

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ автономное ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов»

Дисциплина «Механика композитных материалов»

Тема 1. Введение в мир композитов.
Волокна, матрицы, композиты.
Лекция. Композиты – определение,
свойства. Волокна и матрицы. Три
секрета прочности

Лектор:
д.т.н., профессор
Полилов А.Н.

План лекции

1.1. Общие сведения о композитах

1.2. Структура композитов. Свойства волокон и матриц

1.3. Три секрета прочности волокнистых композитов

1.3.1. Первый секрет - масштабный эффект прочности волокон

1.3.2. Второй секрет - остановка трещины поверхностью раздела

1.3.3. Третий секрет - статистический характер прочности волокон

1.3.4. О линейной механике разрушения

1.3.5. Об асимптотическом решении задачи про остановку трещины поверхностью раздела

1.3.6. О роли касательных напряжений и оптимальных (равнопрочных) свойствах волокнистых композитов

1.3.7. О распределении Вейбулла



Механика композитных конструкций

Лекция 2. Композиты - история создания.

Определение, особые свойства.

**Объекты и эффекты применения: прямые,
конструкционные, технологические.**

**Классификация дефектов в компонентах:
волокнах, матрице, на границах раздела.**

**Дефекты: технологические,
конструкционные, эксплуатационные.**

Д.т.н., проф. А.Н.Полилов

План беседы о прочности

1. История **прочных** (конструкционных) материалов

2. Секреты **прочности** и трещиностойкости

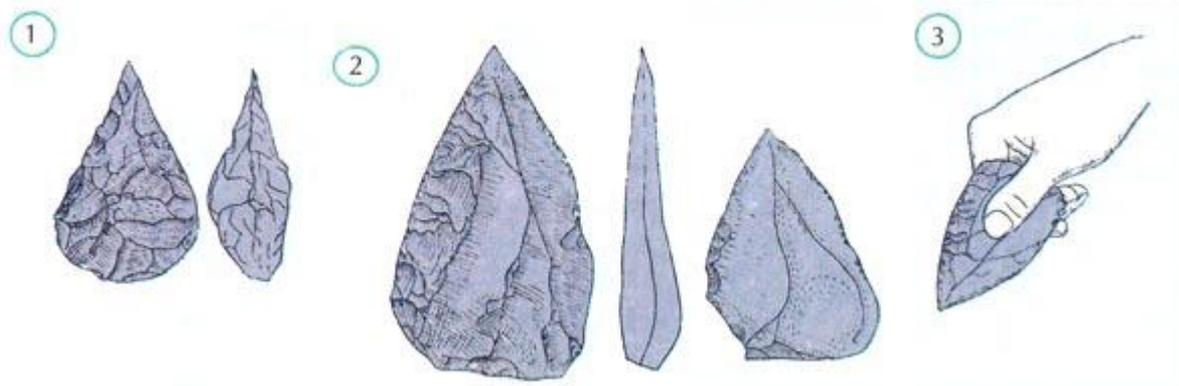
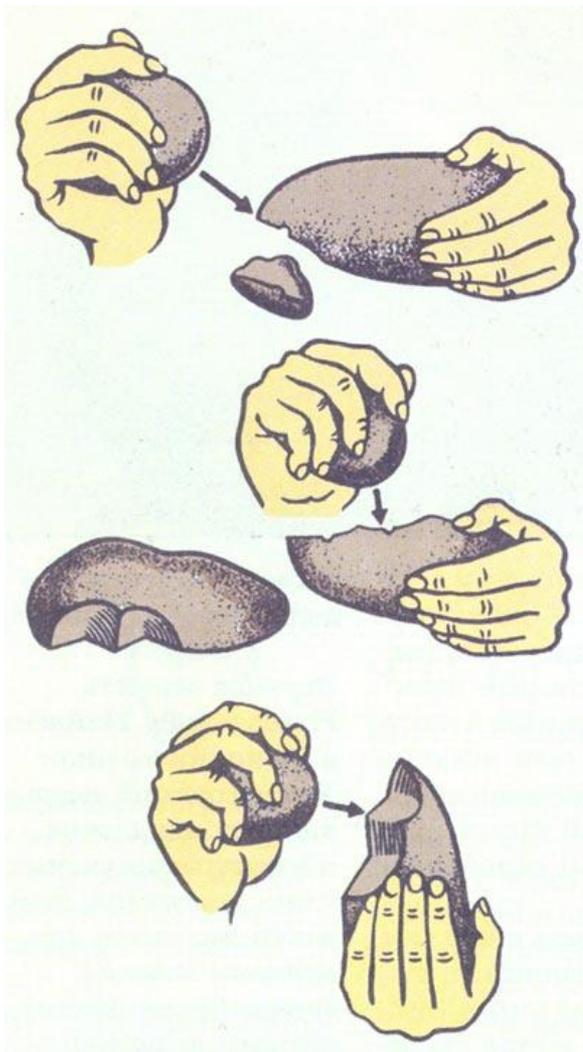
3. Биомеханика **прочности** волокнистых композитов



Новая теория прочности – линейная механика разрушения

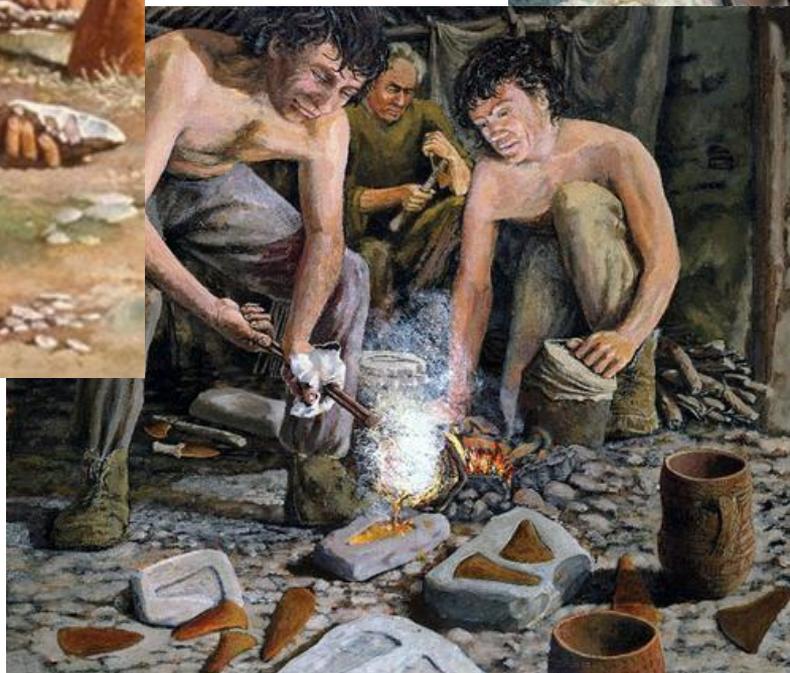
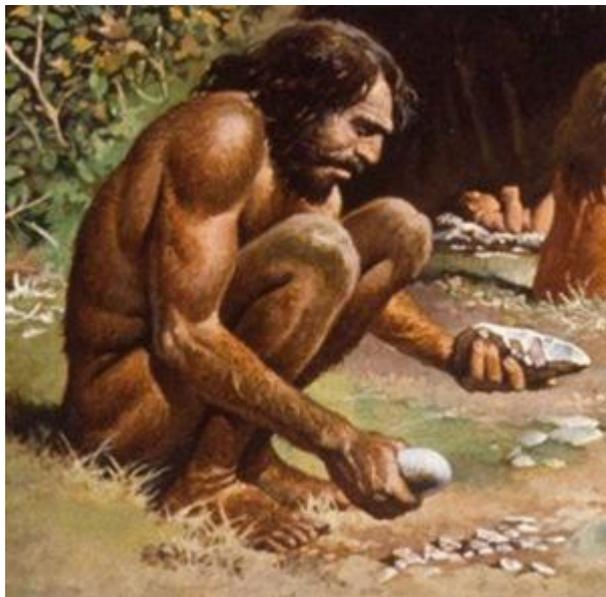
- **История возникновения механики разрушения – научной основы обеспечения техногенной безопасности.**
- **Понятие техногенной безопасности и риск-анализа.**
- **Краткий экскурс в историю: от теории прочности к механике разрушения.**

