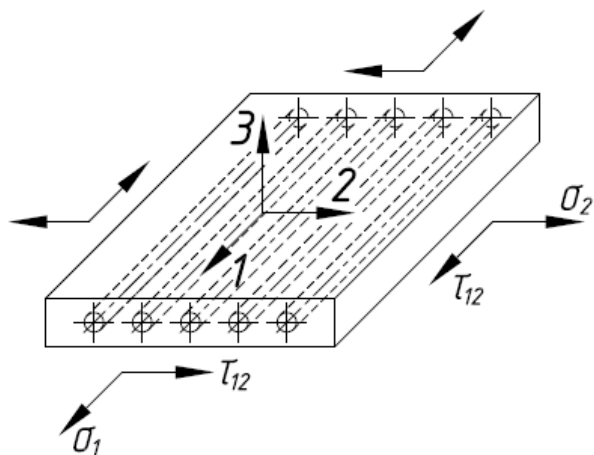
д)



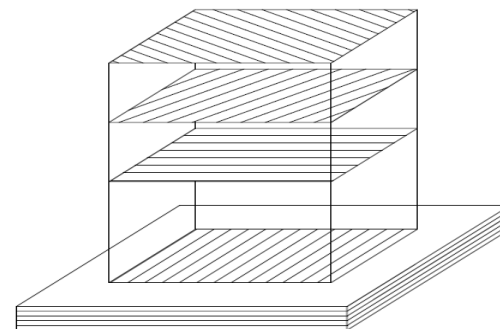
# Уровни неоднородности композитов

Композиции обладают двумя уровнями неоднородности:

1) микroneоднородность – уровень, связанный с наличием двух фаз (волокон и матрицы);



2) макroneоднородность – уровень, связанный с наличием в материале различным образом ориентированных микroneоднородных слоев.



При расчете и проектировании конструкций обычно учитывают только второй уровень неоднородности материала, т. е. считается, что он состоит из совокупности квазиоднородных слоев, свойства которых известны.



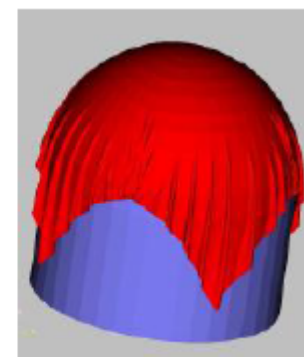
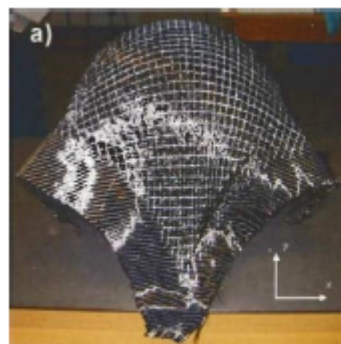
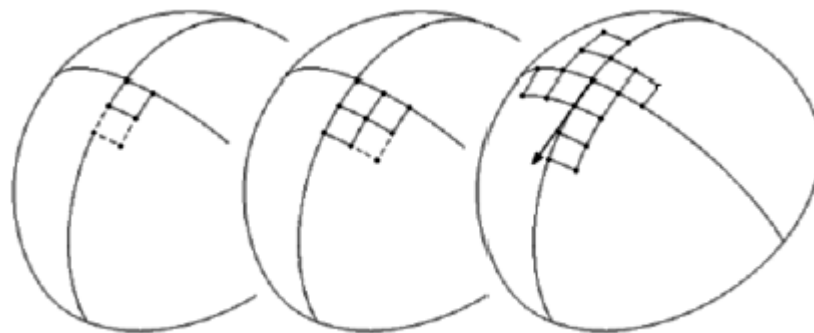
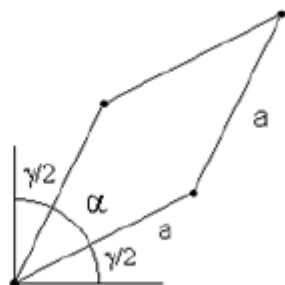
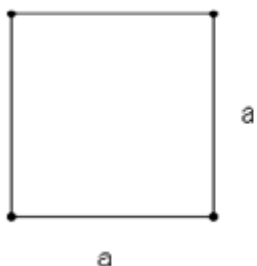
# Учет деформации ткани при укладке (draping)

