

# Часть I. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИТАХ.

1. Понятие о композитах
2. Роль композитов в техническом прогрессе человечества
3. Использование композитов в древности
  - Армированные кирпичи
  - Зиккурат в г. Ур
  - Битумная дорога
  - Армированные стены в г. Урук
  - Древняя бумага
  - Мумифицирование
  - Монгольский лук
  - Дамасская сталь
  - Катана
  - Древнегреческий линоторакс
4. Классификация композитов
  - Волокнистые композиты
  - Композиты, упрочненные частицами
  - Нанокompозиты
  - Слоистые композиты
  - Сэндвич композиты (трехслойные конструкции)
5. Особенности композитов по сравнению с традиционными материалами
  - **Анизотропия**
  - **Удельная прочность и удельный модуль**
  - **Сопротивление усталости**
  - **Особенности проектирования**
  - **Механизм деформирования и разрушения**
  - **Внутреннее демпфирование**
  - **Влияние окружающей среды**
  - **Особенности изготовления**
6. Области применения композитов
  - Авиация и ракетостроение
  - Транспортная индустрия
  - Судостроение и морская промышленность
  - Строительство
  - Ветроэнергетика
  - Спорт
  - Оборонная промышленность
  - Медицина
  - Потребительские товары
7. Предварительный выбор материала

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 5. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 1. Анизотропия.

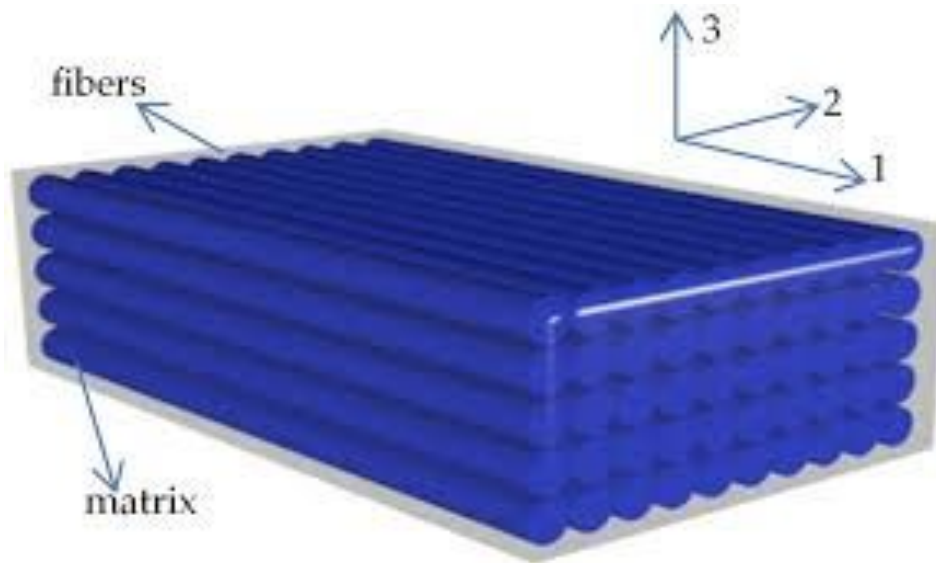
Металлические материалы и сплавы, традиционные для машиностроения, обычно демонстрируют одинаковые свойства в различных направлениях, то есть они изотропны.

Свойства волокнистых композитов заметно зависят от направления измерения, то есть эти материалы ярко выраженной анизотропией свойств.

У однонаправленного волокнистого композита все волокна расположены в одном направлении – **продольное направление.**

Направление, перпендикулярное продольному называют поперечным или **трансверсальным.**

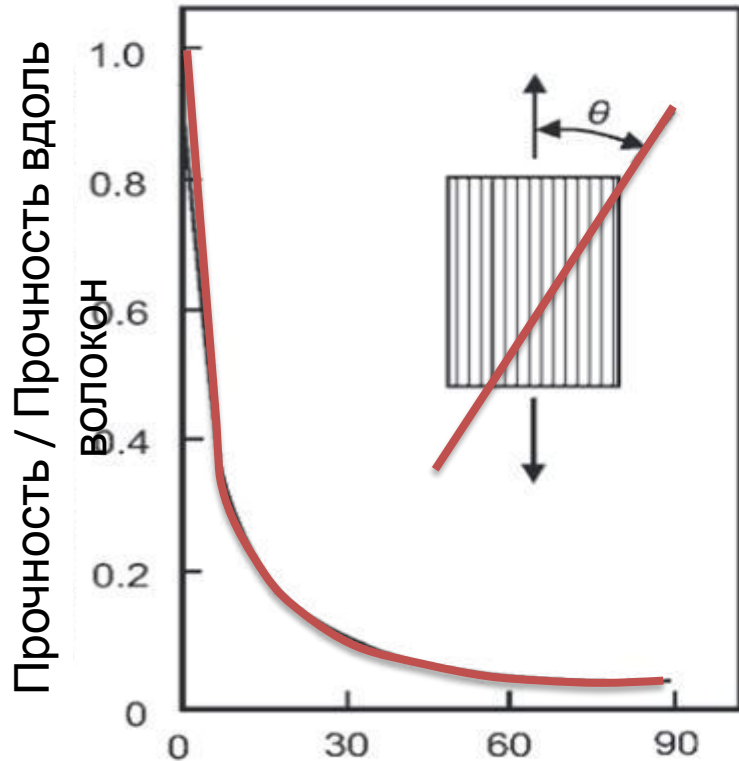
*Однонаправленный композит*



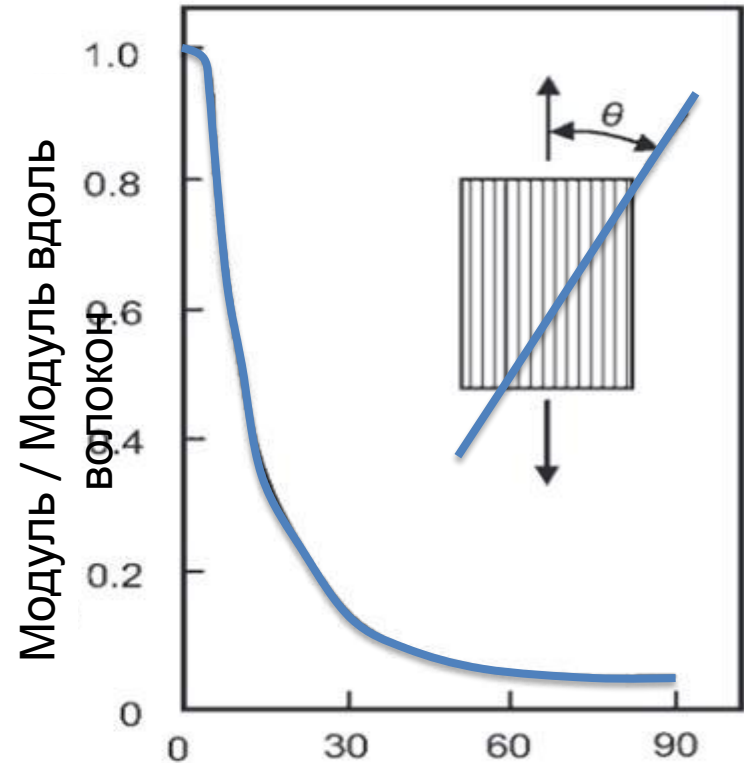
# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