Материалы определяют уровень цивилизации

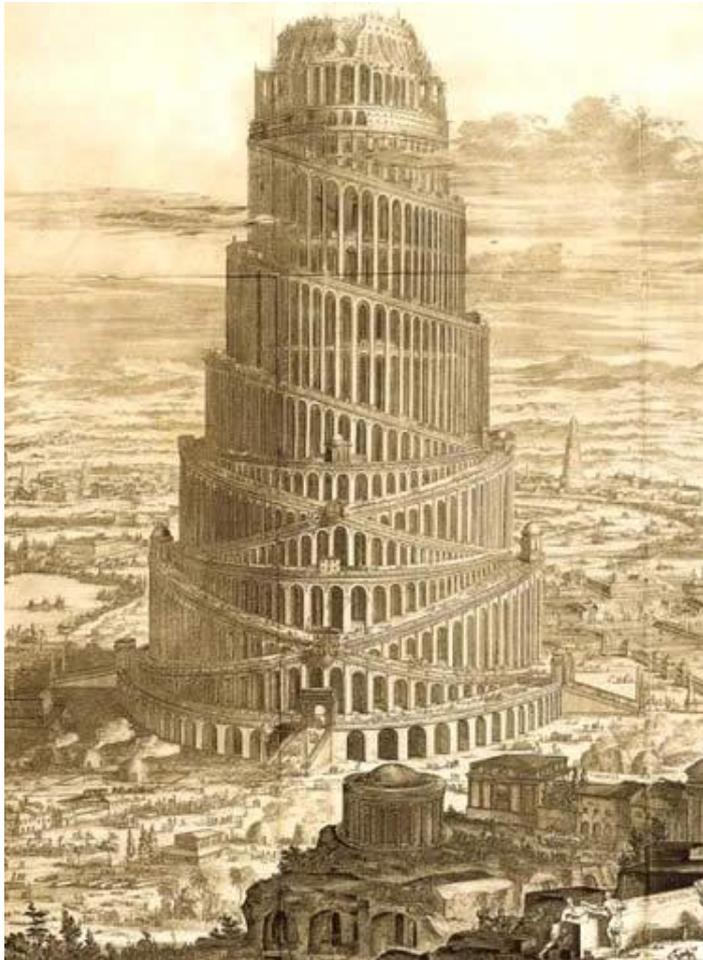


Охотничьи ножи эпохи раннего палеолита:
1 - ашельского типа;
2 - леваллуазско-мустьерского типа;
3 - способ держания в руке.

Каменный, бронзовый, железный век



Сооружения



Галикарнасский мавзолей



Храм Артемиды в Эфесе



Пирамиды Гизы



Колосс Родосский



Олимпийская статуя Зевса



Висячие сады Семирамиды



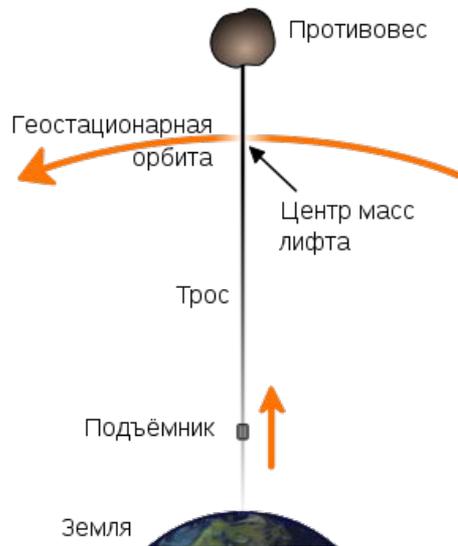
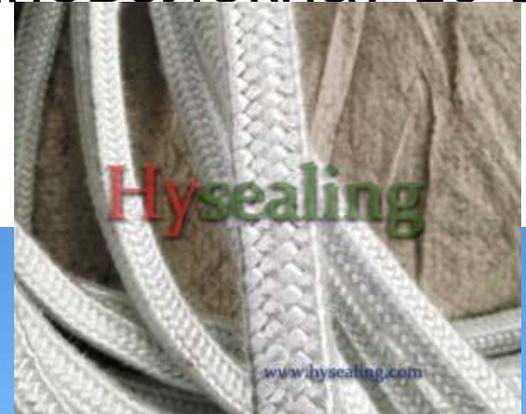
Александрийский маяк



В чем измеряется удельная прочность?

В километрах! Допустимая длина висящего стального каната в **10!** раз ниже чем из органоволокна! 10-100 км

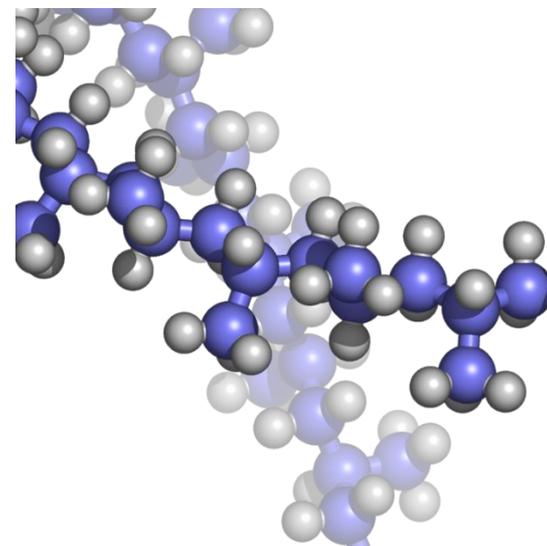
$$L \propto \frac{\sigma}{\rho}$$



Первые композиты



Эра полимеров и композитов



2. Компоненты в композитах разделены явно выраженными поверхностями раздела (interface), которые, как и каждый из компонентов, выполняют в нём свою функцию.

3. Армирующие элементы реализуют масштабный эффект прочности

4. Свойства композита нельзя представить в виде суммы свойств компонентов композит из хрупких компонентов (стекло+полимерная смола) может быть нехрупким и иметь очень высокую удельную энергию разрушения, многократно превышающую сумму этих энергий для компонентов.

То есть, композит – это система, в которой проявляются дополнительные свойства по сравнению со свойствами составляющих систему элементов.

5. Композиты – материалы с управляемыми свойствами. Используя тонкие носители прочности – волокна, можно создавать конструкцию со свойствами от «квазиизотропных» до сильно анизотропных, в десятки раз различающихся в разных направлениях.

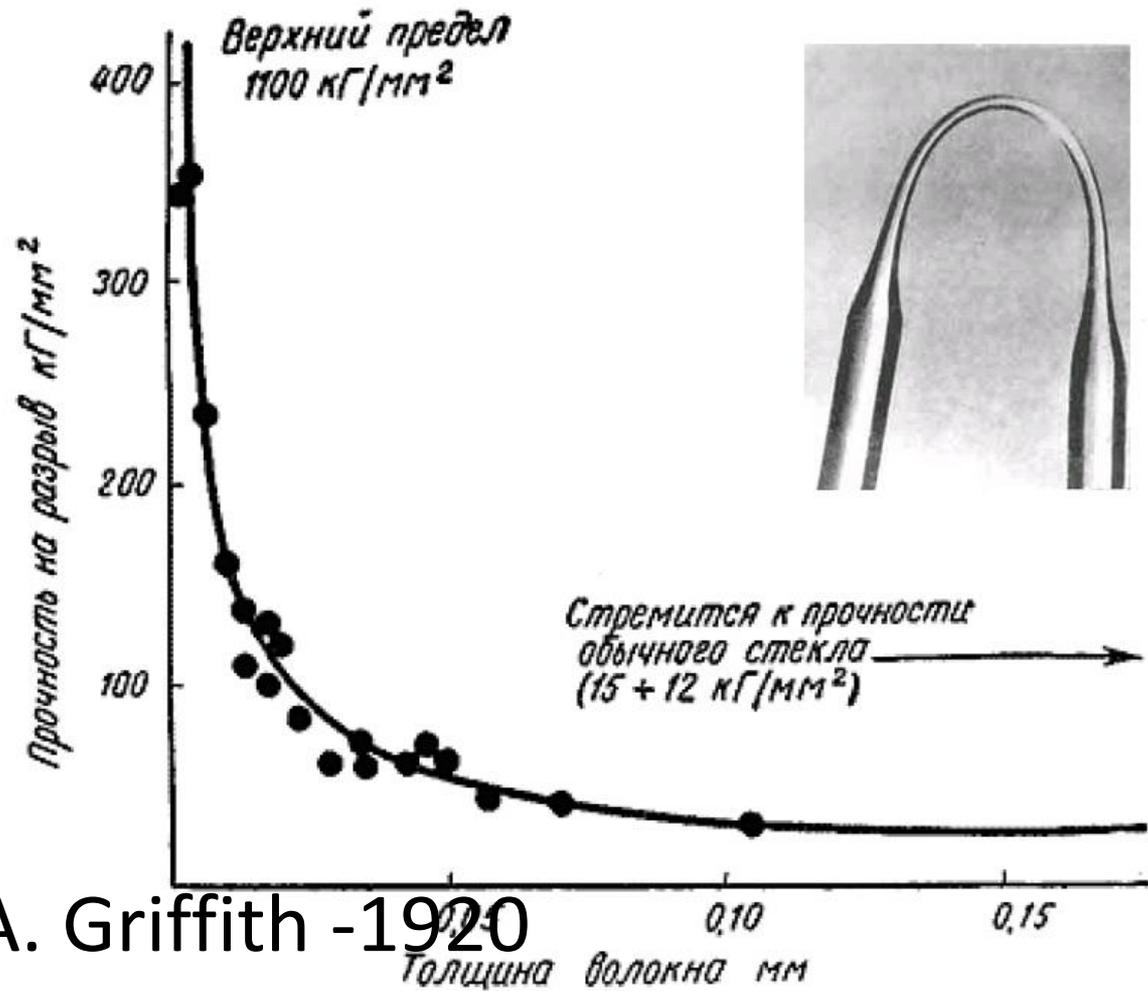
Направленность и неоднородность – основные особенности композитов, позволяющие оптимизировать материал-конструкцию на структурном уровне.

