Композитные материалы (Композиционные материалы)

Введение

- Композитные материалы – система, состоящая из двух и более макросоставляющих, отличающихся по форме и химическому составу, и нерастворимых друг в друге.
- Историю можно отсчитывать с начала 20 столетия. В 1940 г фибергласс был использован для укрепления эпоксидки.
- Области применения:
  - Аэрокосмическяа область
  - Спорттовары
  - Автомобильная индустрия
  - Конструкционные материалы
  - Домашние товары
  - ……

Boeing 757-200

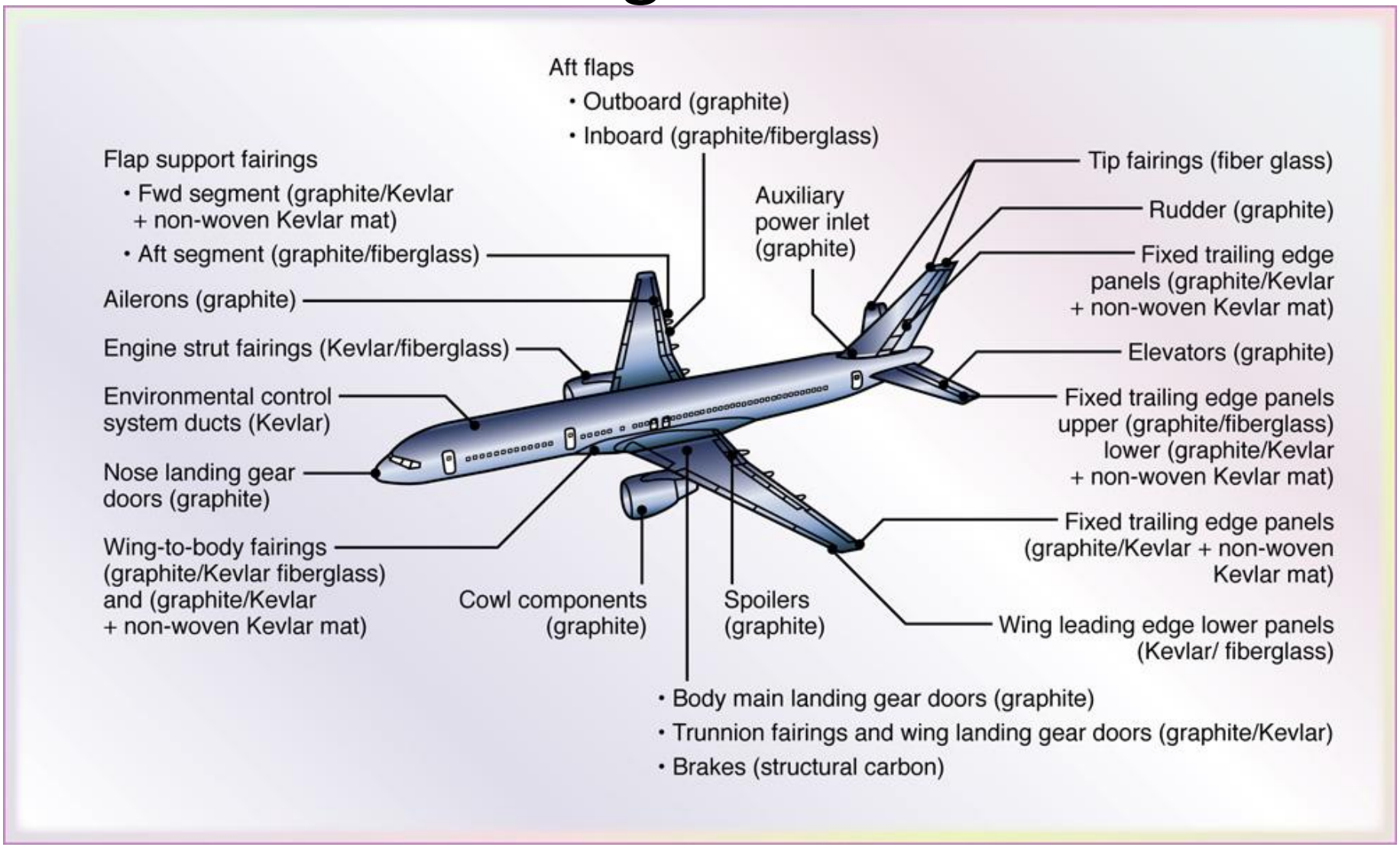


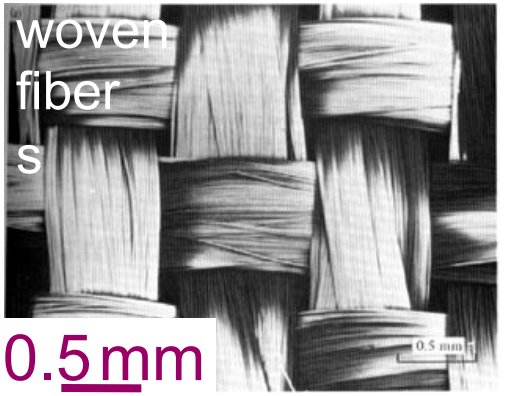
Figure 9.1 Application of advanced composite materials in Boeing 757-200 commercial aircraft. *Source:* Courtesy of Boeing Commercial Airplane Company.

Manufacturing, Engineering & Technology, Fifth Edition, by Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid.
ISBN 0-13-148965-8. © 2006 Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. All rights reserved.

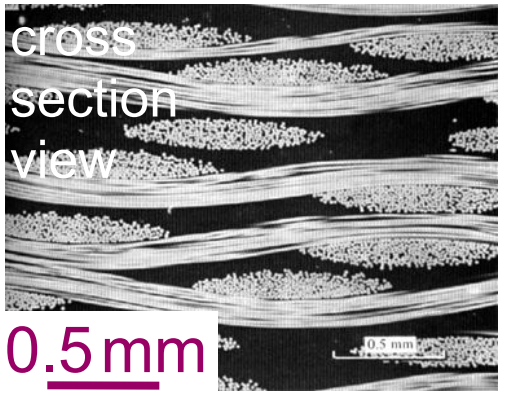
Терминология и классификация

- Матрица:
  -- Непрерывная фаза
  -- Цель:
    - перенос напряжения на другие фазы
    - защита фаз от окружающей среды
  -- Классификация:

Металлическая
Керамическая
Полимерная



0.5 mm

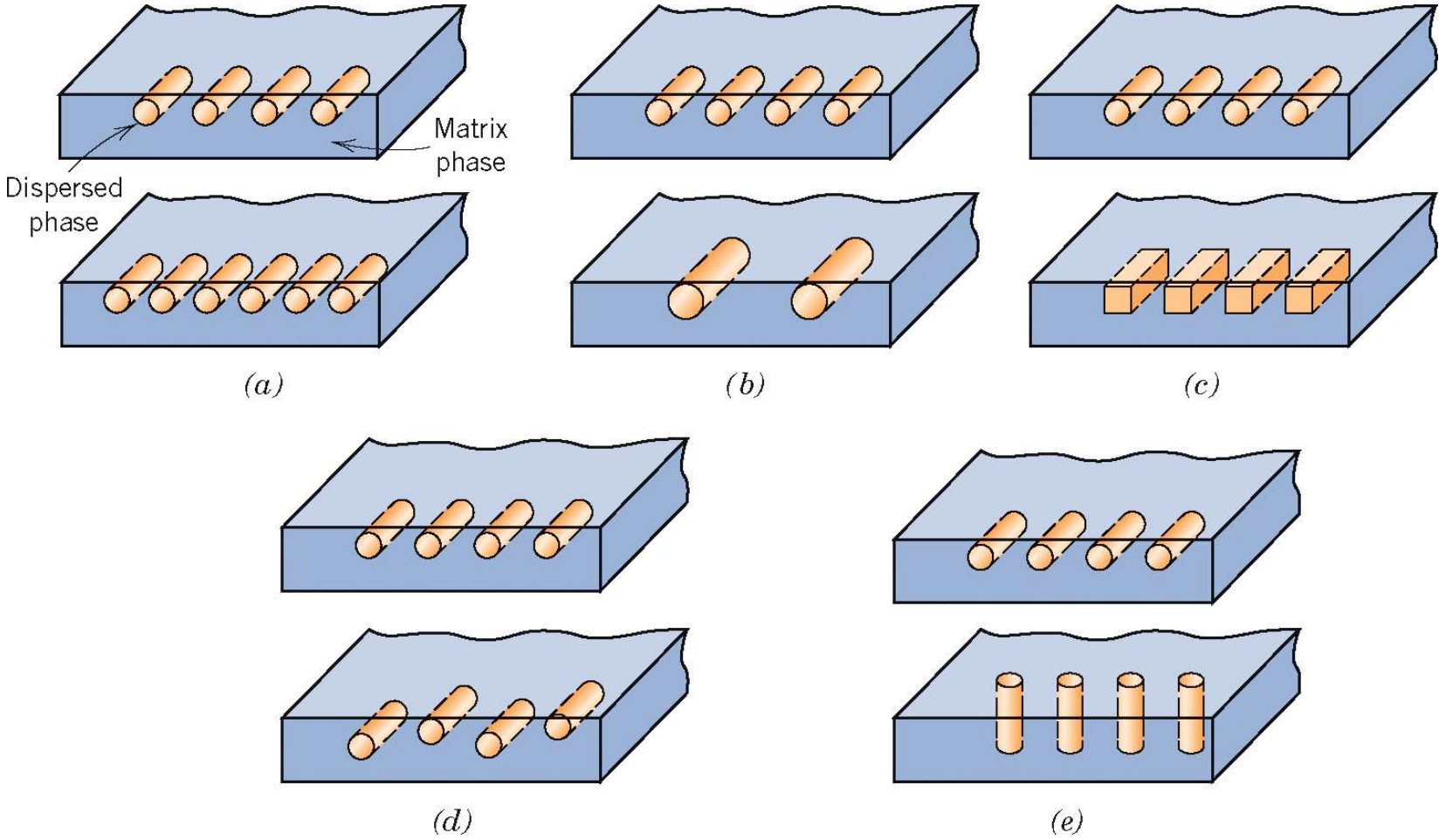


0.5 mm

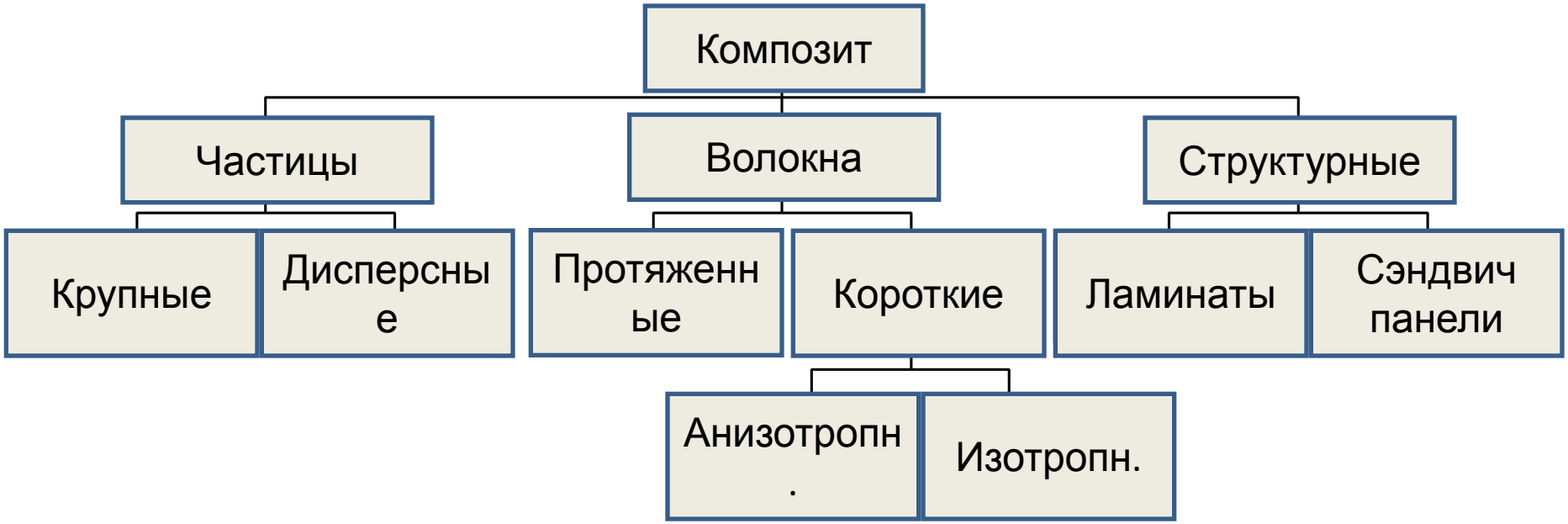
- Дисперсная фаза:
  -- Цель: улучшение свойств матрицы.
    металлическая: повысить σ_y, *предел прочн*, сопротивл деформ.
    керамическая: повысить K_c
    полимерная: повысить E, σ_y, *предел прочн*, сопротивл деформ.
  -- Классификация: частицы, волокна, структурные

Reprinted from
D. Hull and T.W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, 1996, Fig. 3.6, p. 47.

Структурная организация: вариации дизайна

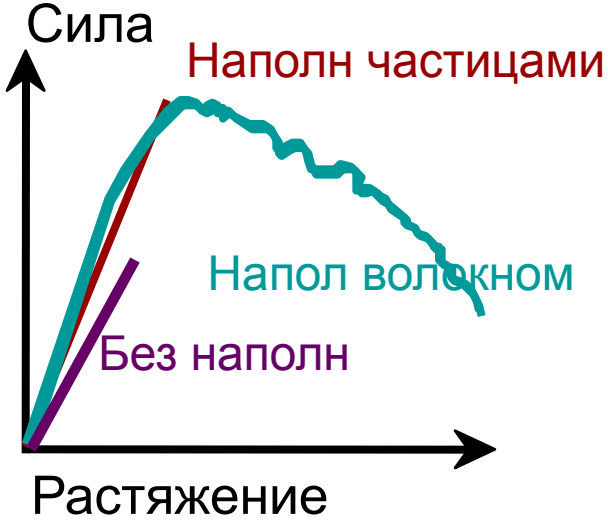


Основной набор композитов

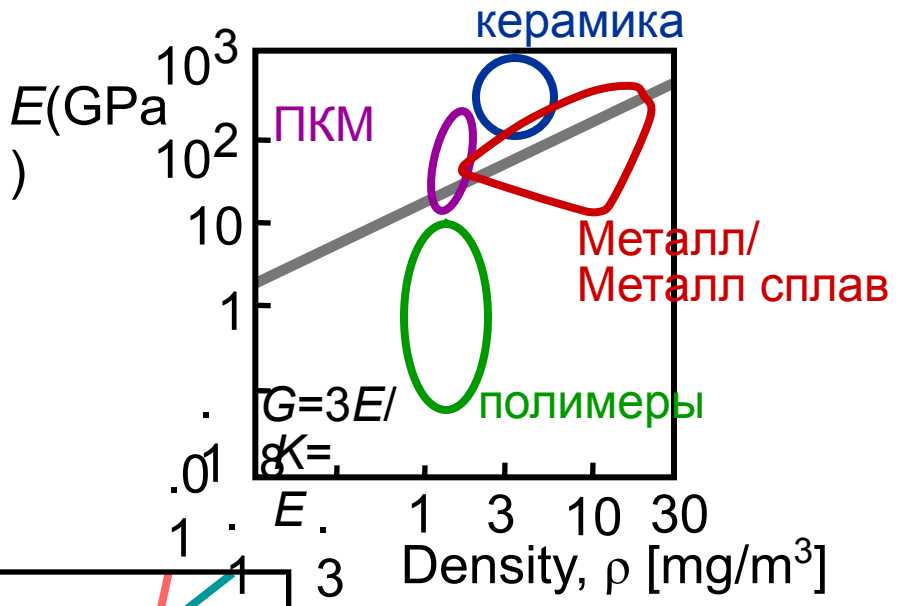


Преимущества композитов

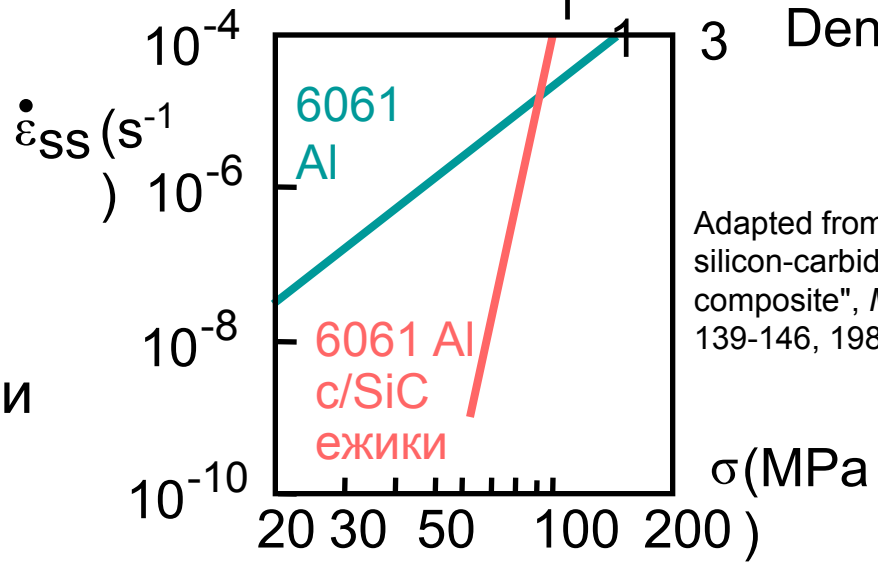
- ККМ: Повышенная прочность



- ПКМ: Увелчиченное E/ρ



- МКМ: Повыш. сопрот. деформации



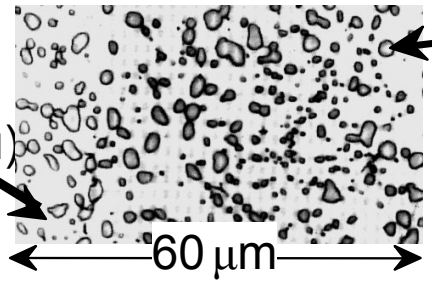
Adapted from T.G. Nieh, "Creep rupture of a silicon-carbide reinforced aluminum composite", *Metall. Trans. A* Vol. 15(1), pp. 139-146, 1984. Used with permission.