## Энергетический алгоритм

$$\min E = \frac{1}{2} G \gamma^2$$

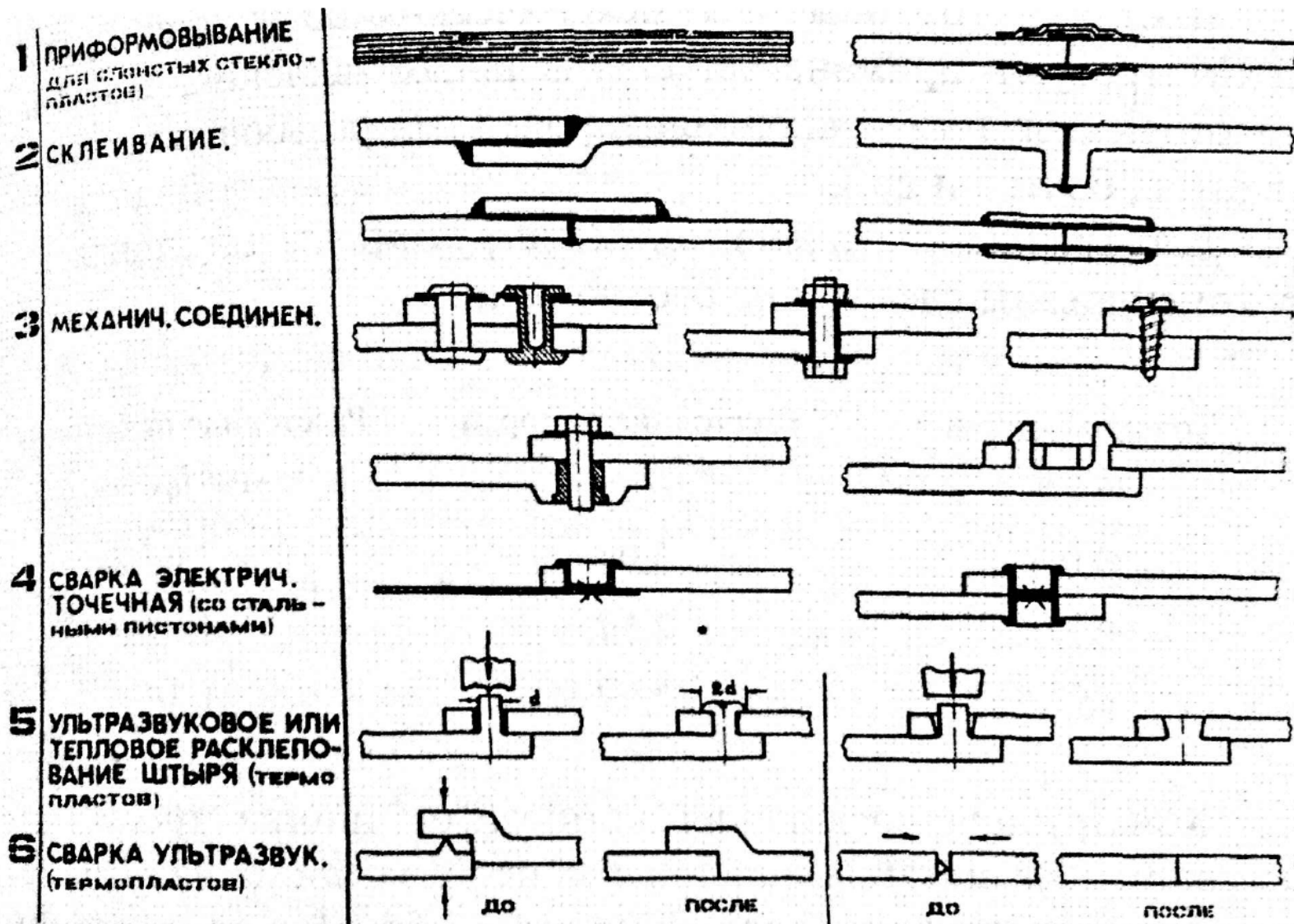
$$\gamma \approx \cos \alpha$$

$$\min E' = \sum_{i=1}^4 \cos^2 \alpha_i$$





# Наиболее часто встречающиеся соединения изделий из ПКМ





Сравнительная характеристика волокон

Свойства	Волокно			
	Стеклоанное	Борное	Углеродное	Арамидное
Механические:				
удельная прочность	Высокая	Высокая	Средняя	Очень высокая
удельный модуль	Низкий	Высокий	Очень высокий	Средний
сопротивление удару	Отличное	Удовлетворительное	Плохое	Отличное
удлинение при разрыве	Высокое	Низкое	Среднее	Среднее
стабильность	Отличная	Отличная	Средняя	Отличная
Теплофизические:				
теплопроводность	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая
температурный КЛТР	Средний	Средний	Очень низкий	Очень низкий
демпфирующая способность	Высокая	Удовлетворительная	Хорошая	Отличная
Производственно-технологические:				
наименьший радиус изгиба	Малый	Очень большой	Малый	Малый
чувствительность к повреждениям при переработке	Средняя	Средняя	Высокая	Низкая
возможность переработки в ленты и ткани	Хорошая	Плохая	Хорошая	Хорошая
Стоимость	Очень низкая	Высокая	Умеренная	Умеренная