### 1. Анизотропия.



Направление измерения, задаваемое углом  $\theta$

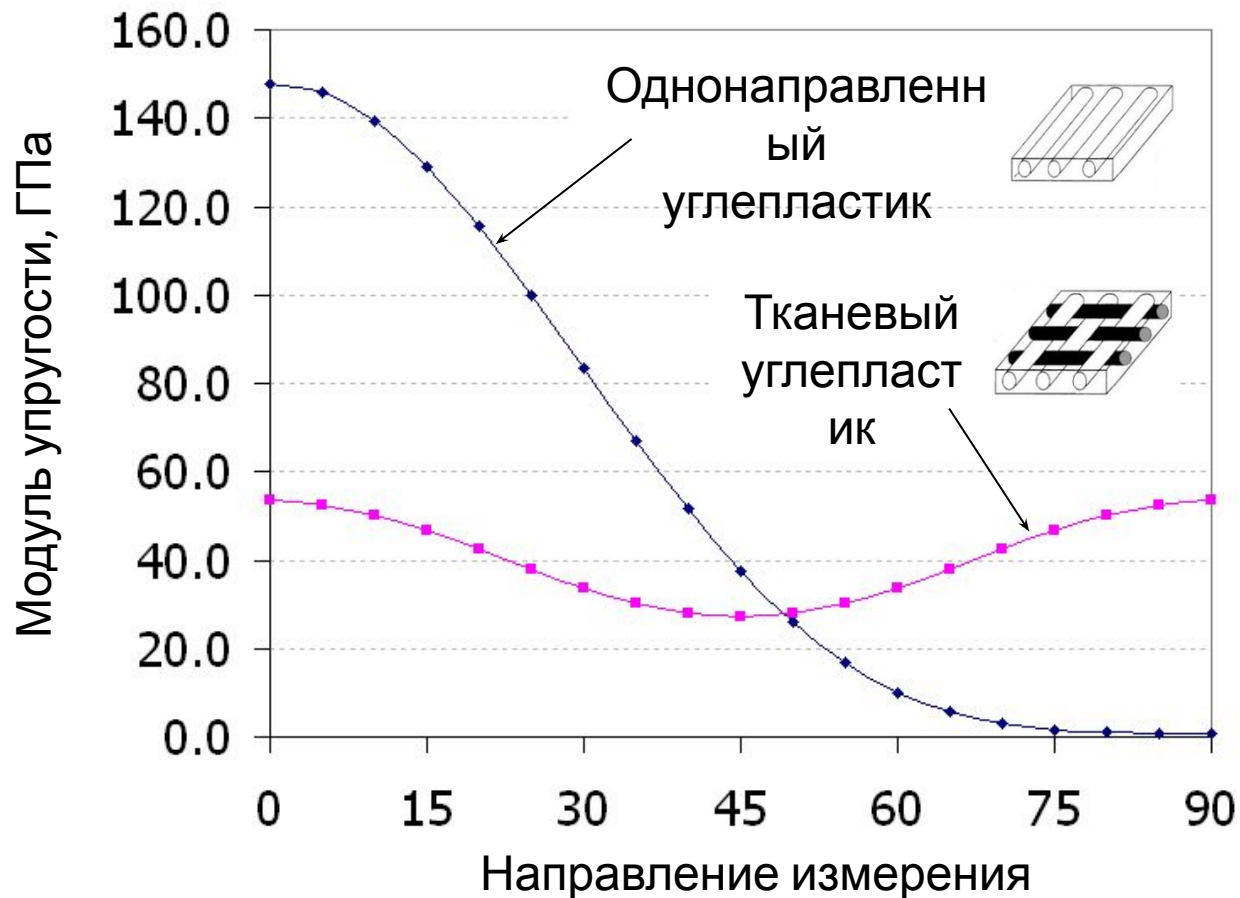


Направление измерения, задаваемое углом  $\theta$

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 1. Анизотропия.



## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 2. Удельная прочность и удельный модуль.

*Удельная прочность* – это характеристика прочности материала (то есть его способности выдерживать внешние нагрузки, не разрушаясь)

$$\text{Удельная прочность} = \frac{\text{Прочность}}{\text{Плотность}}$$

*Удельный модуль* – это характеристика жесткости материала (то есть его способности выдерживать внешние нагрузки, не меняя существенно размеры)

$$\text{Удельный модуль} = \frac{\text{Модуль}}{\text{Плотность}}$$

**Основное преимущество композитов** по сравнению со сталями и сплавами - высокие значения удельной прочности и удельного модуля

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 2. Удельная прочность и удельный модуль.

| Материал  | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Модуль<br>упругости*,<br>ГПа | Прочность при<br>растяжении*,<br>МПа |
|---|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Традиционные материалы</b>                     |                                 |                              |                                      |
| SAE 1010 сталь                                    | 7.87                            | 207                          | 365                                  |
| AISI 4340 сталь                                   | 7.87                            | 207                          | 1722                                 |
| 6061-T6 алюминиевый сплав                         | 2.70                            | 68.9                         | 310                                  |
| 7178-T6 алюминиевый сплав                         | 2.70                            | 68.9                         | 606                                  |
| Ti-6Al-4V титановый сплав                         | 4.43                            | 110                          | 1171                                 |
| 17-7 PH нержавеющая сталь                         | 7.87                            | 196                          | 1619                                 |
| INCO 718 никелевый сплав                          | 8.20                            | 207                          | 1399                                 |
| <b>Композиты</b>                                  |                                 |                              |                                      |
| Высокопрочный углепластик<br>(однонаправленный)   | 1.55                            | 137.8                        | 1550                                 |
| Высокомодульный углепластик<br>(однонаправленный) | 1.63                            | 215                          | 1240                                 |
| E-glass стеклопластик (однонаправленный)          | 1.85                            | 39.3                         | 965                                  |
| Kevlar 49 (однонаправленный)                      | 1.38                            | 75.8                         | 1378                                 |
| Волокна бора - 6061 Al сплав                      | 2.35                            | 220                          | 1109                                 |
| Квази-изотропный углепластик                      | 1.55                            | 45.5                         | 579                                  |
| ХАСП (изотропный материал)                        | 1.87                            | 15.8                         | 164                                  |

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 2. Удельная прочность и удельный модуль.