Композиции с частицами -I

Наполненные частицами | Наполн. волокнами | Структурные

- Примеры:
  - Сфероидит сталь

Матрица: Феррит (α) (пластичный)

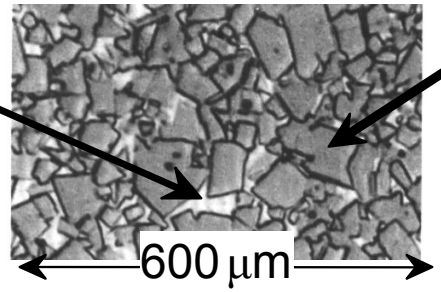


частицы: цементит (Fe_3C) (хрупкий)

Adapted from Fig. 10.19, *Callister 7e*. (Fig. 10.19 is copyright United States Steel Corporation, 1971.)

  - WC/Co цементир. карбид

матрица: кобальт (пластичн) (V_m: 5-12 vol%!

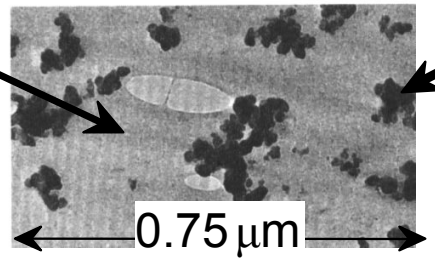


частицы: WC (хрупкие, твердые)

Adapted from Fig. 16.4, *Callister 7e*. (Fig. 16.4 is courtesy Carboloy Systems, Department, General Electric Company.)

  - Автомоб. шина

матрица: резина (мягкий)



частицы: C (жесткий)

Adapted from Fig. 16.5, *Callister 7e*. (Fig. 16.5 is courtesy Goodyear Tire and Rubber Company.)

Композиции с частицами -2

Наполненные частицами | Наполн. волокнами | Структурные

Цемент– гравий + песок + цемент

Усиленный цемент – Усилен стальными волокнами

- увеличивает прочность – даже если матрица ломается

Напрягающий цемент- отверждают при напряжении.

- гораздо прочнее.

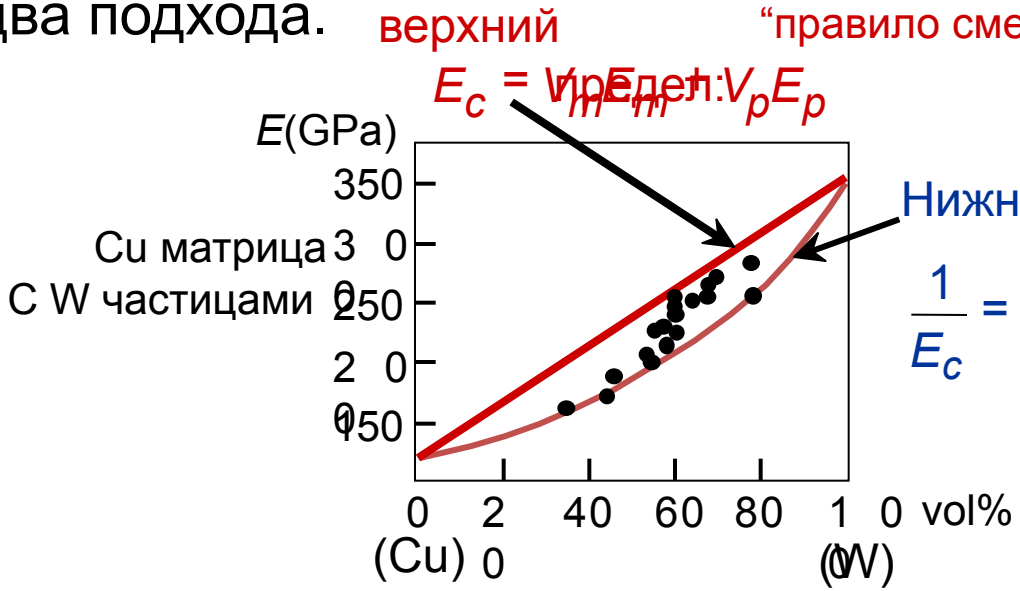
Пост-напряжение– стягивающие шайбы на стержне после отверждения

Композиции с частицами -3

Наполненные частицами | Наполн. волокнами | Структурные

- Модуль эластичности композита, E_c:

  -- два подхода.



Adapted from Fig. 16.3, *Callister 7e*. (Fig. 16.3 is from R.H. Krock, *ASTM Proc*, Vol. 63, 1963.)

- Также применимо к другим свойствам:

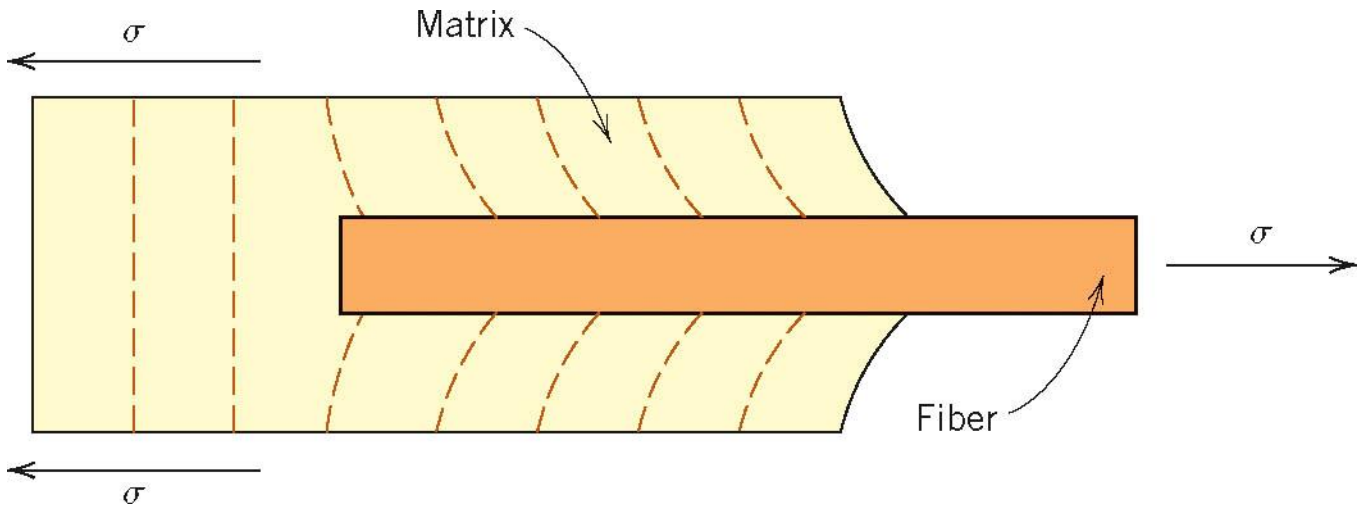
  -- Электропроводность, σ_e: заменить E в уравнениях на σ_e.

  -- Теплопроводность, k: заменить E в уравнениях на k.

Композиты с волокнами

- Волокна прочные сами по себе
  - Существенно упрочняют материал
  - **Пример: фибергласс (стекловолокно)**
    - **Протяженные стеклянные нити в полимерах**
    - **Прочность от волокон**
    - **Полимер просто удерживает их вместе и защищает от окружающей среды**

Поведение волокна в матрице при напряжении:



Композиты с волокнами

С частицами | **С волокнами** | структурные

- Критическая длина волокна (l_c) для эффективного упрочнения

Прочность при растяжении волокна

Диаметр волокна

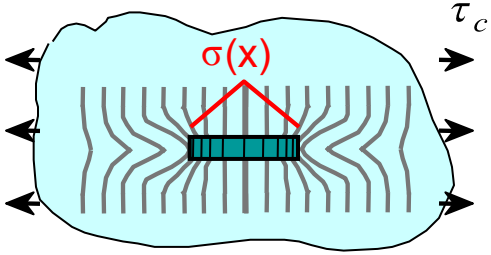
$$\text{длина волокна} > 15\frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

Сопротивление сдвигу на границе раздела фаз

- Пример: Для стекловолокна длина > 15 мм позволяет наилучшим образом реализовать свойства стекла.