Алан Арнольд Гриффитс (1893-1963) – A.A.Griffith

- **Механика разрушения**
- Теоретическая прочность, концентрация напряжений
- **Механика композитов**
- Прочность тонких бездефектных волокон
- Стекло: пузырьки - давление, волокна – эластика Эйлера, испытания петель.

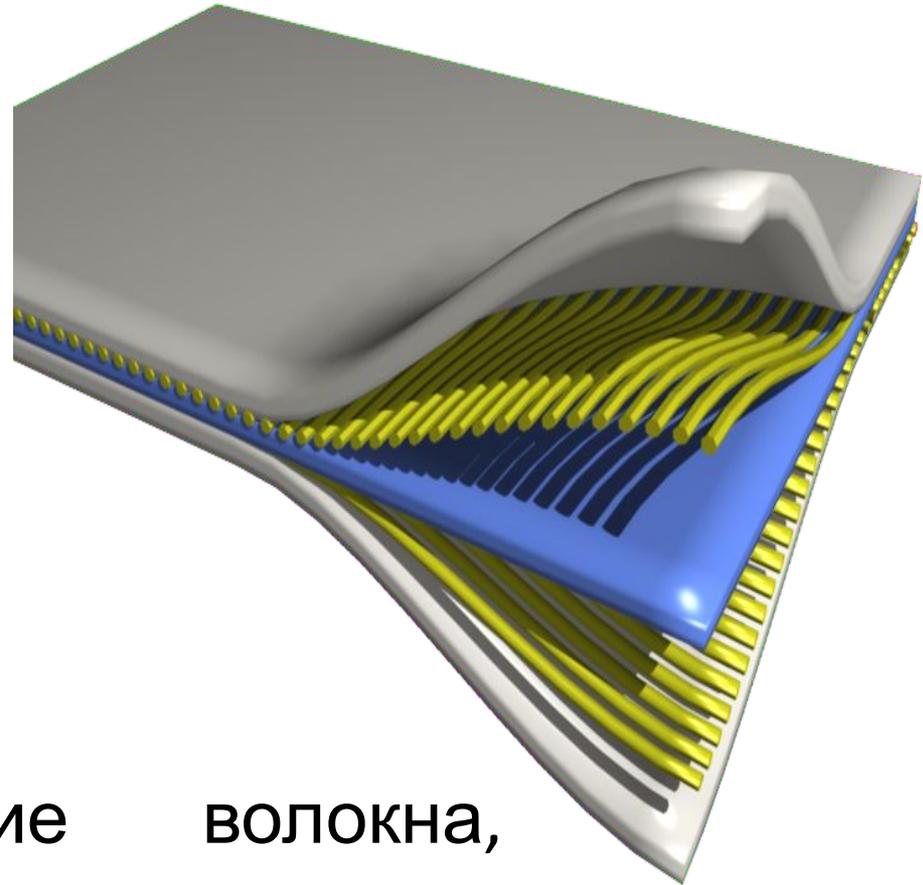
Масштабный эффект

ПРОЧНОСТИ



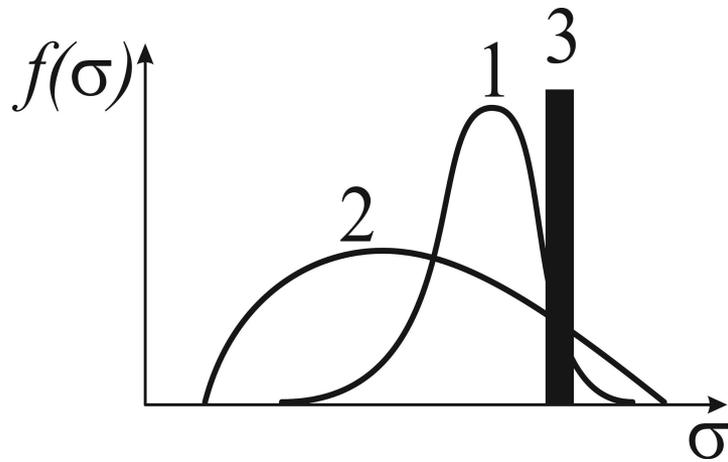
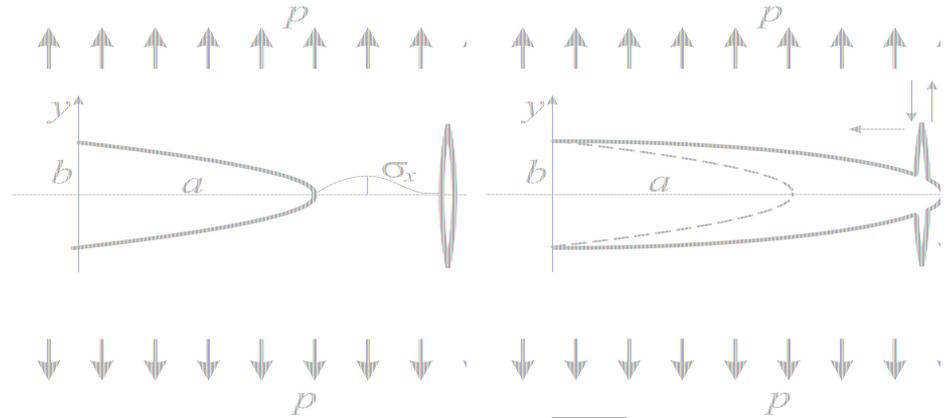
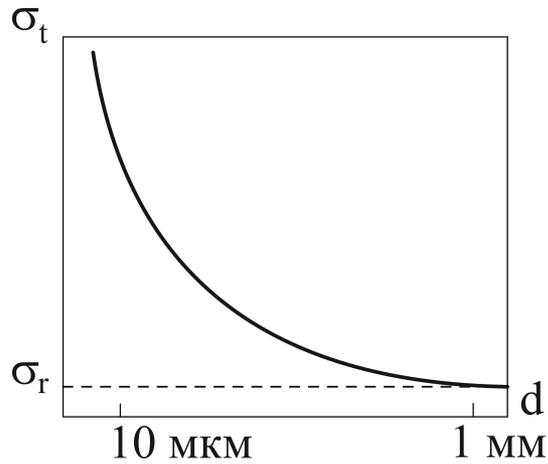
A. Griffith - 1920

Первый секрет прочности



Тонкие волокна,
усы.

