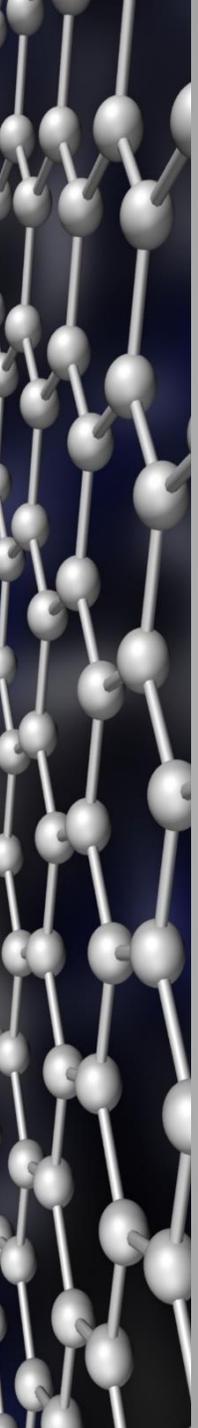


# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

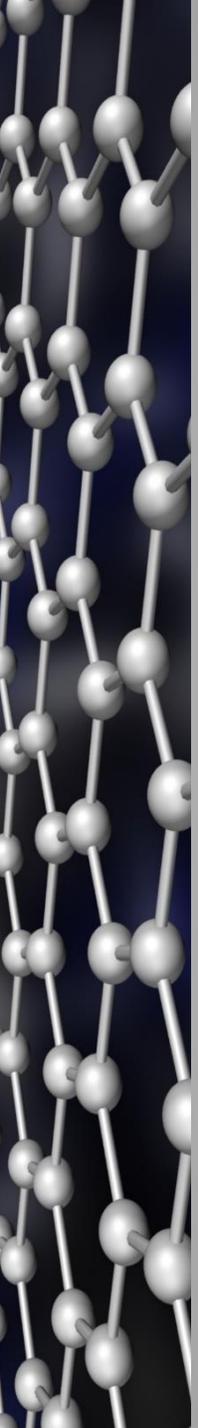
## Лекция 5. Неметаллические материалы и КОМПОЗИТЫ

КЛИМЕНОВ Василий Александрович,  
профессор ИШНПТ ТПУ



## Содержание лекции

- › Классификация конструкционных материалов и их свойств
- › Керамические материалы. Структура. Свойства. Применение
- › Виды конструкционной керамики. Стекла
- › Полимерные материалы. Структура. Свойства
- › Свойства и области применения пластиков
- › Композиционные материалы. Структура. Свойства. Применение



## Дополнительная литература

- › А.Г. Мельников, Ху Вэньсяо, Лю Битао, Материаловедение. Словарь терминов и определений. 2-е издание, переработанное и дополненное. Издательство Томского политехнического университета, 2019 г.