##### Высокомодульный углепластик на основе эпоксидной матрицы:

Модуль упругости  
вдоль волокон = 215  
ГПа  
Плотность = 1,63 г/см<sup>3</sup>  
удельный модуль **132** МН·м/кг

##### Углеродистая сталь SAE 1010:

Модуль упругости = 207  
ГПа  
Плотность = 7,87 г/см<sup>3</sup>  
удельный модуль **26** МН·м/кг

Удельный модуль высокомодульного углепластика практически **в 5 раз выше** удельного модуля углеродистой стали!

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 2. Удельная прочность и удельный модуль.

##### Кевлар 49:

Предел прочности  
вдоль волокон = 1378  
МПа  
Плотность = 1,38 г/см<sup>3</sup>  
УДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ = 999 кН·м/кг

##### Никелевый сплав

##### INCO 718:

Предел прочности = 1399  
МПа  
Плотность = 8,2 г/см<sup>3</sup>  
УДЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ = 171 кН·м/кг

Удельная прочность Кевлара 49 почти **в 6 раз выше** удельной прочности никелевого сплава INCO 718!

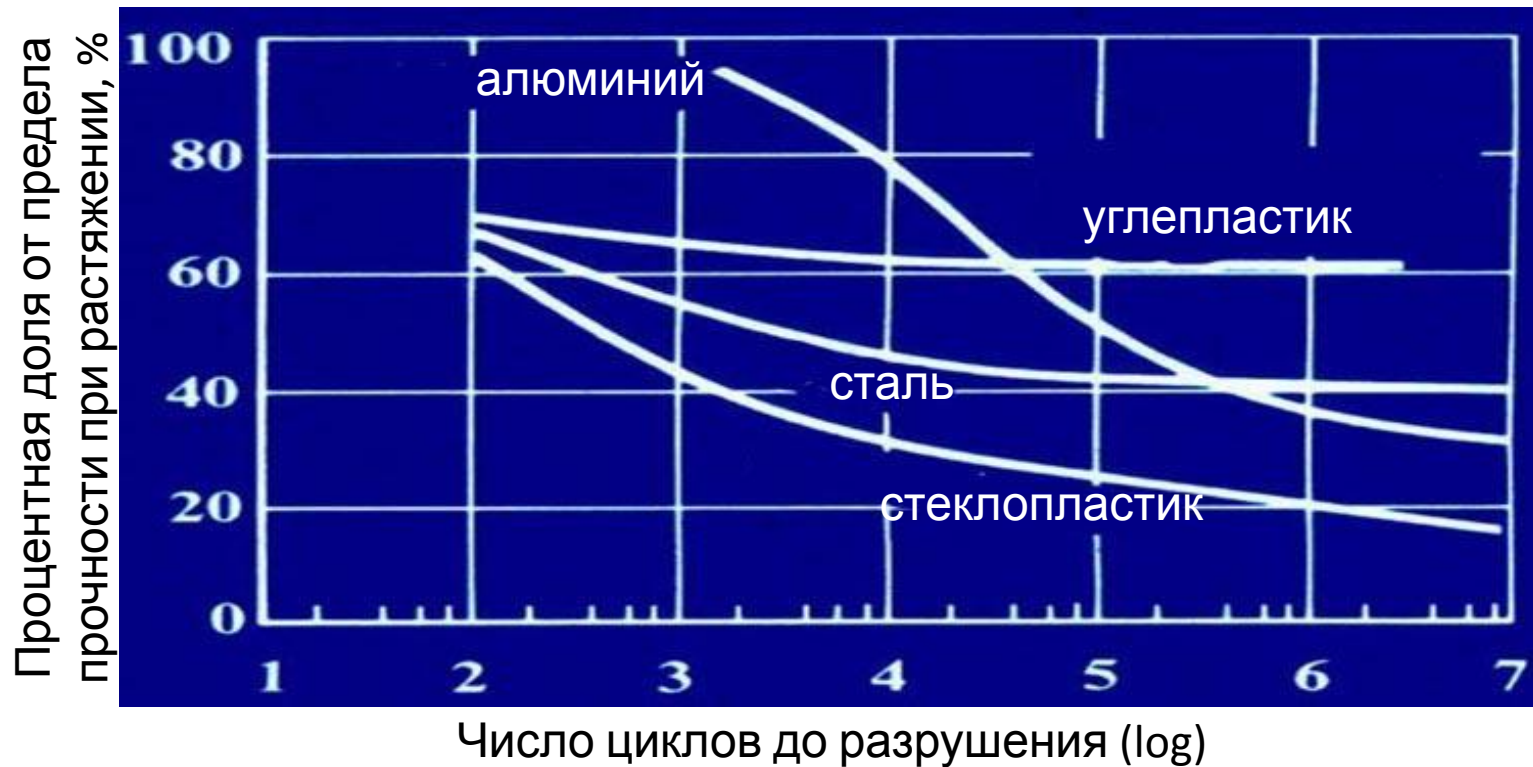


## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 3. Сопротивление усталости.

Кривые усталости некоторых материалов



Углепластик великолепно сопротивляется усталости!

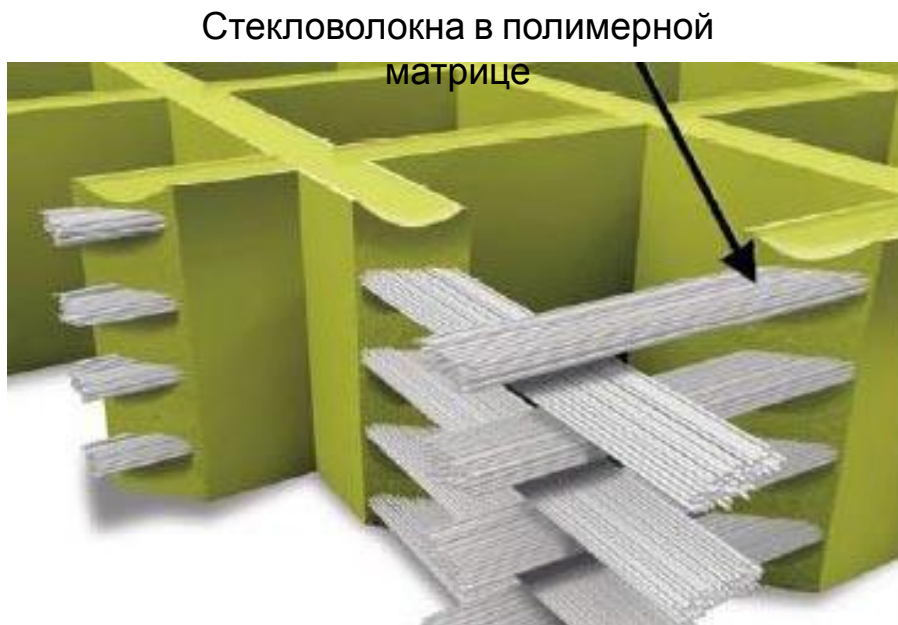
## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 4. Особенности проектирования

Использование композитов позволяет:

- **упрочнять** конструкцию в наиболее нагруженных местах и направлениях



Волокна повышают жесткость и прочность элементов конструкции в направлении армирования

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 4. Особенности проектирования

Использование композитов позволяет:

- **повышать жесткость конструкции** в заданных направлениях

*Сэндвич композит (обшивки – триплекс, наполнитель - пластиковые стаканчики)*



## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

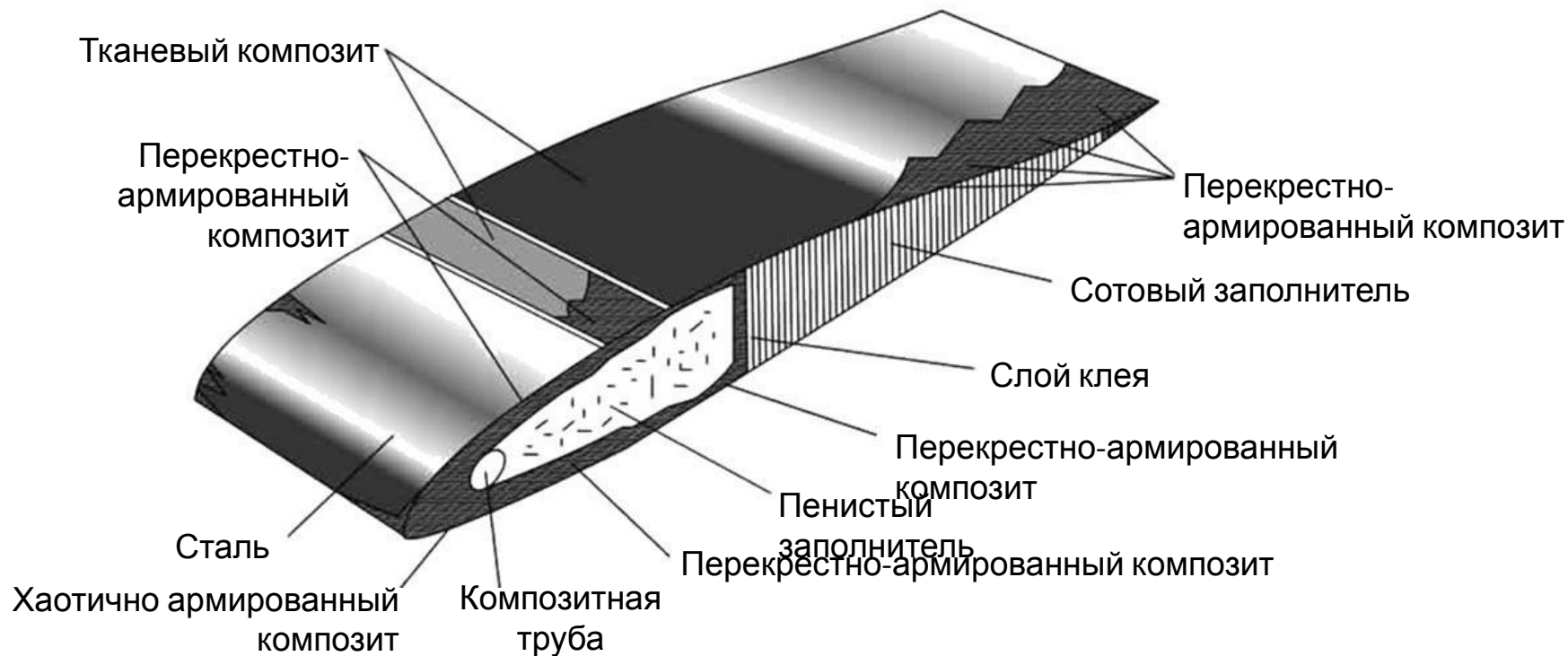
### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 4. Особенности проектирования

Использование композитов позволяет:

- **повышать жесткость конструкции** в заданных направлениях

*Крыло самолета в разрезе*



## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 4. Особенности проектирования

Использование композитов позволяет:

- изготавливать **сложные изогнутые поверхности** за одну операцию



Концепткар от Total Petrochemicals, представленный на Франкфуртском автосалоне в 2011

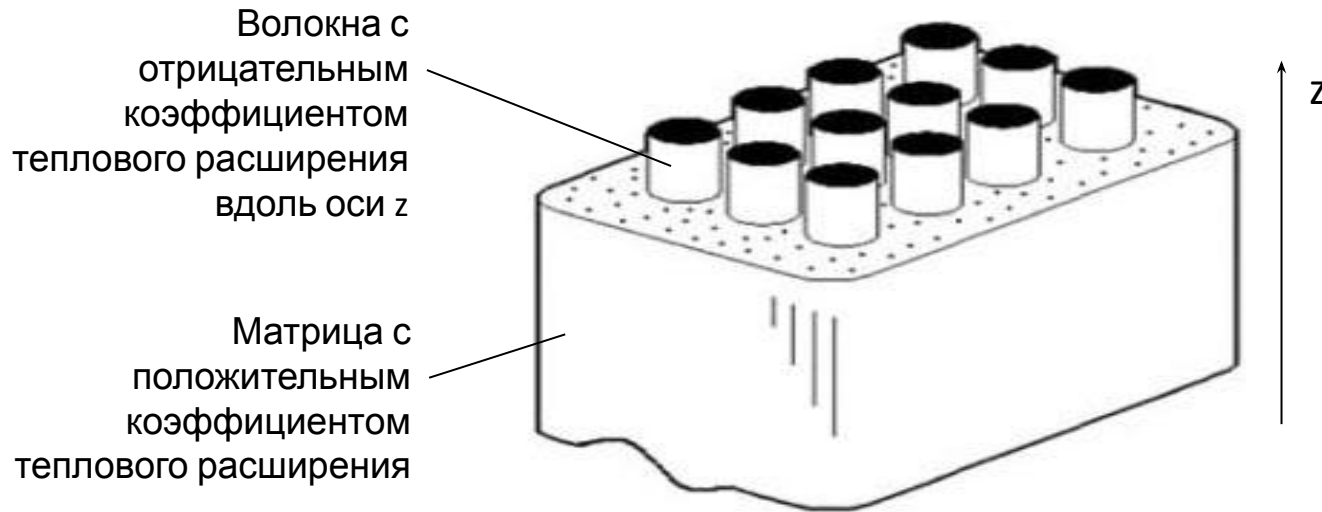
## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 4. Особенности проектирования

Использование композитов позволяет:

- проектировать конструкции с **нулевым коэффициентом теплового расширения**



При нагреве волокна попытаются уменьшить свою длину в направлении оси z, а матрица попытается расширяться в этом направлении



При правильно выбранной объемной доле волокон размер в направлении оси z композита не изменится

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 4. Особенности проектирования

Использование композитов позволяет:

- проектировать конструкции с **нулевым коэффициентом теплового расширения**

Стабильность размеров композитных конструкций, например, крайне важна в космической индустрии, где аппараты должны выдерживать экстремально высокие температуры при запуске и экстремально низкие в открытом космосе