Короткое толстое волокно:

$$\text{длина} < 15\frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

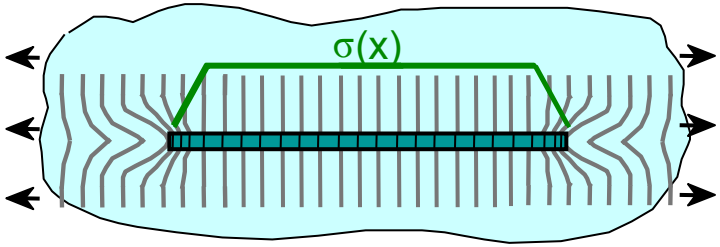


Низкая эффективность

Adapted from Fig. 16.7, *Callister 7e*.

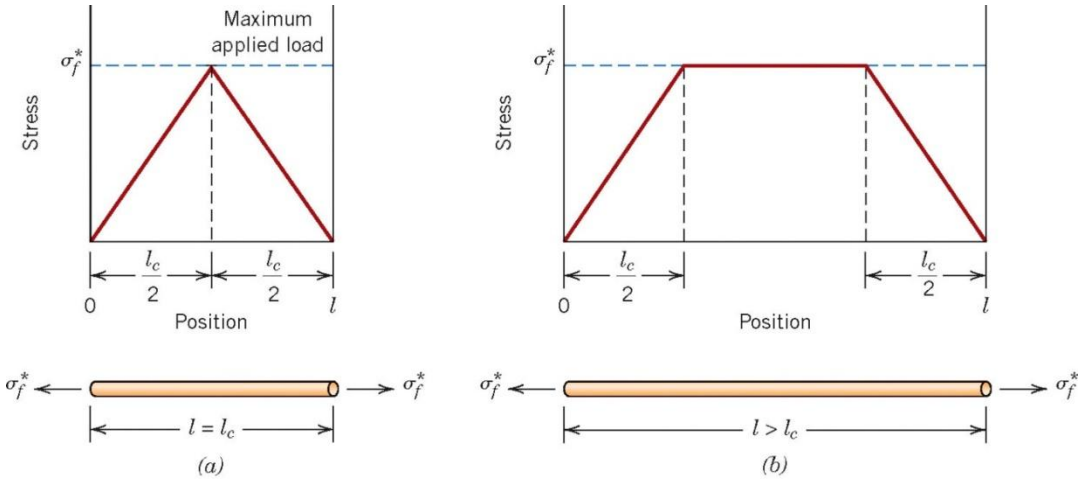
Длинное тонкое волокно:

$$\text{длина} > 15\frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

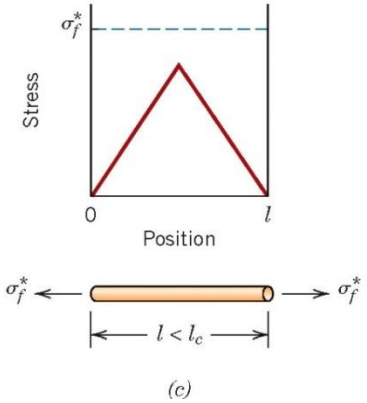


Высокая эффективность

Нагрузка на волокно при растяжении



$$l_c = \frac{\sigma^*_f d}{2\tau_c}$$

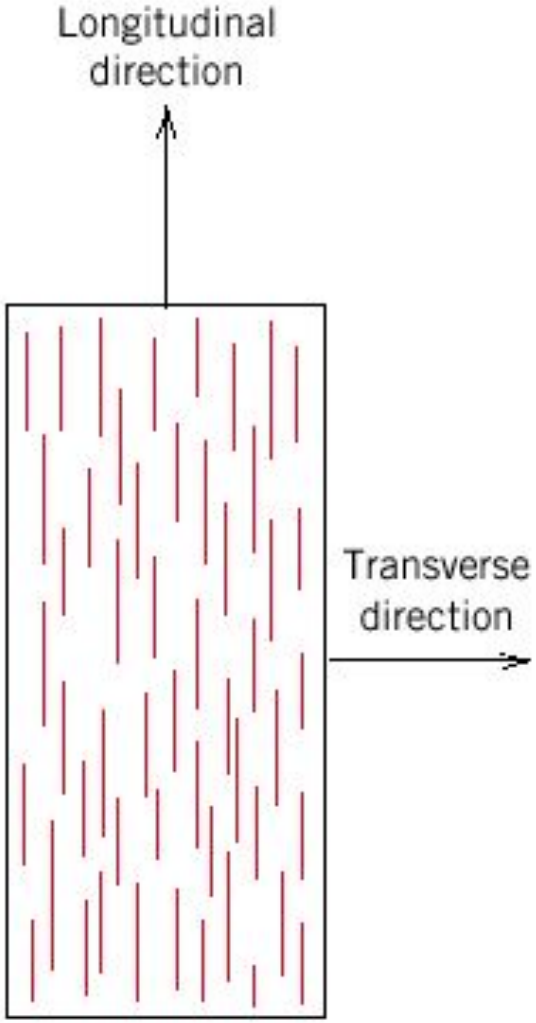


Композиты с волокнами

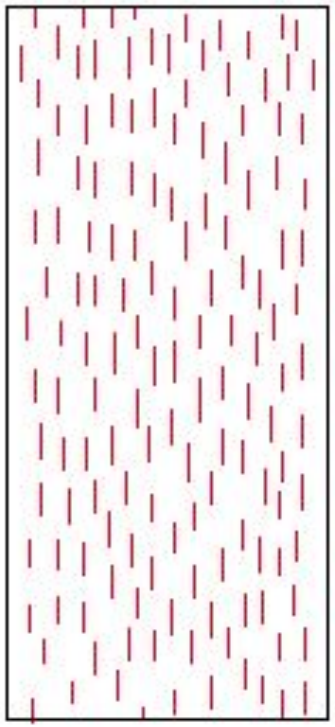
С частицами | **С волокнами** | структурные

- Волоконные материалы
  - Whiskers – тонкие отдельные кристаллы с большим отношением длины к диаметру
  - графит, SiN, SiC
    - Высокая кристалличность – самые прочные из известных
    - Очень дорогие
  - Fibers (волокна)
    - поликристалличные или аморфные
    - обычно полимерные или керамические
    - примеры: Al_2O_3 , Aramid, E-glass, Boron, UHMWPE
  - Wires
    - Metal – steel, Mo, W