# Классификация материалов

По свойствам



Прогрессивные материалы



Полупроводники



Биоматериалы

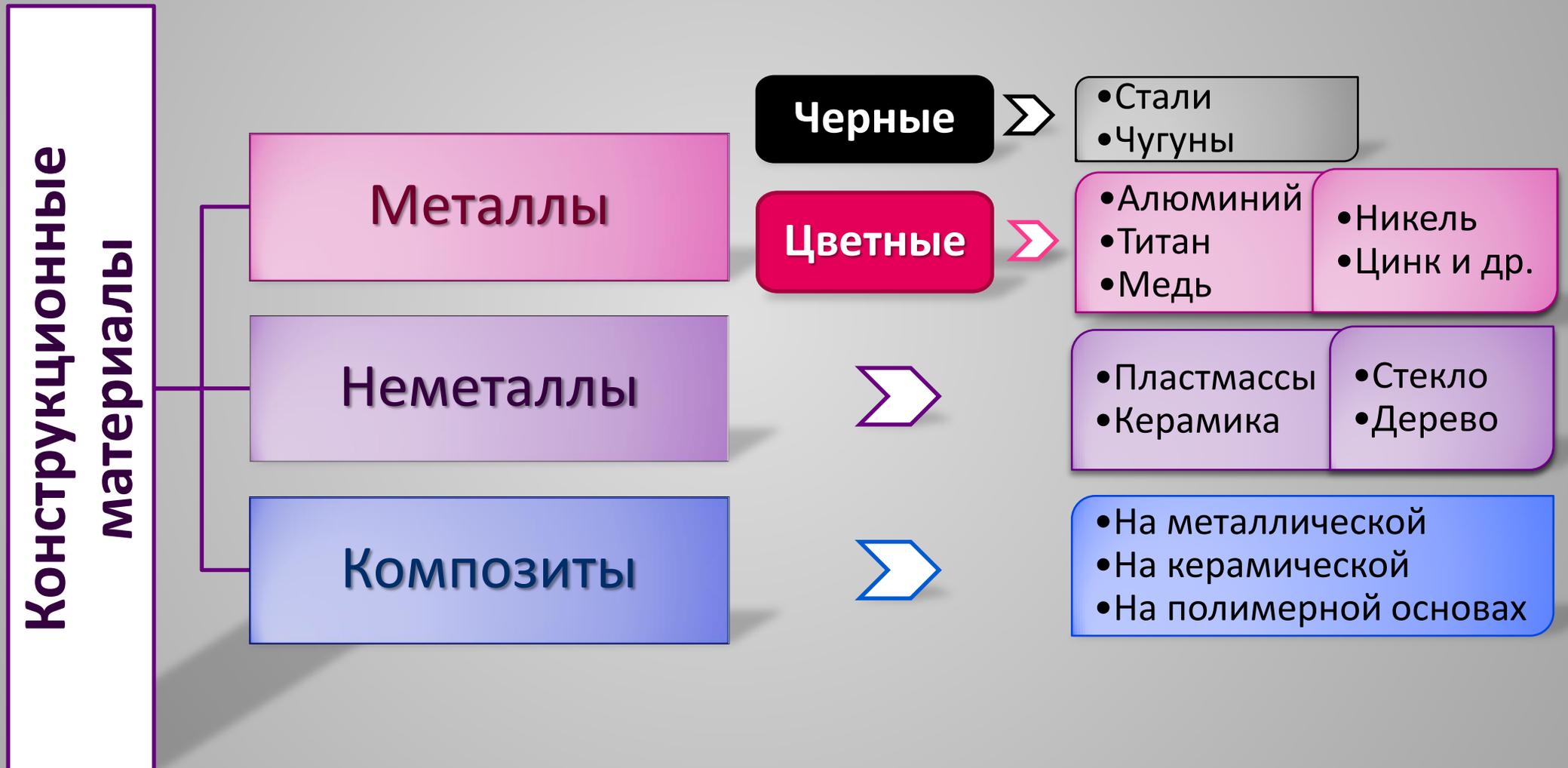


Умные материалы



Наноматериалы

# Классификация конструкционных материалов



# Классификация свойств материалов

- › Свойства определяют количественные и качественные особенности
- › **Физические** – поведение в магнитных, электрических, тепловых полях, а также под воздействием потоков частиц высокой энергии или радиации (**электро-, теплопроводность, коэфф. термического расширения**)
- › **Химические** – поведение в агрессивных средах (**коррозионная стойкость, окалиностойкость, каталитические свойства**)
- › **Механические** – способность сопротивляться деформации и разрушению или оценивать возможность разрушения (**прочность**)
- › **Технологические** – пригодность для изготовления деталей надлежащего качества с минимальными трудозатратами (**обрабатываемость, свариваемость**)
- › **Эксплуатационные** – способность выполнять функциональное назначение, обеспечивать работоспособность и силовые, скоростные и др. технико-эксплуатационные параметры (**износостойкость**)
- › **Биологические** – **аллергенная активность, токсичность, биосовместимость**