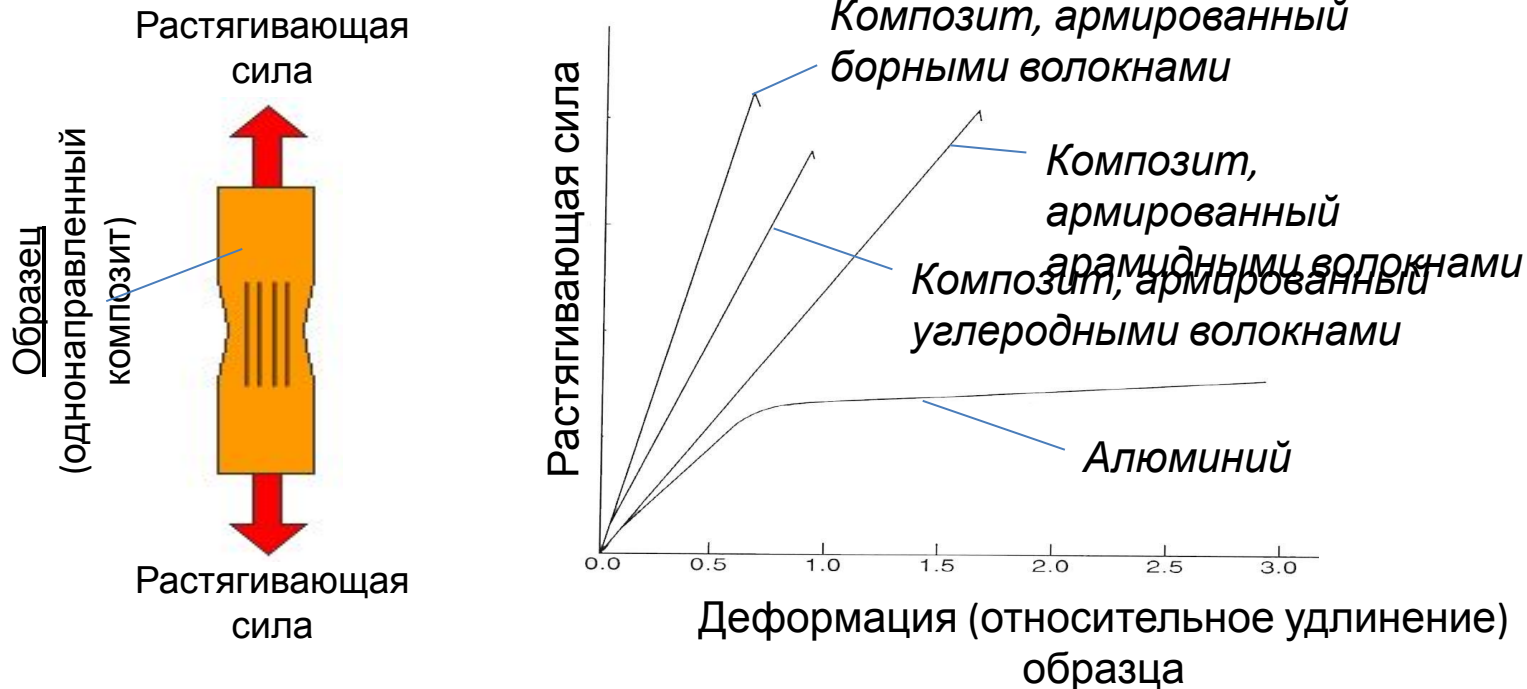


## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

### 5. Механизм деформирования и разрушения.

Диаграммы растяжения некоторых композитов и алюминия



При растяжении вдоль волокон композиты демонстрируют хрупкое поведение (деформации не превышают 2%) в отличие от сталей и сплавов, являющихся пластичными материалами (деформации сталей могут достигать 50%, то есть образец удлинится в 1,5 раза)



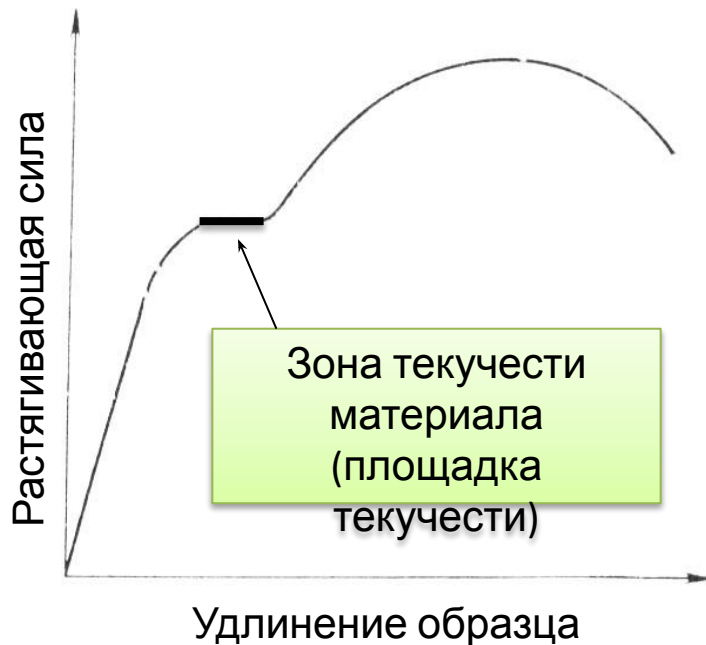
## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

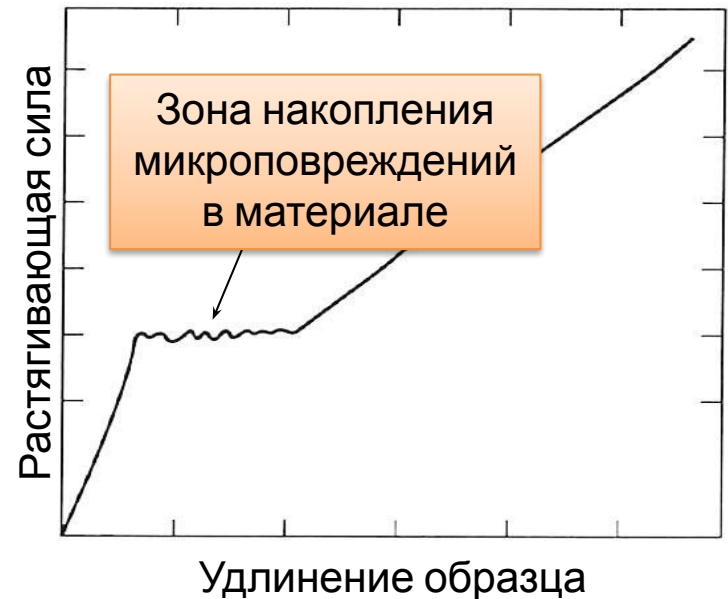
### 5. Механизм деформирования и разрушения.