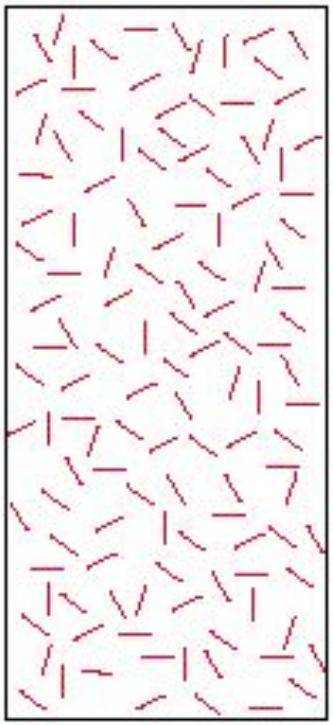
Ориентированность волокон



ориентированные протяженные

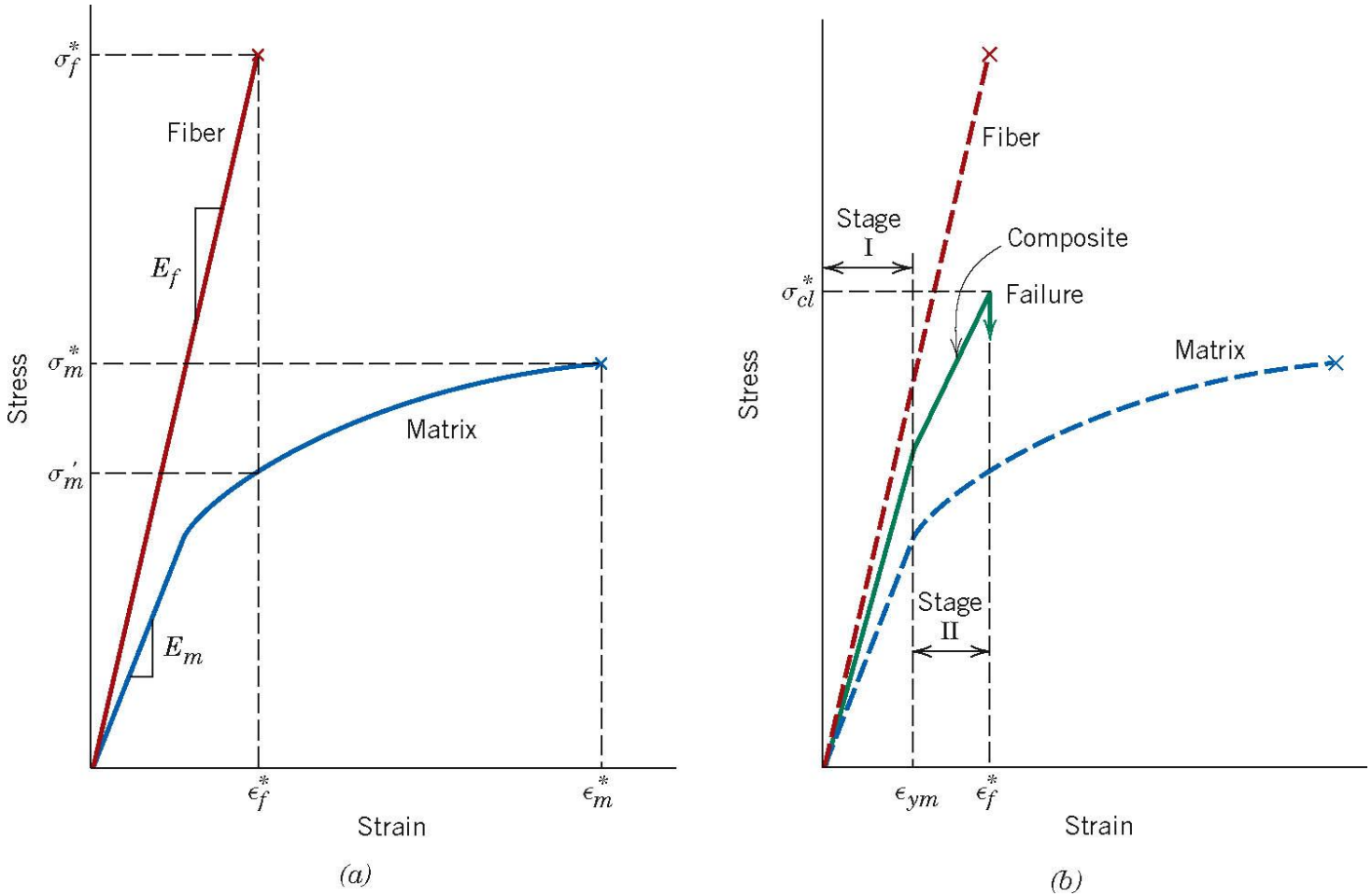


Ориентированные короткие



Беспорядочные

Поведение под нагрузкой



Прочность композита: продольная нагрузка

Оценка прочности композита из длинных волокон в матрице

- Продольная деформация

$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$ но $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$

$\therefore$ $\boxed{E_{ce} = E_m V_m + E_f V_f}$ продольный (растяжения) модуль

f = волокно
m = матрица

$E = \sigma/\varepsilon$

Прочность композита: поперечная нагрузка

- При поперечной нагрузке волокна несут меньше нагрузки и находятся в состоянии, когда приложенное напряжение одинаково для волокон и матрицы

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \qquad \varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$

$$\therefore \quad \frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

Поперечный модуль

пример:

Example: Given an epoxy/carbon unidirectional continuous fiber composite with $V_f = .60$ and the following fiber and matrix properties:

	Ultimate Strength σ_u psi	Modulus E_L psi
Epoxy	$\sigma_{um} = 8400$	$E_m = 550{,}000$
Carbon Fibers	$\sigma_{uf} = 305{,}000$	$E_f = 58{,}000{,}000$

UTS, SI	Modulus, SI
57.9 MPa	3.8 GPa
2.4 GPa	399.9 GPa

a) Calculate the **longitudinal stiffness (moduli)** of the composite (E_{cL}):

$$E_{cL} = E_f V_f + E_{mL} V_m = 58{,}000{,}000(.60) + 550{,}000(.40) = 35{,}020{,}000 \text{ psi}$$

(241.5 GPa)

b) Calculate the **transverse stiffness (moduli)** of the composite (E_{cT}):

$$E_{cT} = \frac{E_f E_m}{V_f(E_m - E_f) + E_f} = \frac{58{,}000{,}000 \cdot 550{,}000}{.60(550{,}000 - 58{,}000{,}000) + 58{,}000{,}000} = 1{,}355{,}716 \text{ psi}$$

(9.34 GPa)

The transverse moduli (E_{cT} = 1,355,716 psi) is only 3.9% of the longitudinal moduli (E_{cL} = 35,020,000 psi).

Note: (for ease of conversion)

6870 N/m^2 per psi!

Прочность композита

С частицами | **С волокнами** | структурные

- Оценка E_c и *предела прочности* для бесконечных волокон:

  -- действительно для $\text{длина волокна} > 15\dfrac{\sigma_f d}{\tau_c}$

  -- модуль эластичности в направлении волокон:

  $$E_c = E_m V_m + K E_f V_f$$

  Фактор эффективности:

  -- сонаправленные 1D: $K = 1$ (выровненные $\parallel$)

  -- сонаправленные1D: $K = 0$ (выровненные $\perp$)

  -- хаотично 2D: $K = 3/8$ (2D изотропность)

  -- хаотично 3D: $K = 1/5$ (3D изотропность)

  -- *предел прочности в направлении волокон*:

  $$(TS)_c = (TS)_m V_m + (TS)_f V_f$$ (выровненные 1D)

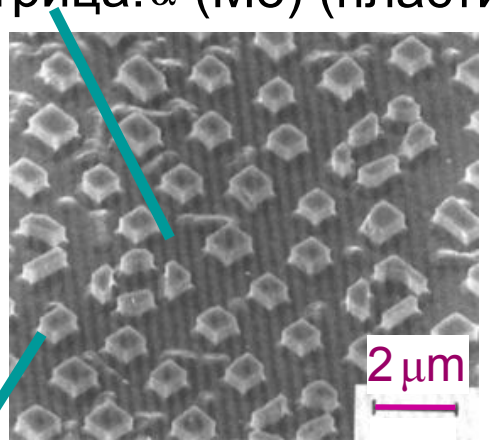
Обзор композитов: волокна

С частицами | **С волокнами** | структурные

- Выровненные протяженные волокна
- Примеры:

-- Метал: $\gamma'(Ni_3Al)$-$\alpha(Mo)$ эвтектическим отверждением.

матрица: α (Mo) (пластичн)



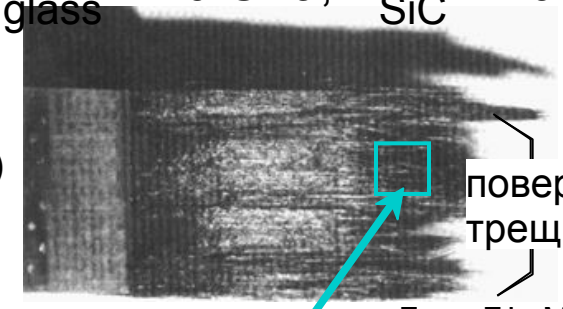
волокна: γ' (Ni_3Al) (хрупкие)

From W. Funk and E. Blank, "Creep deformation of Ni3Al-Mo in-situ composites", *Metall. Trans. A* Vol. 19(4), pp. 987-998, 1988. Used with permission.

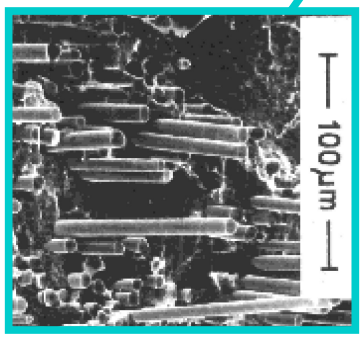
-- Керамика: стекло с SiC волокном

E_{glass} = 76 GPa; E_{SiC} = 400 GPa.

(a)



(b)



From F.L. Matthews and R.L. Rawlings, *Composite Materials; Engineering and Science*, Reprint ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2000. (a) Fig. 4.22, p. 145 (photo by J. Davies); (b) Fig. 11.20, p. 349 (micrograph by H.S. Kim, P.S. Rodgers, and R.D. Rawlings). Used with permission of CRC Press, Boca Raton, FL.

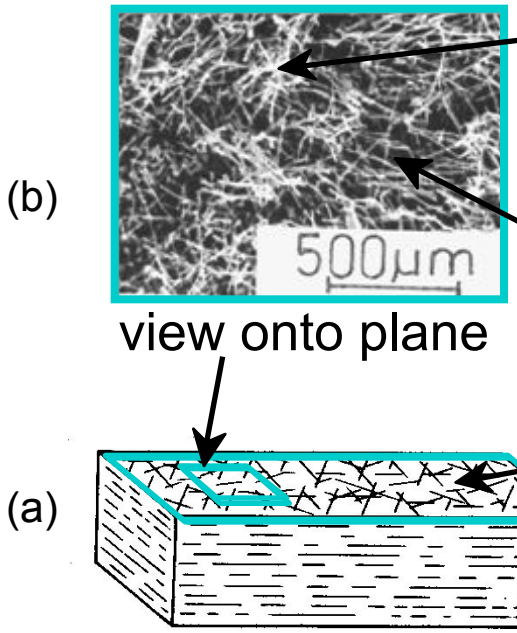
Обзор композитов: волокна

С частицами | **С волокнами** | структурные

- Изотропное, хаотичное 2D , волокна

- пример: Углерод-углерод
  -- процесс: волокна/пек,
  отжиг 2500ºC.
  -- использование:
  дисковые тормоза,
  части газовой турбины.