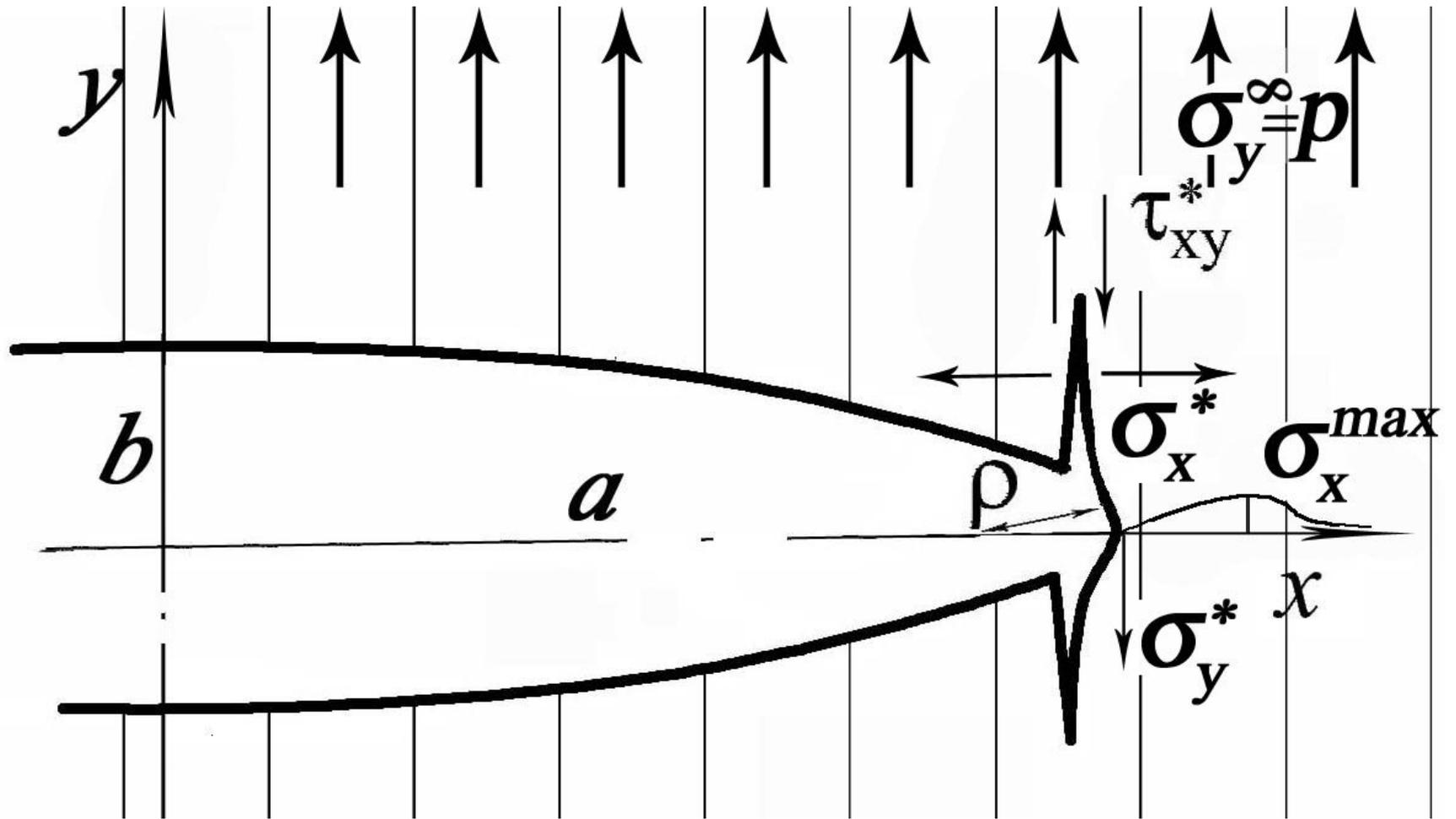
Три секрета прочности КОМПОЗИТОВ



$$\lim_{b/a \rightarrow 0} K_\sigma = 1 + 2\sqrt{\frac{f}{\rho}} = 1,82$$



Mechanism of crack arrest by weak interface



Объекты и эффекты

- Эффекты –
- Прямые
- Конструкционные
- Технологические

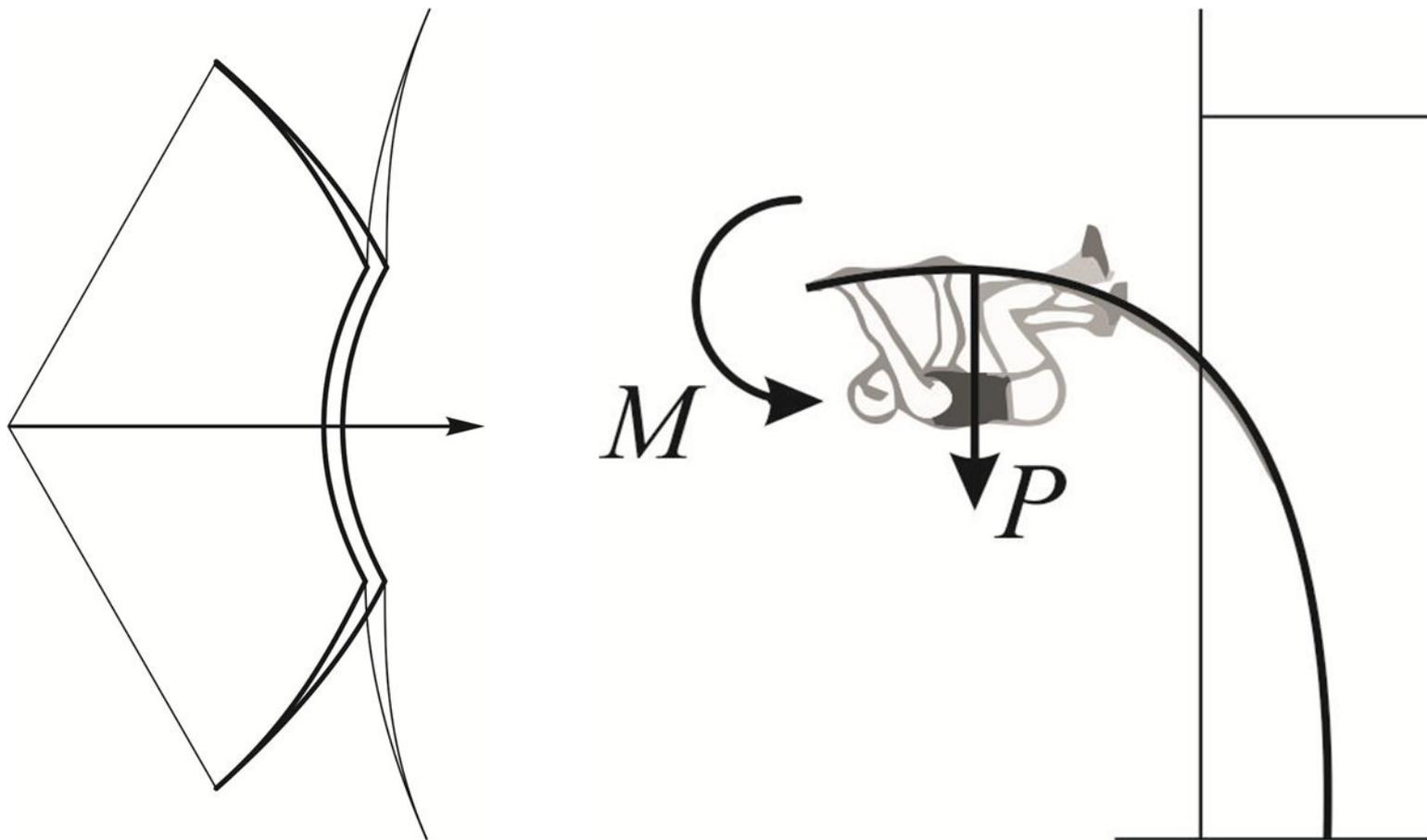
Объекты и эффекты применения КОМПОЗИТОВ

Эффекты применения композитов:

- прямые, связанные с физико-механическими свойствами самих материалов (низкая плотность, высокая прочность, химическая стойкость, немагнитность и др.);
- технологические (безотходность и низкая энергоемкость производства, отсутствие необходимости в механической обработке и отделке, простота создания изделий сложной формы);
- конструкционные, связанные с возможностью оптимального проектировании не только на уровне размеров и формы детали, но и на уровне структуры армирования материала (оптимизация схемы армирования, снижение числа деталей, рост критических частот колебаний и вращения, повышение точности движения за счет малых инерционных сил).