Диаграммы растяжения малоуглеродистой стали и гибридного композита

Малоуглеродистая сталь



Полимерный композит, армированный стеклянными и углеродными волокнами



## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

### 6. *Внутреннее демпфирование.*



Композиты, обладающие повышенными характеристиками внутреннего демпфирования, используют для шумоподавления и шумоизоляции

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 7. Влияние окружающей среды.

Неметаллические композиты не подвержены коррозии



Влага  
Высокие температуры  
Агрессивные жидкости  
Ультрафиолетовое излучение  
Окисление матрицы



Деградация механических свойств некоторых композитов

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 8. Особенности изготовления.

Технологии изготовления композитов требуют значительно более низких давлений и усилий по сравнению с теми, что используются при изготовлении металлических конструкций



Гидравлический кузнечный пресс для изготовления металлических деталей



Машина для изготовления композитных деталей методом RTM

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

### 8. Особенности изготовления.

Технологии изготовления композитов требуют значительно более низких давлений и усилий по сравнению с теми, что используются при изготовлении металлических конструкций



► Electrohydraulic system for production mold rotation.



Кроме машинного, возможно ручное изготовление композитных деталей (контактное формование и напыление)

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

### 8. Особенности изготовления.

Интеграция нескольких деталей в один элемент



Металлический корпус лодки состоит из нескольких деталей, соединенных друг с другом с помощью сварки



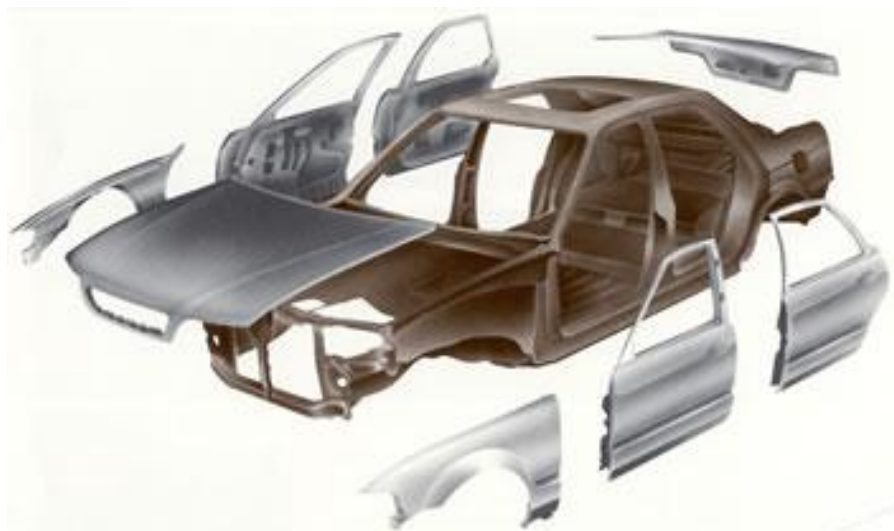
Композитный корпус лодки - единая деталь, изготовленная за одну операцию

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

#### 8. Особенности изготовления.

Интеграция нескольких деталей в один элемент



Металлический корпус автомобиля - несколько деталей, требующие соединения друг с другом



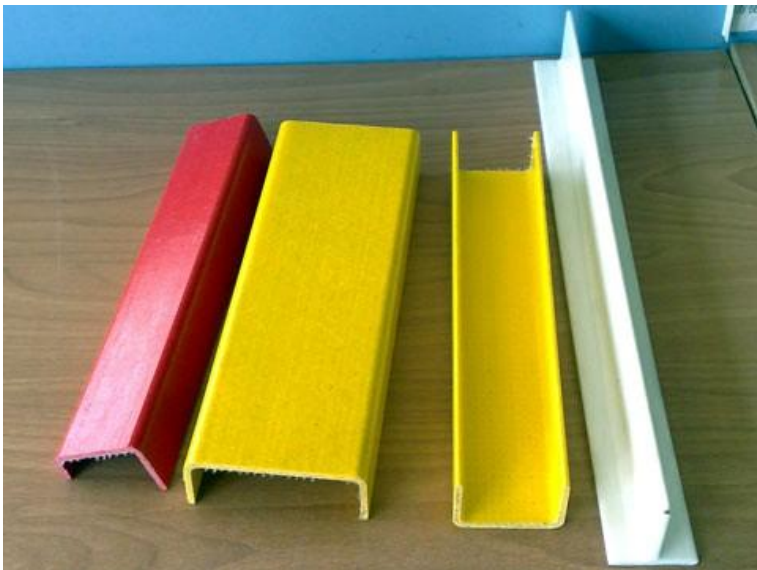
Композитный корпус автомобиля - единая деталь, изготовленная за одну операцию

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

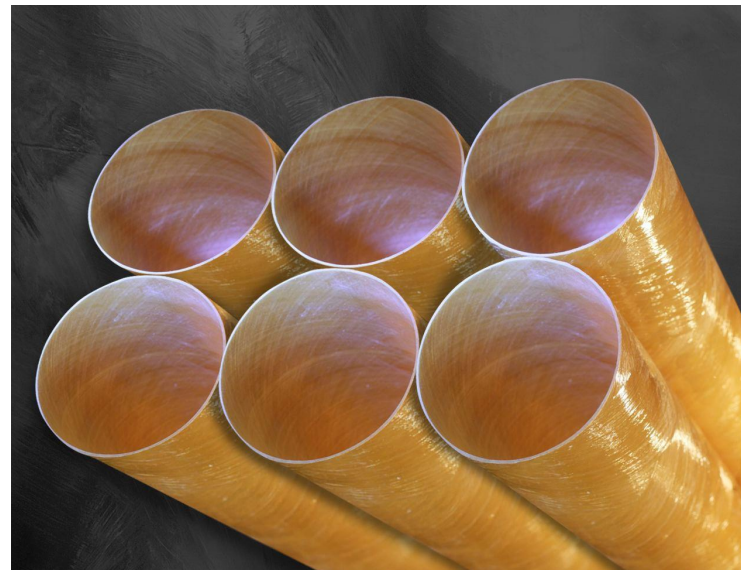
### 4. Основные особенности композитов по сравнению с традиционными материалами.