# Свойства материалов, определяющие их конструирование

Материал	Хорошие свойства	Удовлетворительные свойства
<b>МЕТАЛЛЫ</b>	Твердые ( $E \approx 100 \text{ ГН м}^{-2}$ )	Пр. текучести (чистый, $\sigma_T \approx 1 \text{ МН м}^{-2}$ ) сплав
Высокие $E, K_{Ic}$	Пластичные ( $\epsilon_f \approx 20\%$ )	Твердость ( $H \approx 3\sigma_T$ ) → сплав
Низкий $\sigma_T$	Вязкие ( $K_C > 50 \text{ МН м}^{-3/2}$ )	Усталость ( $\sigma_e = \frac{1}{2}\sigma_T$ )
	Высокая темп. плавления ( $T_m \approx 1000 \text{ С}$ )	Коррозионная стойкость → покрытия
<b>КЕРАМИКА</b>	Жесткие ( $E \approx 200 \text{ ГН м}^{-2}$ )	Очень низкая вязкость ( $K_C \approx 2 \text{ МН м}^{3/2}$ )
Высокие $E, \sigma_T$	Очень высокие твердость и	Пластичность → порошковые методы
Низкий $K_{Ic}$	Пр. текучести ( $\sigma_T > 3 \text{ ГН м}^{-2}$ ) Высокая темп. плавления ( $T_m \approx 2000 \text{ С}$ ) Коррозионностойкие, средней плотности	
<b>ПОЛИМЕРЫ</b>	Пластичные	Низкая жесткость ( $E \approx 2 \text{ ГН м}^{-2}$ )
Нормальные $\sigma_T, K_{Ic}$	Коррозионностойкие	Пр. текучести ( $\sigma_T = 2-100 \text{ МН м}^{-2}$ )
Низкий $E$	Низкой плотности	Низкая температура ( $T_G = 100 \text{ С}$ ) → ползучесть Вязкость, часто низкая ( $K_C \approx 1 \text{ МН м}^{-3/2}$ )
<b>КОМПОЗИТЫ</b>	Жесткие ( $E > 50 \text{ ГН м}^{-2}$ )	Пластичность
Высокие $E, \sigma_T, K_{Ic}$	Прочные ( $\sigma_T \approx 200 \text{ МН м}^{-2}$ )	Дорогие
Дорогие	Вязкие ( $K_C > 20 \text{ МН м}^{-3/2}$ ) Усталостная прочность, коррозионностойкие, низкая плотность	Ползучесть (полимер-матричные композиты)



# Керамические материалы

# Керамика и её строение

- › **Керамика** - порошковые материалы из минеральных веществ (твердых тугоплавких соединений типа оксидов, карбидов, нитридов, боридов), полученные при высокотемпературной обработке с последующим охлаждением (спекание, литьё)
- › **Кристаллическая фаза** – основа керамики, определяющая свойства, область применения. **Оксиды** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), **карбиды** ( $\text{TiC}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ), **бориды** ( $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ), **нитриды** ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiN}$ )
- › **Аморфная фаза** (стекловидная) - прослойка стекловидных веществ, которая облегчает процесс изготовления материала и изделий и служит связкой для частиц кристаллической фазы. Количество фазы **1-40%**. В некоторых видах керамики, полученных из чистых веществ, эта фаза может отсутствовать



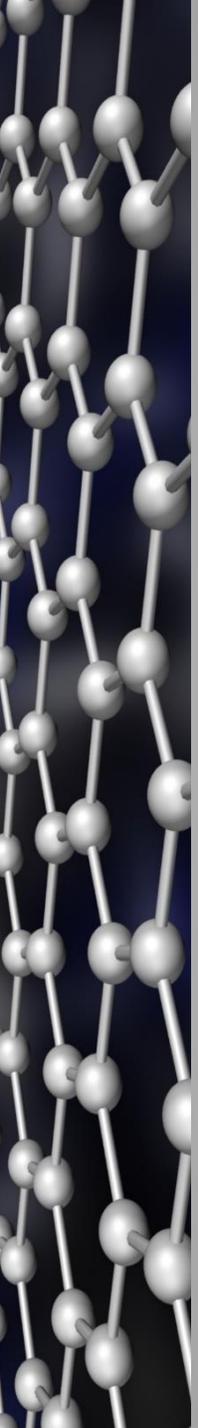
- › Наличие **газовой фазы** связано с особенностями получения изделий из порошков. Остается некоторая пористость, заполненная газами (**0 - 30–40 %**). Аморфная и газовая фазы **отрицательно** влияют на прочностные свойства материала, поэтому в технической керамике, работающей в нагруженном состоянии, количество этих фаз должно быть минимально (до **1 %**)
- › Для получения специальных керамик **аморфная** и **газовая** фазы могут регулироваться с целью достижения необходимых характеристик