Первый конструкционный композит - стеклопластик



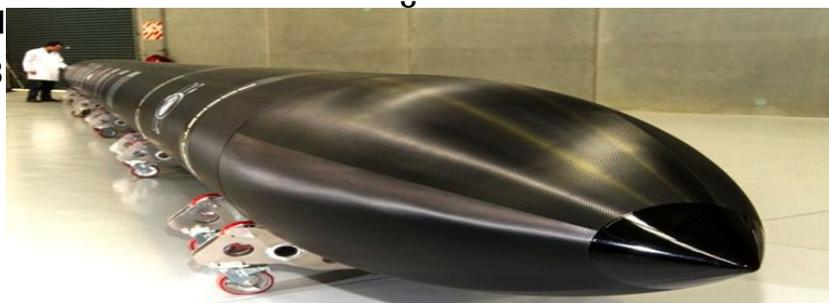
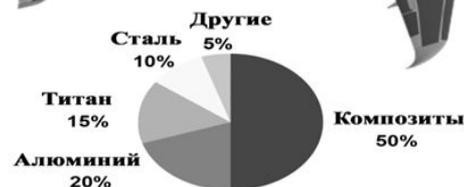
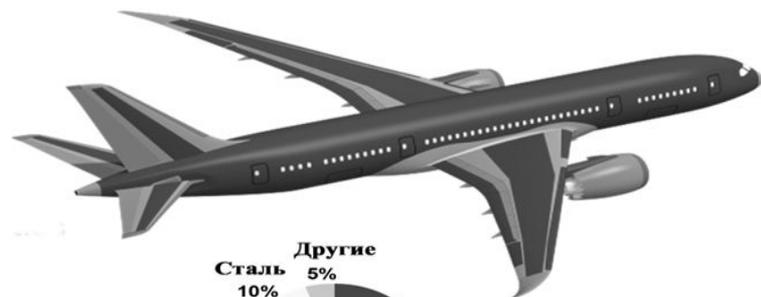
Примеры применения композитов в авиации, космическом и гражданском машиностроении, в автомобилестроении

В авиации: для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюр, панелей и т. д.) и двигателей (лопаток компрессора и турбины и т. д.).

В космической технике: для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей.

В автомобилестроении: для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т. д.

В гражданском машиностроении: для об...



Дефекты в композитах и компонентах

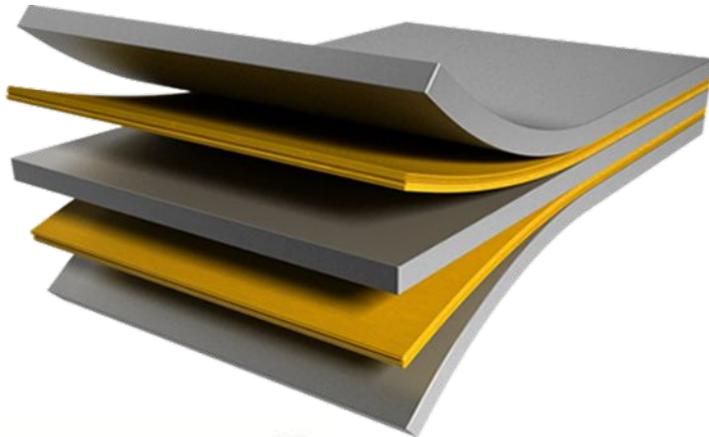
- Технологические
- Конструкционные
- Эксплуатационные

1.2. Структура композитов. Свойства волокон и матриц

Классификация композитных материалов

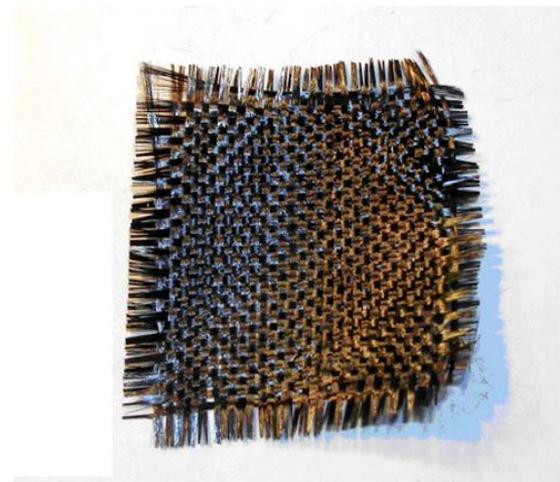
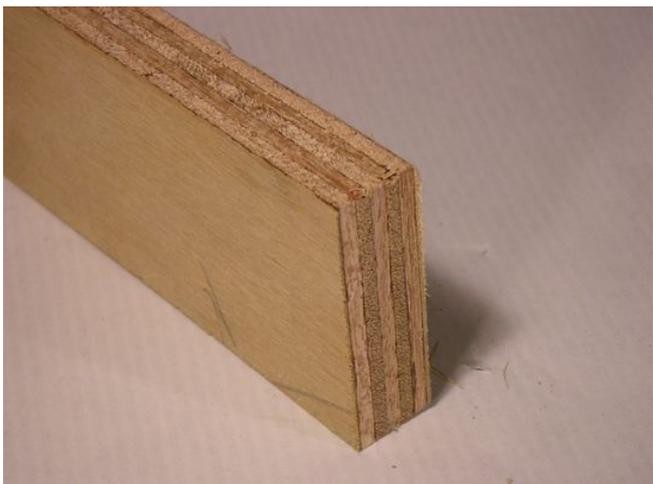
По составу:

- Металлические
- Углеродные
- Керамические
- Полимерные



По структуре:

- Волокнистые
- Слоистые
- Дисперсноупрочнённые
- Упрочнённые частицами
- Наноккомпозиты



По назначению:

Конструкционные



Триботехнические



Отделочные



Радио-и электротехнические

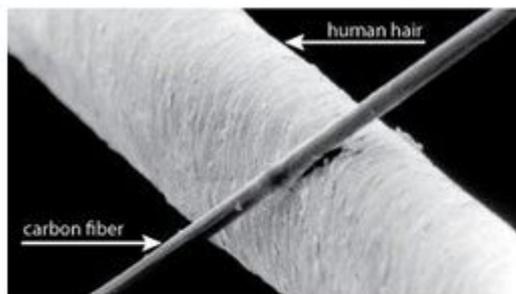


Медицинские

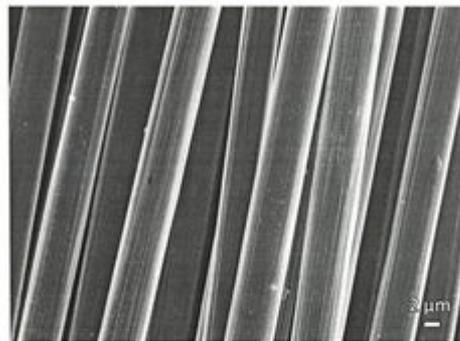


Виды полуфабрикатов

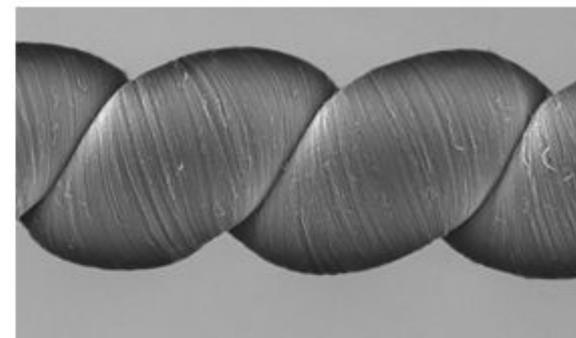
Моноволокно



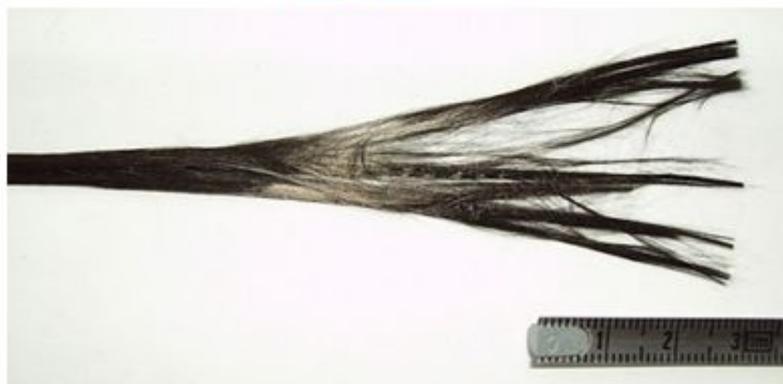
Нити



Жгуты



Ровинг



Ткани



Препреги



Маты из рубленой пряжи



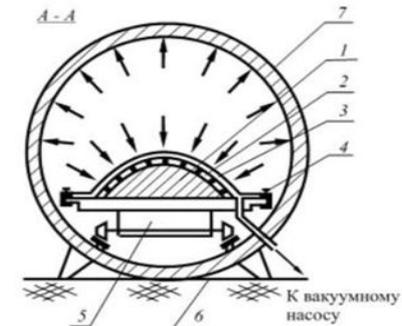
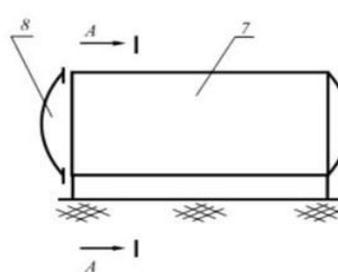
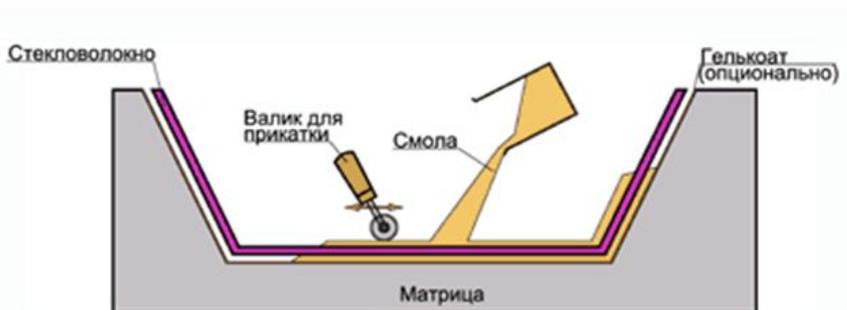
Структура армирования

- 0-мерная (частицы, скаляр)
- 1-мерная (нити, условный вектор)
- 2-мерная (нити в двух и более направлениях (но в одной плоскости), 2 и более условных вектора)
 - 3-мерная (нити в трёх и более некомпланарных направлениях, 3 и более условных не компланарных вектора)
- Многонаправленная (14-ти направленный, 27-ми направленный, но структур 2-мерная или 3-мерная)



Технологии изготовления

Ручное формование Автоклавное формование



1 – форма; 2 – препрег; 3 – эластичная мембрана; 4 – уплотнители;
5 – тележка; 6 – рельсы; 7 – корпус автоклава; 8 – крышка.

Вакуумное формование

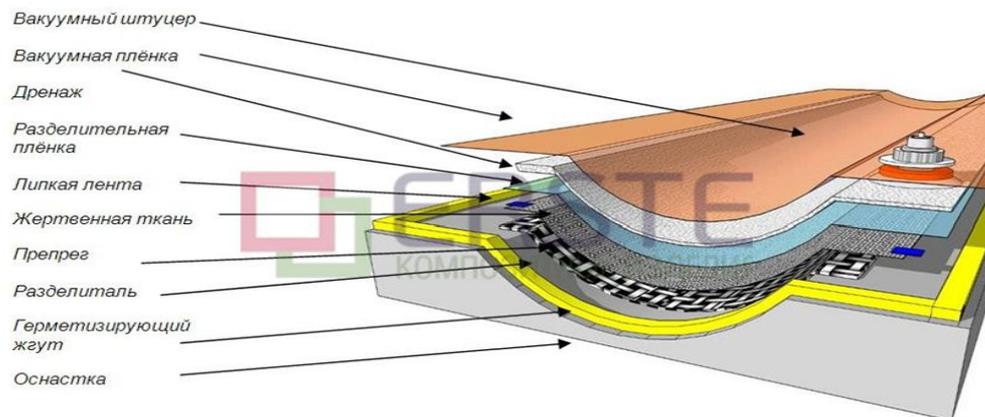
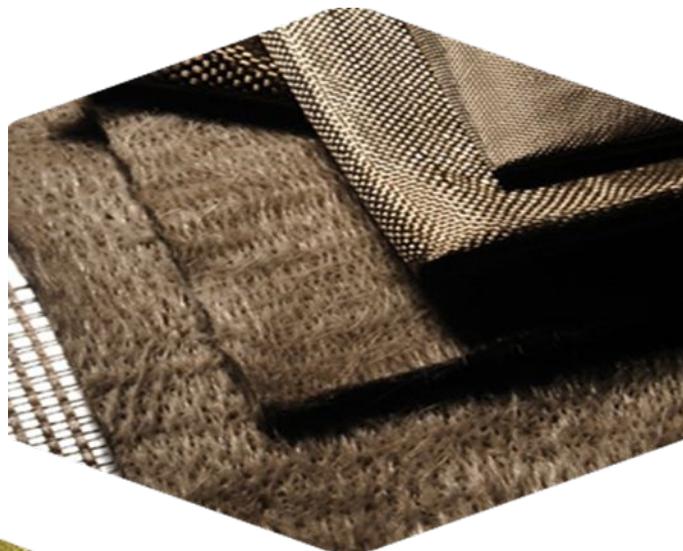
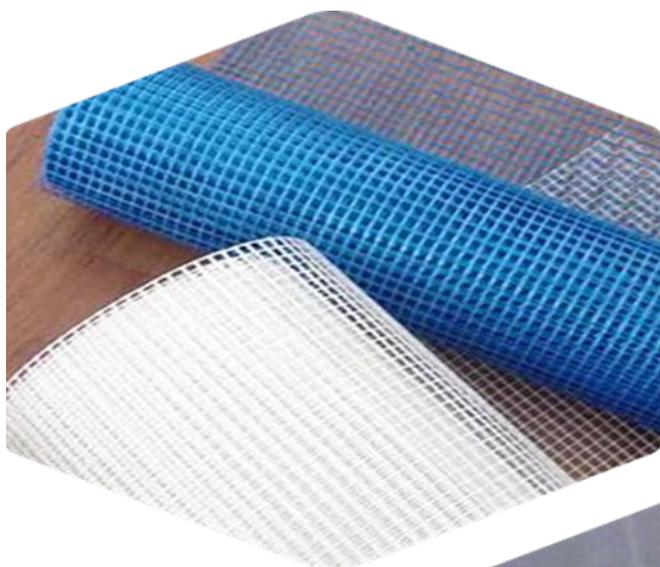


Рисунок 1



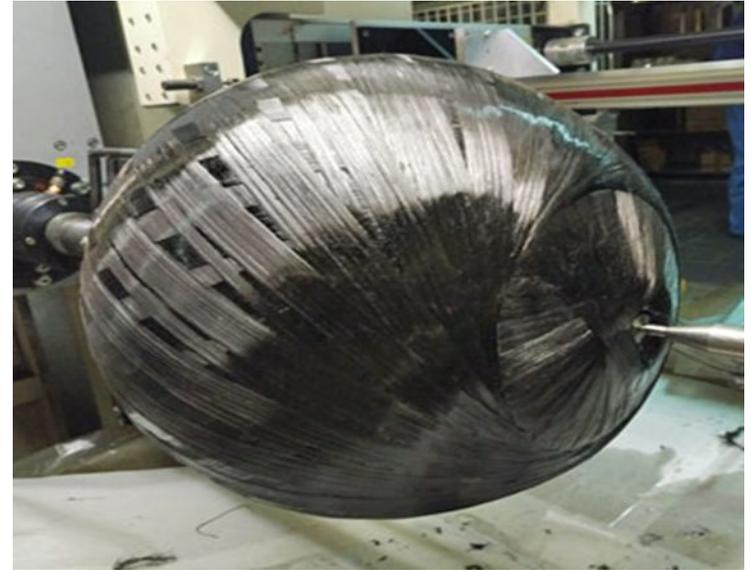
Свойства композитных материалов

Армирующие материалы для
КОМПОЗИТОВ:



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

Применение волокнистых композитов в сосудах давления



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

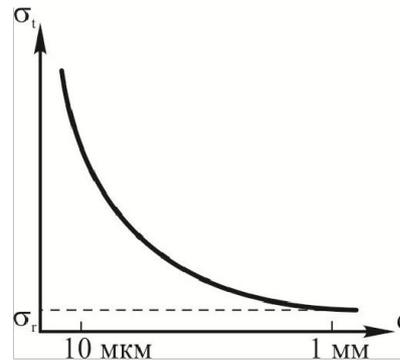
1.3. Три секрета прочности волоконистых композитов

1.3.1. Первый секрет - масштабный эффект прочности волокон

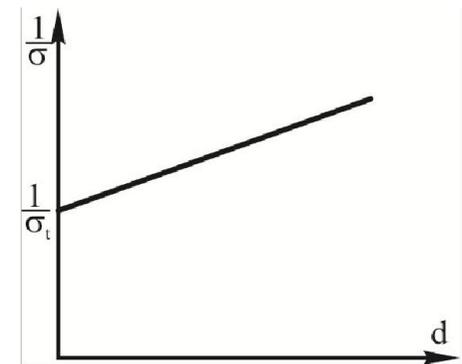
Оценка прочности, полученная Гриффитсом $\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{l}}$

γ - удельная работа разрушения,

$l \approx \frac{1}{2}d$ - длина дефекта



а)



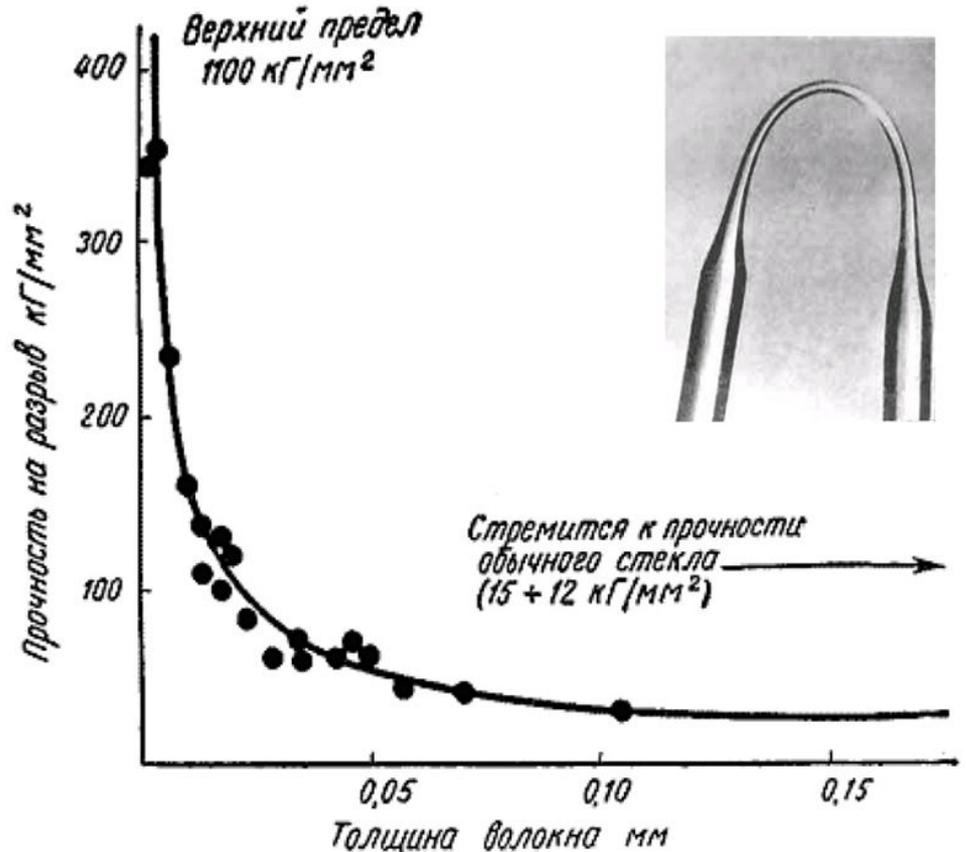
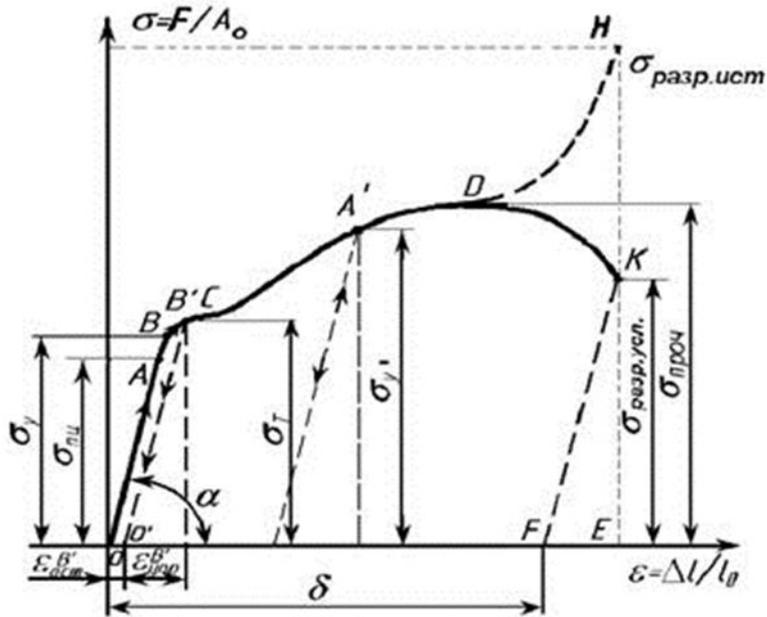
б)

Зависимости прочности – (а) и её
обратной величины – (б) от диаметра
волокна

Масштабный эффект (Scale effect)

«РОЛЬ ВОЛОКОН»

Эксперимент Гриффитса со стеклянными волокнами (1911 г.)



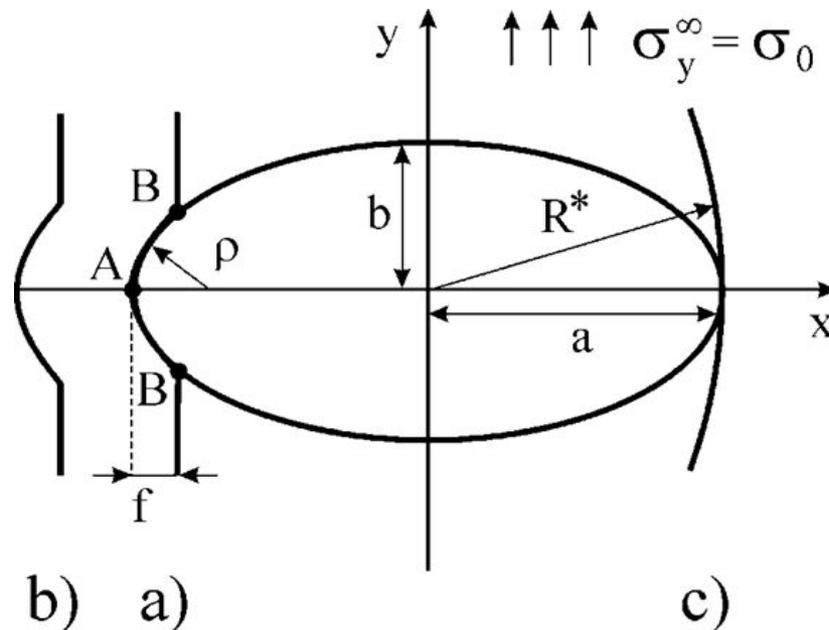
1.3.2. Второй секрет - остановка трещины поверхностью раздела

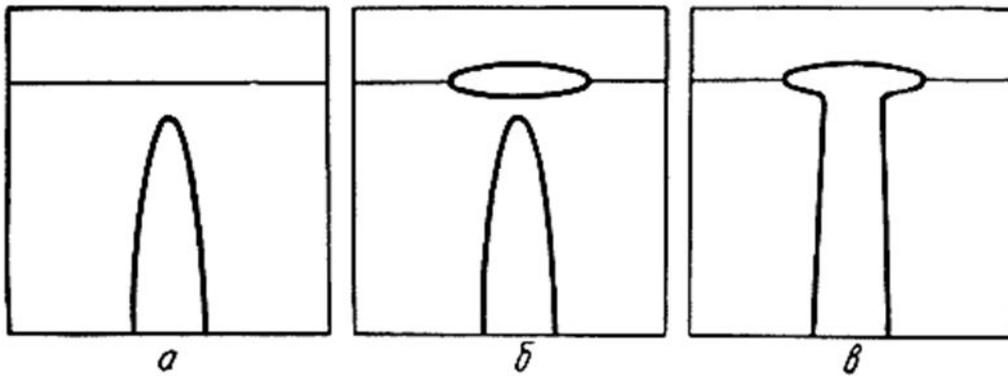
$K_t = \frac{\sigma_y^*}{\sigma_y^\infty} = 1 + \frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_1 \beta_2} \frac{a}{b}$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений

$\beta_1 = \beta_2 = 1$ - для изотропного материала $\varepsilon = \frac{b}{a}$

$K_\sigma = \frac{\sigma_{эл}}{\sigma_{тп}}$ - эффективный коэффициент концентрации напряжений

Но $K_\sigma < K_t$ всегда





Механизм торможения (схематически)

$$\frac{\sigma_{x0}^*}{\sigma_y^*} = \frac{t\beta_1\beta_2}{(t^{4/3} + t^{2/3} + 1)}, \text{ где } t = \frac{\beta_1}{\beta_2}$$

В изотропном случае $\frac{1}{3\sqrt{3}} = 0.192$

Для наибольших напряжений на контуре:

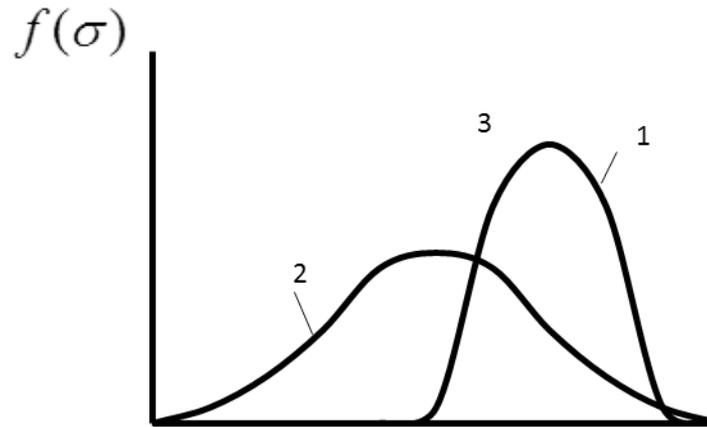
$$\frac{\sigma_{x0}^*}{\sigma_y^*} = \frac{\beta_1^2}{(t+1)^2}; \frac{\tau_{xy}^*}{\sigma_y^*} = 3\sqrt{\frac{3}{2}t\beta_1(A+2B)^{-1}(A-B)^{-1/2}},$$

где $B = (t^2 + 1), A = (B^2 + 12t^2)^{1/2}$



Микроснимки картин роста трещины в слюде: когда трещина упирается в границу слоев – слева, и когда трещина проходит вдоль слоев – справа.
Прочность слева в 20 раз выше.

1.3.3. Третий секрет - статистический характер прочности волокон



$$L_3 = \frac{1}{4} \frac{d\sigma_f}{[\tau_M]}, \text{ где}$$

d - диаметр волокна, σ_f, τ_M - прочности волокна на разрыв и матрицы на сдвиг

$$\sigma_c = z\sigma_f\psi_f + (1 - \psi_f)\sigma_M, \text{ где}$$

σ_f, σ_M - прочности волокон и матрицы, определенные в экспериментах на достаточно длинных образцах

ψ_f - объемная доля волокон

1.3.4. О линейной механике разрушения

Общая накопленная упругая энергия:

Изменение упругой энергии:

$$U = \sigma^2 (V - k_0 l^3) / (2E)$$

$$dU = -3\sigma^2 k l^2 dl / (2E)$$

$$U = \sigma^2 (V - k_1 h l^2) / (2E);$$

$$dU = -2\sigma^2 h k_1 l dl / (2E); \quad dS = 2h dl;$$

$$dU / dS = \gamma \Rightarrow \sigma \propto \sqrt{k E \gamma} / l.$$

1.3.5. Об асимптотическом решении задачи про остановку трещины поверхностью раздела

$$\sigma_{xx} = (p/\varepsilon)A_{xx}k_{xx}^p + (s/\varepsilon)B_{xx}k_{xx}^s\sqrt{k_{xx}^s};$$

$$A_{ij} = \frac{\beta_1\beta_2(\beta_1 + \beta_2)}{(k_{ij} + \beta_1^2)(k_{ij} + \beta_2^2)};$$

$$\sigma_{yy} = (p/\varepsilon)A_{yy} + (s/\varepsilon)B_{yy}\sqrt{k_{yy}^s};$$

$$B_{ij} = \frac{A_{ij}}{\beta_1\beta_2}; \quad ij = xx, yy, xy.$$

$$\tau_{xy} = (p/\varepsilon)A_{xy}\sqrt{k_{xy}^p} + (s/\varepsilon)B_{xy}k_{xy}^s;$$

Надо сравнивать наибольшие напряжения на контуре:

$$\sigma_x^* \text{ при } t = \beta_1^2 / (1 + \beta_1^2)^2 (= \frac{1}{4}) \quad (\text{при } t = \beta_1^2) \quad \sigma_x^+ \quad \sigma_y^* = \frac{1}{5} \quad t =$$

1.3.6. О роли касательных напряжений и оптимальных (равнопрочных) свойствах волокнистых композитов

Условие равнопрочности:

$$\frac{\tau_{xy}^*}{\sigma_y^*} = \frac{\tau}{\sigma_\sigma}$$

Для эллиптических отверстий в изотропном случае:

$$\frac{\tau_{xy}^*}{\sigma_y^*} = \left\{ \begin{array}{l} \text{при } a \neq b \\ \text{при } a = b \\ \text{при } a \neq b \end{array} \right.$$



1.3.7. О распределении Вейбулла

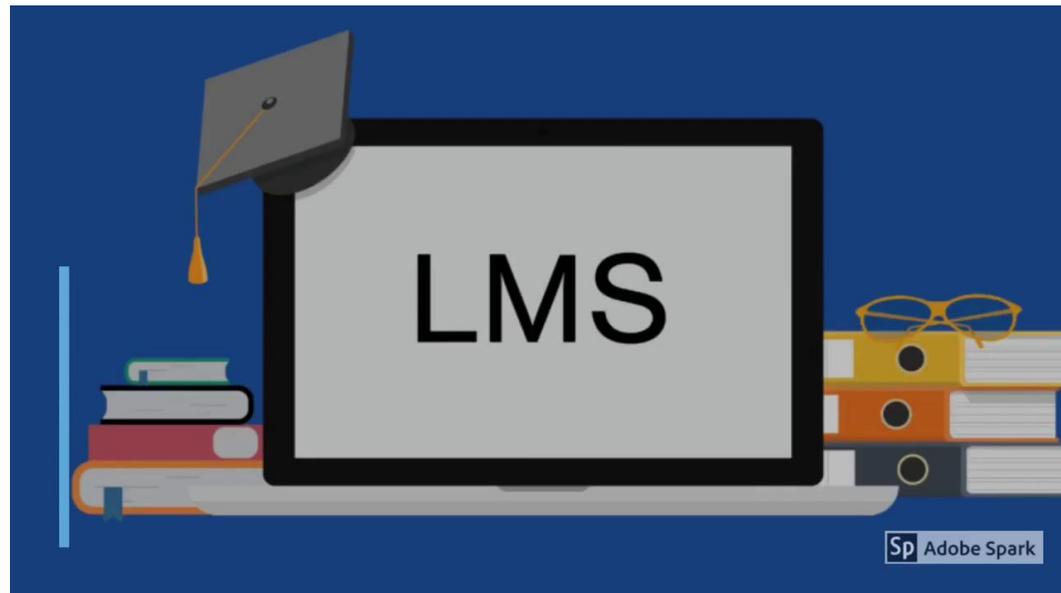
Функция плотности распределения прочности

$$p(\sigma) = \frac{dP(\sigma, L)}{d\sigma} = \frac{L\alpha}{L_0\sigma^*} \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^\alpha\right].$$

Распределение Вейбулла более обосновано применительно к прочности волокон, чем традиционное нормальное распределение Гаусса, которое, во-первых, симметрично, во-вторых, допускает бесконечные и отрицательные значения прочности.

Заключение

Предлагаем студентам просмотреть дополнительные материалы, размещенные в LMS Политеха (<https://lms.mospolytech.ru>)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!