- другие варианты:
  -- Изотропное, хаотичное 3D
  -- Изотропное, 1D



$$E_c = E_m V_m + K E_f V_f$$

Фактор эффективности:
-- хаос 2D: K = 3/8 (2D изотропность)
-- хаос 3D: K = 1/5 (3D изотропность)

Прочность:

$$l > l_C$$

$$\sigma_{cd}^{*} = \sigma_f^{*} V_f \left(1 - {l_C}/{2l}\right) + \sigma_m^{'} \left(1 - V_f\right)$$

where σ_f^{*} is fiber fracture strength

& $\sigma_m^{'}$ is matrix stress when composite fails

$$l < l_C$$

$$\sigma_{cd'}^{*} = \frac{l\tau_C}{d} V_f + \sigma_m^{'} \left(1 - V_f\right)$$

where: d is fiber diameter &

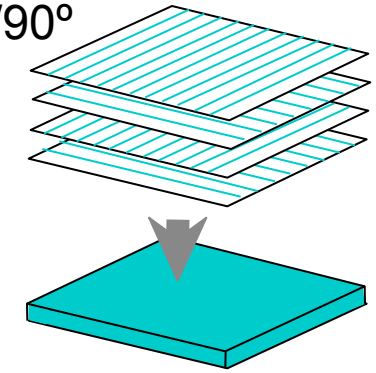
τ_C is smaller of Matrix Fiber shear strength

or matrix shear yield strength

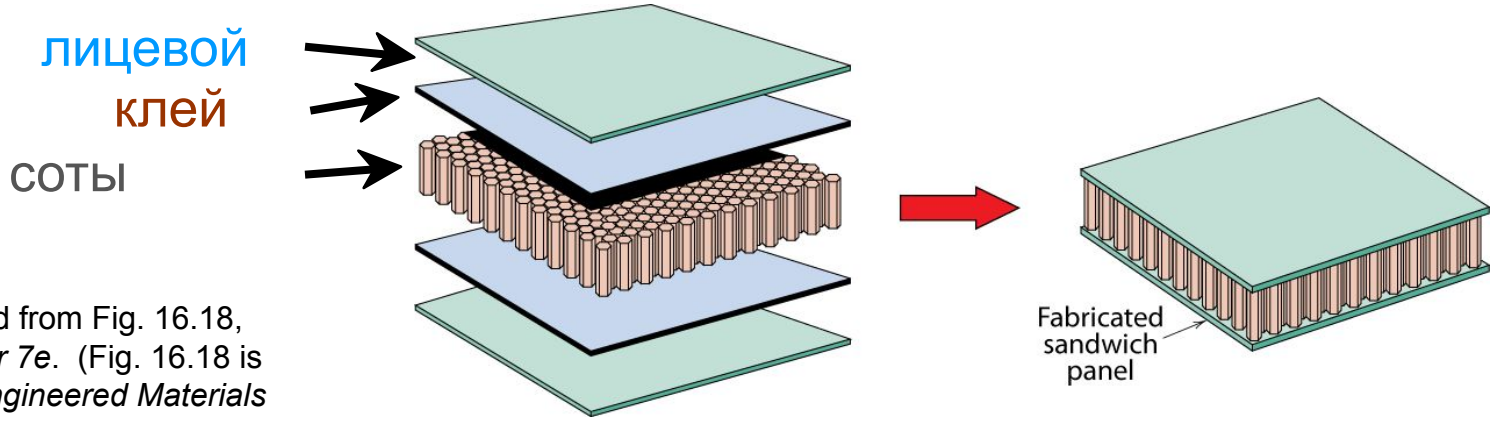
Композиты структурные

С частицами | С волокнами | **Структурные**

- Пачка связанных наполненных волокнами листов
  -- последовательность в упаковке: например, 0º/90º or 0°/45°/90º
  -- плюсы: сбалансировано, прочность



- сэндвич панели
  -- низкая плотность, соты
  -- плюсы: легкость, высокая прочность на изгиб



Adapted from Fig. 16.18, *Callister 7e*. (Fig. 16.18 is from *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.)

Производство композитов

- Для наполнителя - частиц: спекание
- для волокон: несколько
- структурные: обычно вручную, и атмосферная или вакуумная резка