- › Высокая температура плавления и рабочая температура
- › Высокая твердость и износостойкость, жаропрочность и теплостойкость
- › Хорошая коррозионная стойкость в различных средах
- › Низкие пластические свойства, повышенная хрупкость
- › Хорошие диэлектрические свойства
- › Небольшой удельный вес (**1,8–5,0 г/см<sup>3</sup>**)

- › Высокие **твердость** и **температура плавления** обусловлены большой силой ковалентных или ионных связей их кристаллических решеток. Высокое **сопротивление деформации** связано с сопротивлением кристаллической решетки движению дислокаций. Дополнительная упрочняющая обработка не требуется
- › **Недостаток** – низкие пластические свойства, прочность при растяжении. При нагружении керамика разрушается хрупко. С увеличением пор хрупкость увеличивается, прочность при растяжении уменьшается
- › Технология изготовления изделий из керамики должна предусматривать получение материала с минимальной пористостью. Для получения прочной технической керамики используются мелкозернистые порошки с размером частиц кристаллической фазы **1-3 мкм**, иногда **меньше 1 мкм**

# Типы керамики

- › **Оксидная керамика** на основе оксидов различных элементов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ )
- › **Ионная связь** определяет свойства оксидной керамики. Высокие твердость, огнеупорность, химическая стойкость в кислотах и щелочах, в окислительных средах, на воздухе. Температуры плавления **2000–3300 °C**, рабочие температуры **0,8–0,9  $T_{\text{пл}}$** . Хорошо работает на сжатие, но имеет большую хрупкость. Не выдерживает резких изменений температуры
- › **Корундовая керамика на основе глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$**  имеет хорошие диэлектрические свойства при нормальных и высоких температурах, химическую стойкость в газах, кислотах, расплавленных металлах
  - **Высокоглиноземистая керамика** содержит более **45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$**
  - **Корунд** содержит более **95%  $\text{Al}_2\text{O}_3$**
- › **Механические и диэлектрические** свойства такой керамики возрастают по мере увеличения содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- › **Поликор** - беспористая прозрачная керамика (за рубежом **люкалос** ), имеет высокий коэффициент пропускания света. Содержит **99,7-99,9 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$**

- 
- › **На основе кремнезема  $\text{SiO}_2$**  - хорошая коррозионная стойкость во многих средах, низкая теплопроводность и коэффициент термического расширения. Изделия быстро нагреваются и охлаждаются без растрескивания. **Химически- и термостойкая**
  - › **Безкислородная** - на основе тугоплавких соединений, не содержащих кислород: **нитриды** ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ ), **бориды** ( $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ). Эти химические соединения имеют ковалентные связи. Высокая твердость и износостойкость; низкий коэффициент термического расширения, хорошая теплопроводность; стабильность механических свойств в широком диапазоне температур  
**Недостаток** – большая хрупкость. **Нагревательные элементы** электрических печей сопротивления, работающих при высоких температурах на воздухе без специальной защитной атмосферы
  - › **На основе карбида кремния  $\text{SiC}$  (карборунда)** - высокие твердость, жаростойкость, износостойкость, химическая и коррозионная стойкость, низкий коэффициент термического расширения. Плотность  **$3,2 \text{ г/см}^3$** . **Нагреватели электрических печей, чехлы термопар, лопатки газовых турбин, шлифовальные круги**

# Специальные типы керамики

- › **На основе нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )** - высокие твердость, износостойкость. Плотность  $3,2 \text{ г/см}^3$ , рабочая температура  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ . **Детали газовых турбин, коррозионно- и жаростойкие инструменты, тигли, кристаллизаторы, детали насосов и трубопроводов.** Заменяет жаропрочные сплавы, содержащие дефицитные вольфрам, молибден, кобальт, никель
- › **Циркониевая керамика** - общее название группы материалов, которые получается методом горячего спекания порошковых материалов. Основной элемент, присутствующий в большинстве таких сплавов - **диоксид циркония**. По названию этого химического элемента получила свое название вся группа материалов
- › **Карбидная керамика**
  - Карбид кремния ( $\text{SiSiC}$  или  $\text{SiC}$ ) относится к категории **неоксидной** керамики и представляет собой **керамический** материал, обладающий твердостью алмаза и многими другими важными свойствами
  - Карбид бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). **Шлифовальные и абразивные материалы, химическая посуда, защитные пластины для бронежилетов, электроника, ядерная промышленность** (карбид бора, обогащенный изотопом  $^{10}\text{B}$  как поглотитель нейтронов)