### 8. Особенности изготовления.

Использование Near Net Shape технологий



Композитные профили, полученные методом пултрusion



Композитные трубы, полученные намоткой на оправку

Near Net Shape технологии заметно сокращают или исключают из технологического процесса некоторые финишные операции (шлифовку, например)

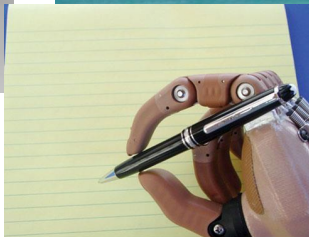
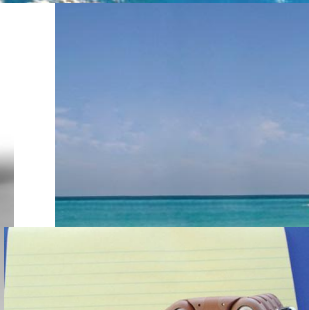


# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

Благодаря своим многочисленным преимуществам композиты применяются практически во всех отраслях современной промышленности, например:

- Авиация и ракетостроение;
- Транспортная индустрия;
- Судостроение и морская промышленность;
- Строительство;
- Ветроэнергетика;
- Спорт;
- Оборонная промышленность;
- Медицина;



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

### 1. Авиация и ракетостроение

Первые современные композиты появились в середине XX века в сфере авиации и ракетостроения благодаря таким своим преимуществам как:

- + *Высокие значения удельного модуля и удельной прочности* (то есть снижение веса конструкций при той же прочности и жесткости)
- + *Стабильность размеров в широком диапазоне температур* (коэффициент теплового расширения многих композитов близок к нулю)

Типичные материалы – дорогие высокопрочные и высокомодульные однонаправленные композиты на основе полимерной матрицы



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

### 2. Транспортная индустрия

Преимущества использования композитов вместо традиционных материалов в транспортной индустрии :

- + *Снижение веса*
- + *Снижение стоимости изготовления конструкций* (40%-60% экономии)
- + *Интеграция нескольких деталей в один элемент* (например, композитная опора радиатора обычно состоит из 2х склеенных друг с другом частей вместо 20 и более металлических деталей, соединенных друг с другом с помощью заклепок)

Типичные материалы – недорогие хаотично армированные композиты типа ХАСП



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

### 3. Судостроение и морская индустрия

Главное преимущество использования композитов в судостроении - это снижение веса конструкций, что выражается в следующем:

- + Повышению скоростей и ускорений
- + Улучшению маневренности
- + Снижению потребления топлива

Для изготовления корпусов лодок (особенно спортивных, где снижение веса особенно необходимо для получения конкурентных преимуществ) обычно используют

*сэндвич композиты со стеклопластиковыми панелями и сотовым либо пенистым наполнителем.*



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

4.

### Строительство

Потребность в композитах в современном гражданском строительстве постоянно растет. Кроме того, современные композиты все чаще используются для реализации самых дорогих и амбициозных проектов.

Популярные типы материалов – *ДВП*, *ДСП* и *стеклопластик* (волоконный композит - полимер, армированный стекловолокном)

Преимущества использования композитов в строительстве:

- + Невысокая стоимость;
- + Высокая прочность и жесткость;
- + Малый вес;
- + Стойкость к коррозии.

Это выражается в:

- + увеличении срока службы конструкций;
- + снижении затрат на обслуживание и ремонт.



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

### 4. Строительство



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

6.

### Ветроэнергетика

В ветроэнергетике композиты используют, в основном, для изготовления роторных частей ветрогенераторов - лопастей и гондол.



Наиболее востребованные материалы – *композиты на основе полимерной матрицы, армированные стекло- и углеволокном*

# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

6.

### Спорт

В спортивной индустрии наибольшей популярностью пользуются *волоконистые композиты*, а также *сэндвич композиты*.





# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

7. Оборонная промышленность  
В оборонной промышленности часто используют *волоконистые композиты (в особенности слоистые композиты)*, а также *сэндвич композиты*.



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

8.

**Медицина**  
В медицине популярностью пользуются *композиты, армированные частицами, нанокompозиты и различные волокнистые композиты.*



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 5. Области применения композитов.

### 9. Потребительские товары

Для производства потребительских товаров как правило используют *недорогие композиты, армированные частицами, а также различные волокнистые композиты.*



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

Предварительный выбор материала опирается на следующую информацию:

1. *Вид нагружения детали* (например, растяжение, сжатие, кручение или сложное сопротивление).
2. *Метод приложения нагрузки* (например, статический, усталость, удар и т.д.).
3. *Срок эксплуатации.*
4. *Условия эксплуатации* (температура, влажность, наличие агрессивных сред и т.д.).
5. *Граничные условия*, включающие соседние детали, контактирующие с данной.
6. *Метод изготовления детали.*
7. *Стоимость* (включающая не только стоимость изготовления детали, но и затраты на транспортировку и монтаж)

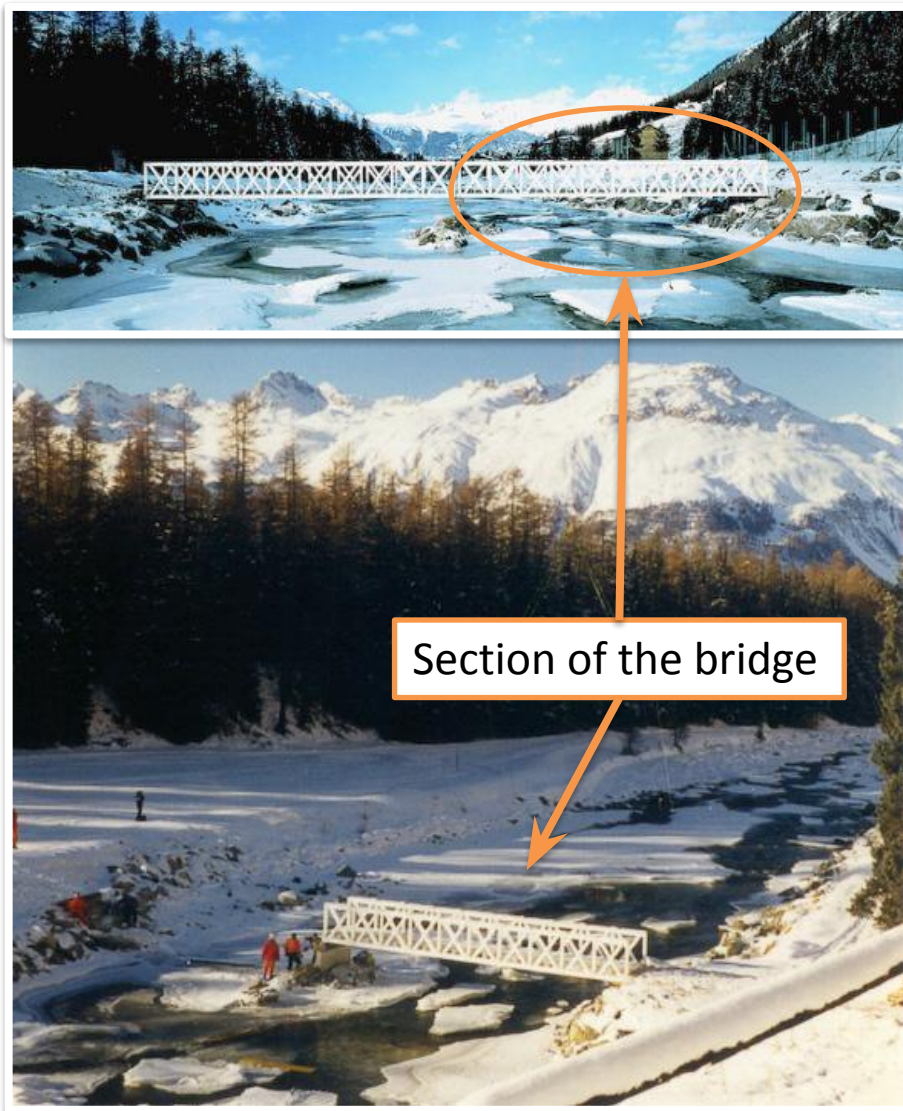


# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

Пример – мост в Альпах, состоящий из двух одинаковых секций:

- Вид нагружения – изгиб
- Метод приложения нагрузки – статическое нагружение
- Срок эксплуатации – более 50 лет
- Условия эксплуатации – температура и влажность
- Граничные условия для одной из секций моста – соседняя секция и каменное основание
- Метод изготовления - пултрузия
- Стоимость - стоимость изготовления секций, а также затраты на транспортировку и сборку



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

В предварительном выборе материала как правило используют две его основные характеристики :

- **Модуль упругости** (или модуль сдвига);
- **Предел прочности.**



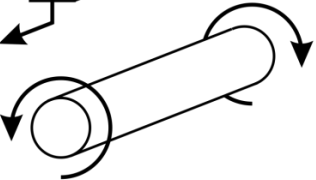
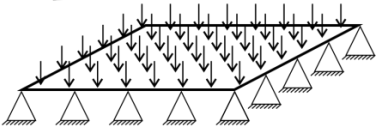
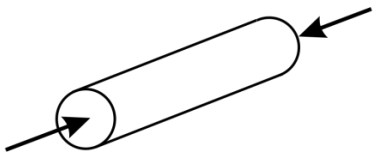
То, какая из этих характеристик должна иметь приоритет, зависит от типа конструкции и возможной формы ее разрушения



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

При разработке конструкций с минимальной массой или стоимостью, механические свойства материала обычно комбинируют с плотностью и, иногда, стоимостью. Такие комплексные оценки свойств материала называют индексом материала.

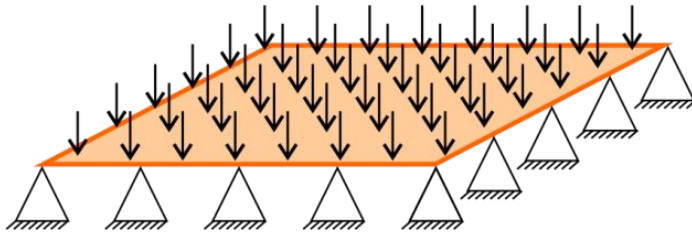
| Конструкция   | Индекс материала для конструкции с минимальной массой |                                       |
|---|---|---------------------------------------|
|   | расчет на жесткость                                   | расчет на прочность                   |
|    | $\frac{E}{\rho}$                                      | $\frac{\sigma_{UTS}}{\rho}$           |
|    | $\frac{\sqrt[3]{E}}{\rho}$                            | $\frac{\sqrt{\sigma_{UTS}}}{\rho}$    |
|   | $\frac{\sqrt{G}}{\rho}$                               | $\frac{\sqrt[3]{\tau_{UTS}^2}}{\rho}$ |
|  | $\frac{\sqrt[3]{E}}{\rho}$                            | $\frac{\sqrt{\sigma_{UTS}}}{\rho}$    |
|  | $\frac{\sqrt{E}}{\rho}$                               | $\frac{\sigma_{UTS}}{\rho}$           |

# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

Пример:

Из расчета на жесткость выбрать наилучший материал для панели самолета с минимальной массой, работающей на изгиб:



- a) квази-изотропный углепластик
- b) алюминиевый сплав 6061-T6
- c) титановый сплав Ti-6Al-4V



# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

| Материал  | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Модуль<br>упругости*,<br>ГПа | Прочность при<br>растяжении*,<br>МПа |
|---|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Традиционные материалы</b>                     |                                 |                              |                                      |
| SAE 1010 сталь                                    | 7.87                            | 207                          | 365                                  |
| AISI 4340 сталь                                   | 7.87                            | 207                          | 1722                                 |
| <b>6061-T6 алюминиевый сплав</b>                  | <b>2.70</b>                     | <b>68.9</b>                  | <b>310</b>                           |
| 7178-T6 алюминиевый сплав                         | 2.70                            | 68.9                         | 606                                  |
| <b>Ti-6Al-4V титановый сплав</b>                  | <b>4.43</b>                     | <b>110</b>                   | <b>1171</b>                          |
| 17-7 PH нержавеющая сталь                         | 7.87                            | 196                          | 1619                                 |
| INCO 718 никелевый сплав                          | 8.20                            | 207                          | 1399                                 |
| <b>Композиты</b>                                  |                                 |                              |                                      |
| Высокопрочный углепластик<br>(однонаправленный)   | 1.55                            | 137.8                        | 1550                                 |
| Высокомодульный углепластик<br>(однонаправленный) | 1.63                            | 215                          | 1240                                 |
| E-glass стеклопластик<br>(однонаправленный)       | 1.85                            | 39.3                         | 965                                  |
| Kevlar 49 (однонаправленный)                      | 1.38                            | 75.8                         | 1378                                 |
| Волокна бора - 6061 A1 сплав                      | 2.35                            | 220                          | 1109                                 |
| <b>Квази-изотропный углепластик</b>               | <b>1.55</b>                     | <b>45.5</b>                  | <b>579</b>                           |
| ХАСП (изотропный материал)                        | 1.87                            | 15.8                         | 164                                  |

# ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ.

## 7. Предварительный выбор материала.

Пример:

Из расчета на жесткость выбрать наилучший материал для панели самолета с минимальной массой, работающей на изгиб:

Решение:

a) квази-изотропный  
углепластик

$$\frac{\sqrt[3]{E} \text{Па}}{\rho} = \frac{\sqrt[3]{45,5} \text{ Па}}{1,55 \text{ г/см}^3} = 2,30 \frac{\sqrt[3]{\text{Па}}}{\text{кг}}$$

b) алюминиевый сплав 6061-T6

$$\frac{\sqrt[3]{E} \text{Па}}{\rho} = \frac{\sqrt[3]{68,9} \text{ Па}}{2,7 \text{ г/см}^3} = 1,52 \frac{\sqrt[3]{\text{Па}}}{\text{кг}}$$

c) титановый сплав Ti-6Al-4V

$$\frac{\sqrt[3]{E} \text{Па}}{\rho} = \frac{\sqrt[3]{110} \text{ Па}}{4,43 \text{ г/см}^3} = 1,08 \frac{\sqrt[3]{\text{Па}}}{\text{кг}}$$

Ответ: наилучшим материалом является *квази-изотропный углепластик*, так как он имеет наибольший индекс материала для конструкции с минимальной массой

## ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ