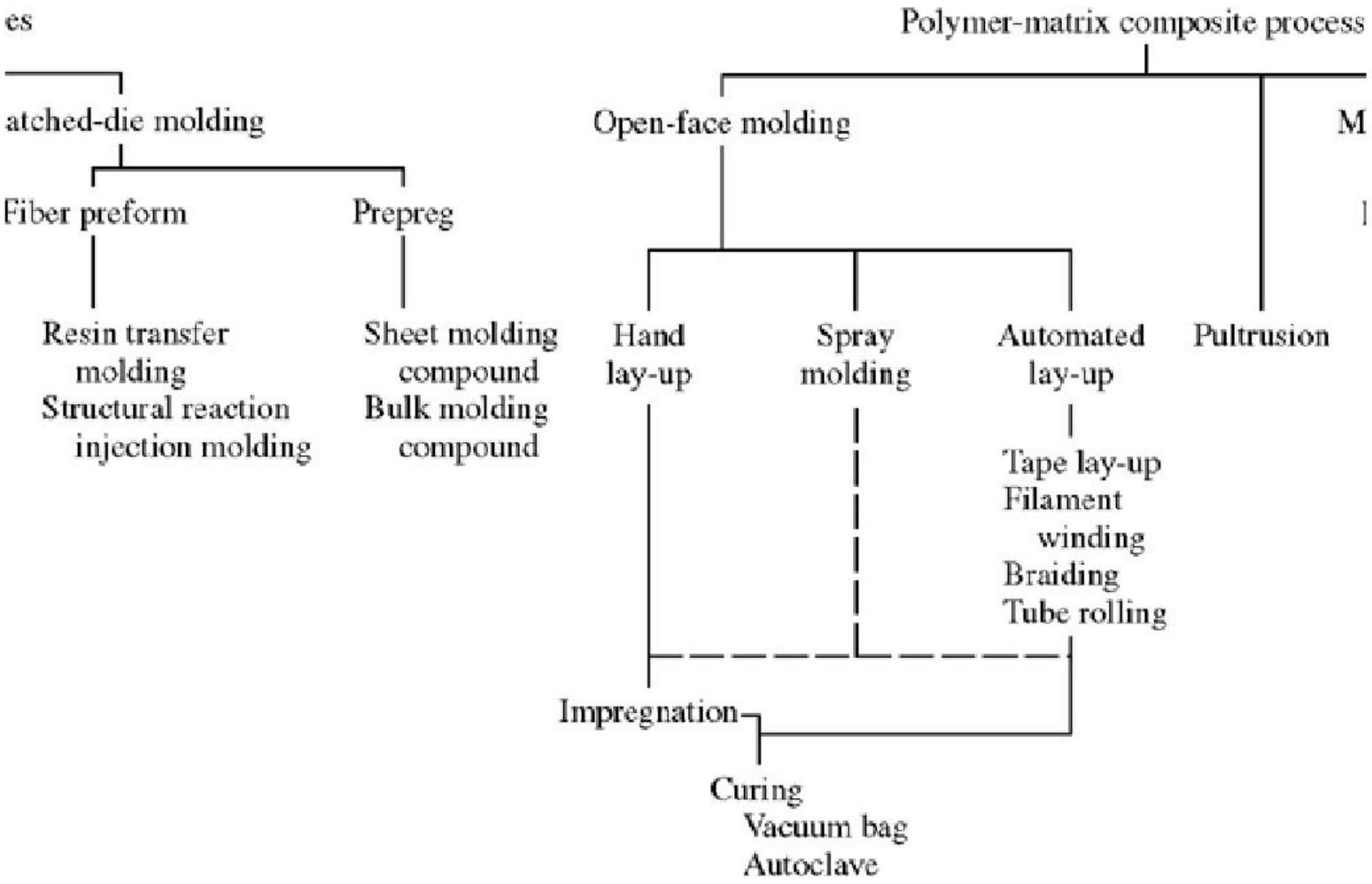


figure 15.4

© 2000 The McGraw-Hill Companies, Inc.,

Открытое формование

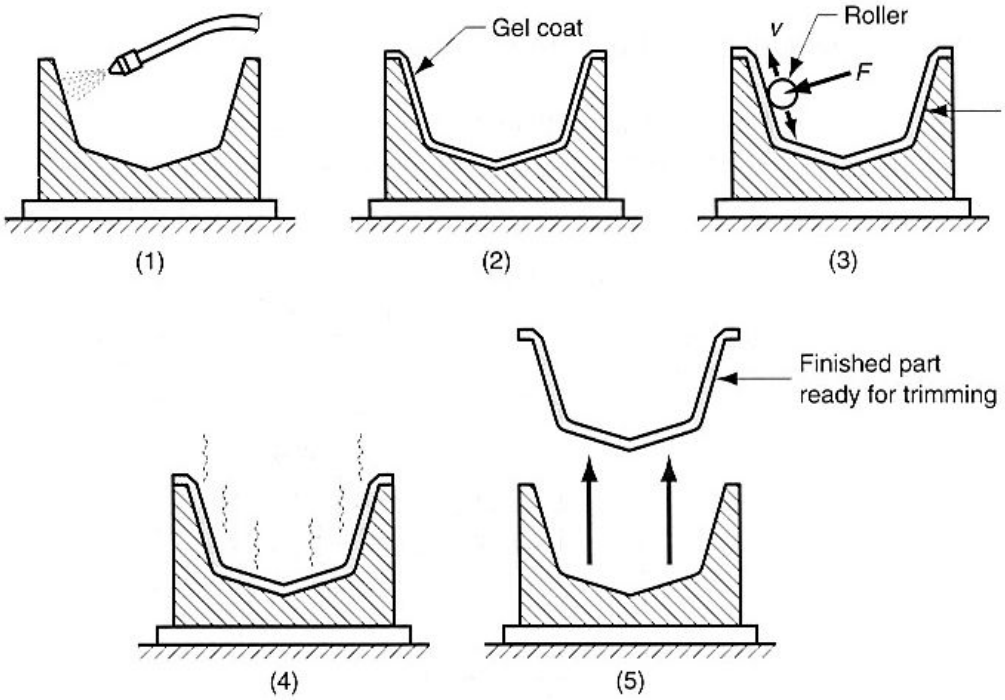
Нужна всего одна форма из любого материала (дерево, усиленный пластик, или для длительного использования, листовой металл или электроосажденный никель). Финальная часть обычно очень гладкая.

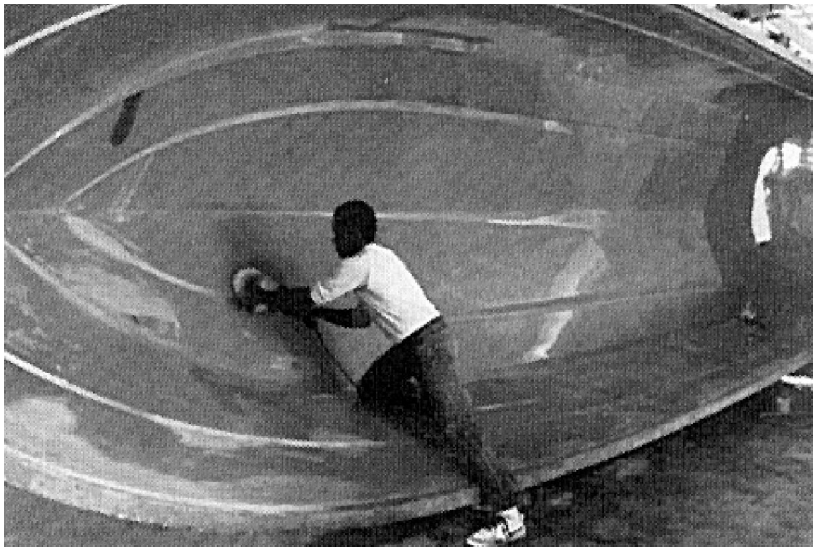
Формование. Для улучшения качества изделия:

1. Можно использовать агенты для легкого извлечения из формы (силиконовая смазка, поливиниловый спирт, фтороуглерод, иногда пленка пластика).

2. Неусиленный поверхностный слой (гелькоут) может быть предварительно нанесен для лучшего качества поверхности.

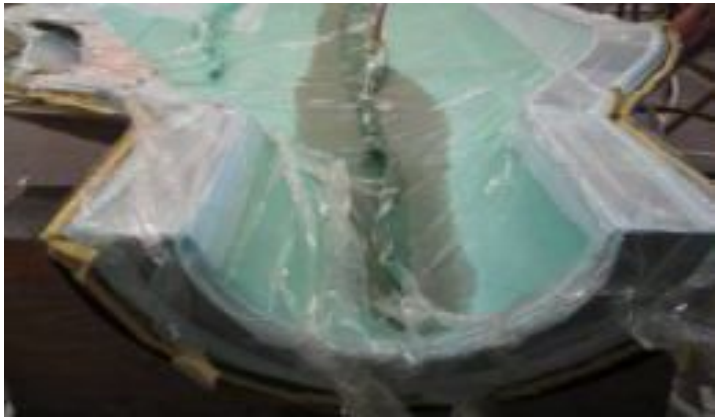
Корпус яхты





ПРОПИТКА ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ФОРМЕ

ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



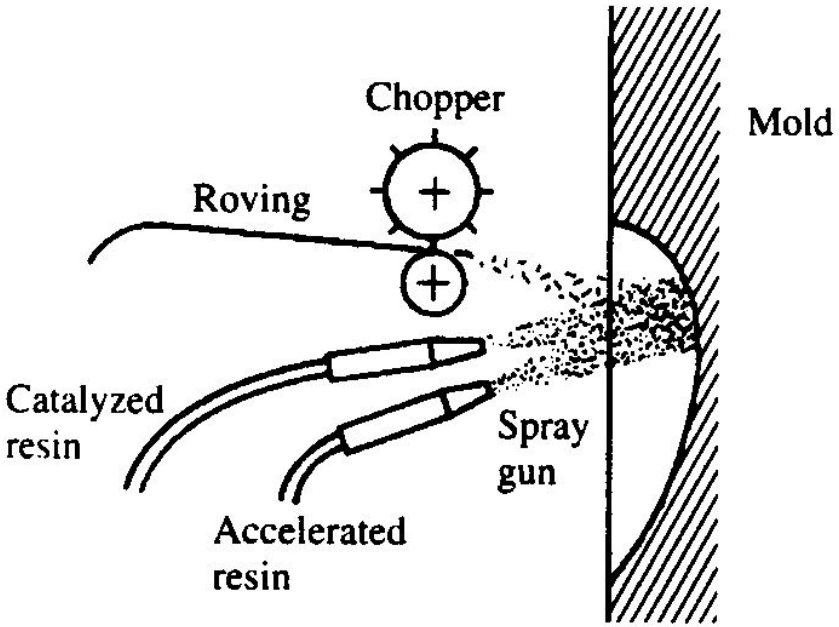
Вручную: Смола и волокно наносят вручную, воздух выдавливают, если необходимо, наносят много слоев..

- Отвержение обычно при комнатной температуре, но может быть улучшено нагреванием.
- Пустоты не более 1% обычно.
- Вспененные части могут быть использованы для большей сложности деталей. Таким образом, практически все формы могут быть воспроизведены.
- Процесс медленный (нанесение около 1 кг в час) и трудозатратный.
- Качество в большой степени зависит от навыков оператора.
- Используется для изготовления авиакомпонентов, лодок, частей машин, бассейнов и тд.

Формование распылением

Распылительное устройство подает смолу двумя пересекающимися потоками, куда добавляется порезанное волокно.

Роботизация приводит к высокой воспроизводимости и снижению трудозатрат.



Лентоукладочные машины (Automated Lay-Up)

Режет и располагает фанеру или препрег под управлением компьютера,

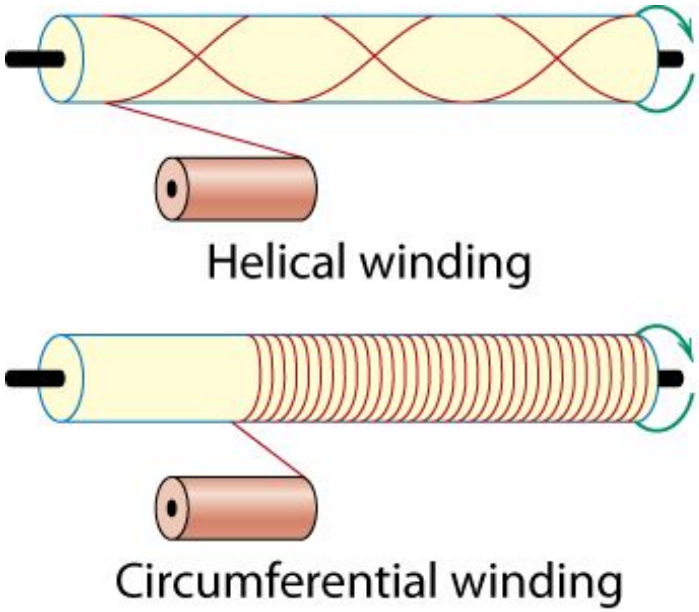
без напряжений,

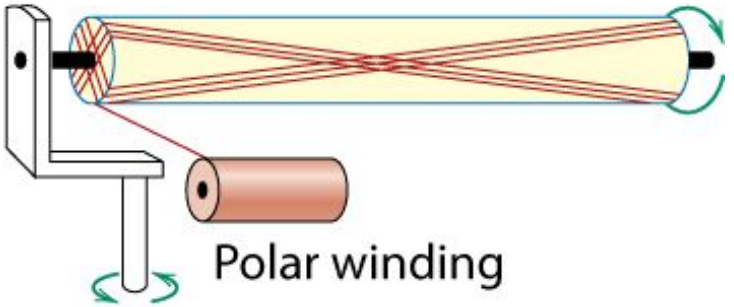
Возможны повторения (серийность).

В два раза дешевле, чем вручную.

- Используется для изготовления авиакомпонентов, лодок, частей машин, бассейнов и тд.

- Намотка нитей
  - Ex: pressure tanks
  - Continuous filaments wound onto mandrel





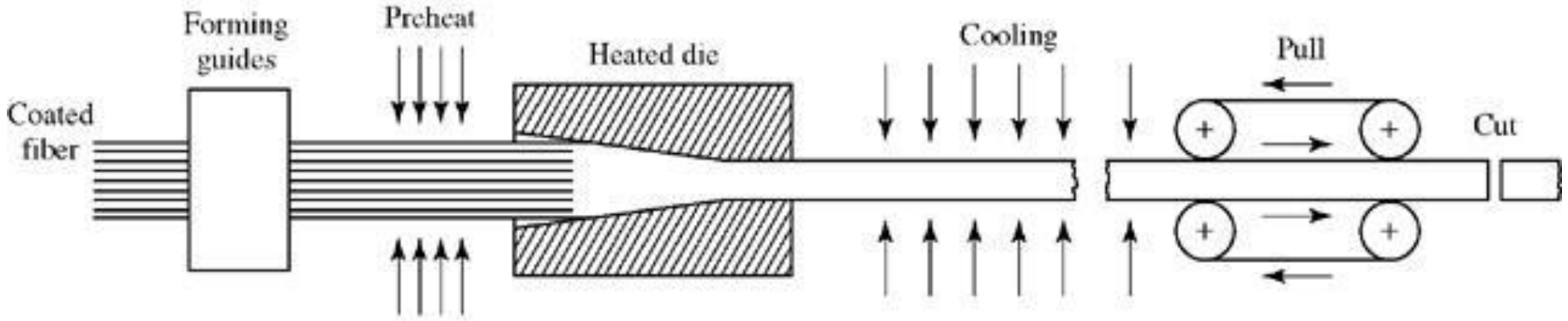
Adapted from Fig. 16.15, *Callister 7e*. [Fig. 16.15 is from N. L. Hancox, (Editor), *Fibre Composite Hybrid Materials,* The Macmillan Company, New York, 1981.]

Характеристики продукта

- Из за натяжения – каждый объект производится отдельно, не серией.
- Нить (лента) либо предварительно покрыта полимером, либо протягивается через полимер.
- До 3% пустот.
- Высокая производительность (50 кг в час).
- Применяется для: композитных труб, емкостей, сосудов под давлением.

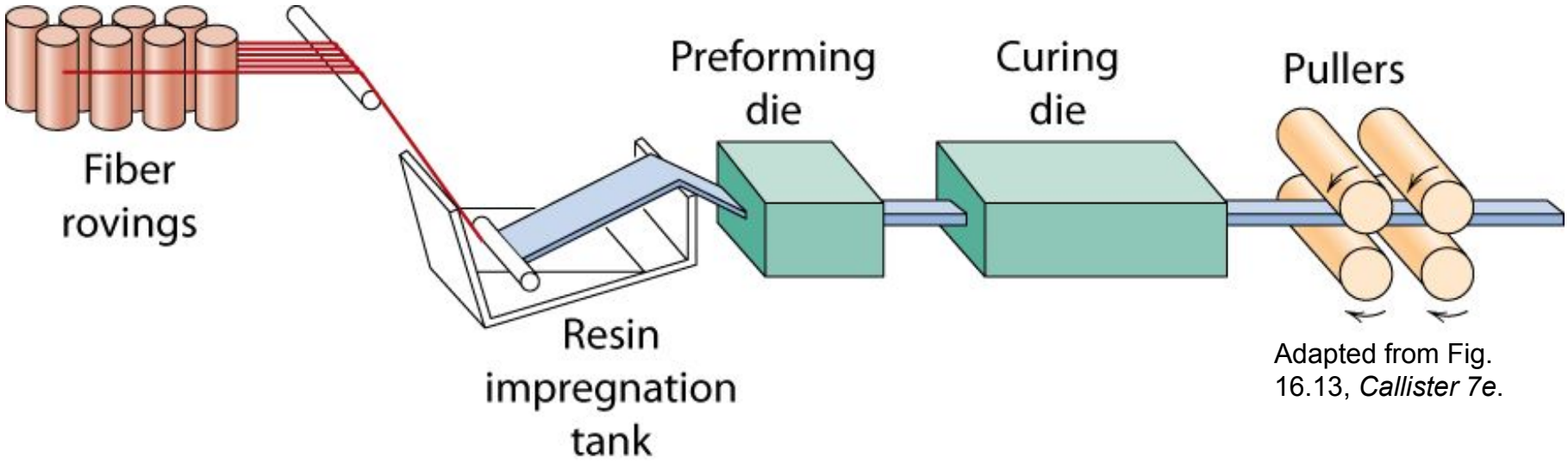
Пултрузия

- Волокно пропитывается полимером, точно позиционируется, преднагревается, и пропускается через нагретое выходное отверстие.



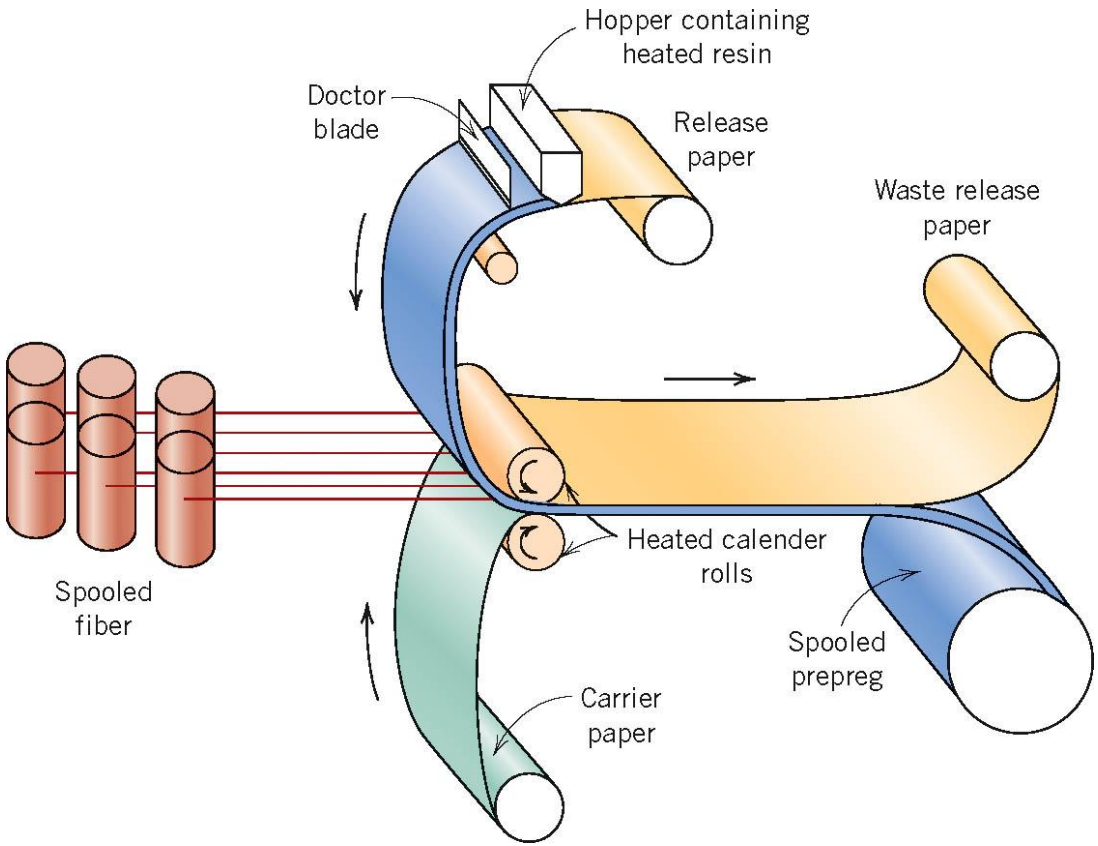
- Можно формовать изделия малого диаметра.
- Двумерные объекты типа твердых стержней, профилей, полых труб, подобно экструзии.’

Пултрузия



Adapted from Fig. 16.13, *Callister 7e*.

- Производительность 1 м в минуту.
- Применяется для производства спортинвентаря, частей автомобиля, электроизоляторов, и тд.



Препреги

- Препрег – термин из индустрии композитов, заготовка, укрепленная длинным волокном, предварительно пропитанным смолой, но сшитая только частично.
- Поставляются в форме ленты, который осуществляет конечное формование и сшивку. Не нужно добавлять смолы.
- Чаще всего используется в конструкционных работах