Машиностроительная керамика	Состав	Применение
Плотная алюмооксидная керамика Карбид, нитрид кремния Сиалоны Кубический диоксид циркония, фианит	$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ SiC}$ $\text{Si}_3\text{N}_4$ н-р, $\text{Si}_2\text{AlON}_3$ $\text{ZrO}_2 + 5 \text{ вес.}\% \text{ MgO}$	Режущий инструмент, бойки; износостойкая поверхность, подшипники; мед. импланты; детали двигателей и турбин; армирование

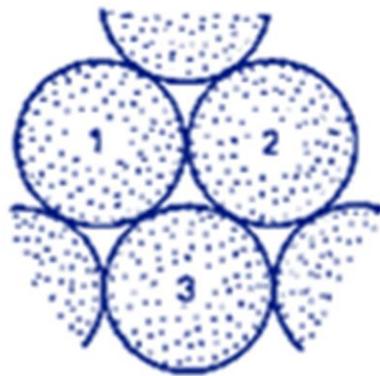
# Керамико-металлические материалы

- › Керамические материалы **очень хрупкие**
- › Для уменьшения хрупкости вводят некоторое количество металла. Изготавливают методом порошковой металлургии и называются **керамико-металлическими** материалами или **керметами**
- › Металл в керметах - связка между частицами керамической составляющей, обеспечивающая некоторую пластичность
- › Добавка **5% никеля** к  $Al_2O_3$  увеличивает **прочность при изгибе** со **150** до **230 МПа**
- › Керметы изготавливают как на основе оксидных, так и бескислородных материалов. В качестве связки используется **никель, кобальт, железо, молибден**
- › Чем выше содержание металлической связки, тем выше пластичность и прочность кермета при изгибе, но ниже твердость и износостойкость
- › Твердый сплав **WC-Co** или **БВТС TiC-Ni(Mo)** – яркий представитель керметов

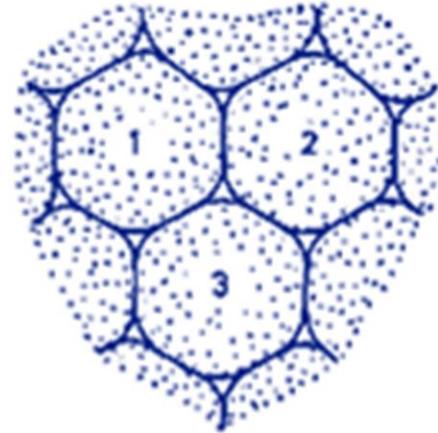
# Консолидация порошковых материалов

- › **Порошковая металлургия** позволяет получать материалы и изделия, которые невозможно изготовить другими методами. Это - тугоплавкие материалы, композиции из металлов с неметаллами, пористые материалы и изделия
- › **Формование** - придание заготовкам из порошка форм, размеров, плотности и механической прочности, необходимых для последующего изготовления изделий
  - **Прессование** в закрытых **пресс-формах**
  - **Изостатическое прессование** порошка в эластичной оболочке под действием всестороннего сжатия
    - › Гидростатическое
    - › Газостатическое
  - **Высокоскоростное прессование** (деформирование)
    - › Взрывное
    - › Гидродинамическое
- › **Спекание** - термическая обработка порошка, смеси порошков или формовок при температуре ниже плавления хотя бы одного из компонентов. Придает комплекс механических и физико-химических свойств
  - **Твердофазное спекание** без образования жидкой фазы, сопровождается ростом межчастичных контактов за счет протекания молекулярно-кинетических процессов в спекаемом теле. Температура спекания 0.6-0.9 температуры плавления наиболее легкоплавкой компоненты
  - **Жидкофазное спекание** монокомпонентных систем с образованием жидкой фазы