# Физико-механические характеристики компонентов ПКМ



Таблица 1 – Характеристики армирующих компонентов

Волокно (проволока)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\frac{\sigma_B}{\rho}$ МПа/ г/см <sup>3</sup>	E, МПа	$E/\rho$ МПа/г/см <sup>3</sup>
Алюминий	2,69	620	230	$7,3 \times 10^4$	$2,7 \times 10^4$
Бериллий	1,86	1310	420	$3,03 \times 10^5$	$1,63 \times 10^5$
Бор	2,52	3450	1368	$4,41 \times 10^5$	$1,75 \times 10^5$
Углерод	1,41	2760	1957	$2,0 \times 10^5$	$1,42 \times 10^5$
Стекло					
E	2,54	3450	1360	$7,2 \times 10^4$	$2,83 \times 10^4$
S	2,49	4820	1940	$8,5 \times 10^4$	$3,41 \times 10^4$
CDV	1,42	2800	1970	$1,26 \times 10^5$	$0,89 \times 10^5$
Сталь	7,81	4130	530	$2,0 \times 10^5$	$0,25 \times 10^5$
Полиамид	1,14	827	730	$0,28 \times 10^4$	$0,246 \times 10^4$



# Физико-механические характеристики компонентов ПКМ (2)



Таблица 2 – Основные характеристики полимерных матриц

Параметр	Полимерные матрицы				
	Полиэфирные	Фенол-формальдегидные	Эпоксидные	Кремний-органические	<u>Полиимидные</u>
Предел прочности, МПа: при растяжении при сжатии	30-70 80-150	40-70 100-125	35-100 90-160	25-50 60-100	90-95 250-280
Модуль упругости, ГПа	2,8-3,8	7-11	2,4-4,2	6,8-10	3,2-5
Плотность, 10 <sup>-3</sup> кг/м <sup>3</sup>	1,2-1,35	3,2-1,3	1,2-1,3	1,35-1,40	1,41-1,43
Теплостойкость, °С	50-80	140-180	130-150	250-280	250-320
Относительное удлинение, %	1,0-5,0	0,4-0,5	2-9	0,3-0,5	1-2,5
Объемная усадка, %	5-10	15-10	3-5	15-20	3-20



# Сравнение характеристик композитов с другими конструкционными материалами



Таблица 3 – Сравнение характеристик композитов с другими конструкционными материалами

Материал	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении $\sigma_p$ , ГПа	Модуль упругости при растяжении $E_p$ , ГПа	Удельная прочность $\sigma_p / \rho$	Удельный модуль упругости, $E_p / \rho \times 10^3$
				кМ	кМ
<i>Полимерные композиционные материалы</i>					
Стеклопластики: однонаправленные (1:0)	2,1	1,6-2,1	56-70	76-100	2,6-3,2
перекрестные (2:1)	2,0	1,0-1,2	36-42	50-60	1,8-2,0
Органопластики: однонаправленные (1:0)	1,35	1,9-2,5	80-95	140-185	5,9-7,0
перекрестные (2:1)	1,35	1,2-1,6	53-63	88-118	3,9-4,6
Углепластики: однонаправленные (1:0)	1,5	1,0-1,5	120-180	66-100	8,0-12,0
перекрестные (2:1)	1,5	0,6-1,0	80-120	40-66	5,3-8,0
<u>Боропластики:</u> однонаправленные (1:0)	2,0	1,5	240	75	12
перекрестные (2:1)	2,0	0,9	160	45	8
<i>Металлические сплавы</i>					
Алюминия АМГ-6	2,64	0,34	72	12,9	2,70
Магния Ма-2-1	1,80	0,32	43	17,8	2,40
Титана Т-3-1	4,50	1,25	110	28,0	2,23
Бериллия АБМ-1	2,35	0,42	140	18,0	5,97
Стали ЭГ1-679	7,89	1,90	200	24,2	2,54



# Выводы



В этой лекции были рассмотрены следующие вопросы:

- 1) приведены основными понятиями и определениями дисциплины о композитах;
- 2) кратко рассмотрена история развития композитов и их место в автомобилестроении;
- 3) дана классификация композитов и рассмотрена их общая структура, в том числе отдельно на ПКМ;
- 4) рассмотрены виды армирования композитов;
- 5) приведен принцип присвоения наименования композитам;
- 6) кратко рассмотрены общие принципы подходов к проектированию изделий из композитов.



# Контактная информация



E-mail: [kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)  
Рабочий телефон : 18-09  
Мобильный телефон: +7(926)275-0886

Спасибо за внимание!