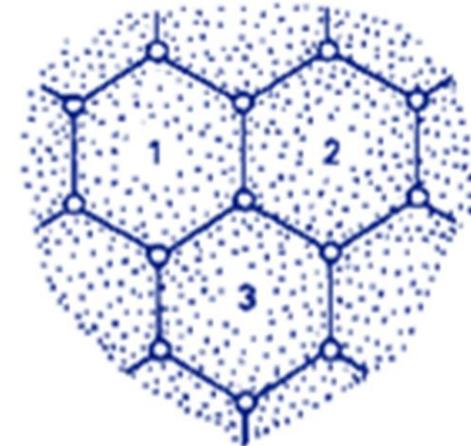
# Формирование и сборка керамики



(a)



(b)

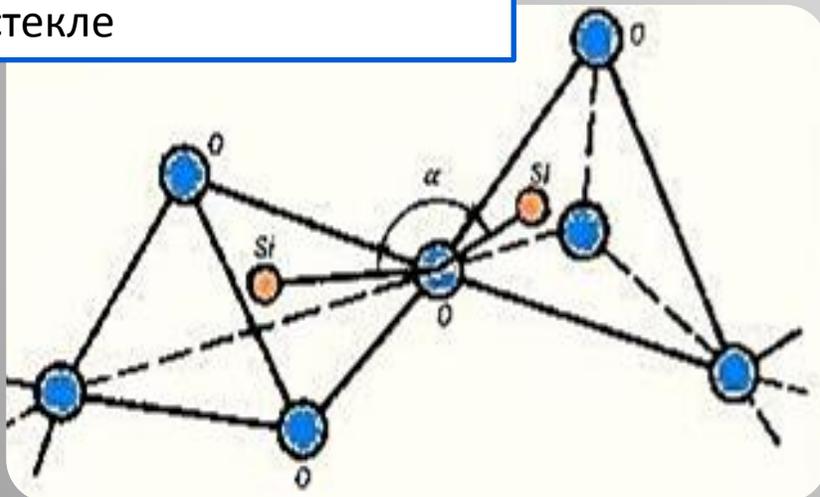


(c)

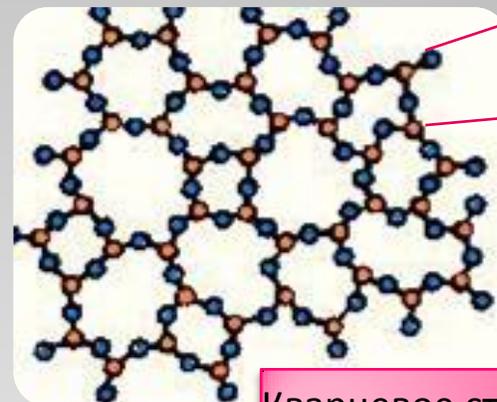
Частицы порошка спрессованные на (a) агломерате, как показано на (b), уменьшают площадь поверхности (и, следовательно, энергию) пор; конечная структура обычно содержит небольшие, почти сферические поры (c)

- › **Стекло** - вещество и материал, один из самых древних и универсальных в практике человека. Структурно-аморфно, изотропно
- › Все виды стёкол при формировании преобразуются в агрегатном состоянии (от жидкого чрезвычайной вязкости до стеклообразного) в процессе остывания со скоростью, достаточной для предотвращения кристаллизации расплавов, получаемых плавлением сырья (шихты)

Расположение тетраэдров в кварцевом стекле



Пространственные сетки



Кварцевое стекло



Щелочное стекло

- › **Химический состав** зависит от
  - требований, предъявляемых к свойствам стеклоизделий
  - условий эксплуатации
  - способа выработки
- › **Кремнезем ( $\text{SiO}_2$ )** - стеклообразующая часть стекол. Вводят в состав с **песком** или **кварцем**
- › **Кварцевое стекло** - продукт плавления чистого оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). В отличие от обычного стекла, кварцевое находится в аморфном состоянии, т.е. не имеет точной температуры плавления и при нагревании из твердого состояния в жидкое переходит постепенно

# Стекло и керамика

Стекло	Состав (вес.%)	Применение
Силикатное стекло	70 SiO <sub>2</sub> , 10 CaO, 15 Na <sub>2</sub> O	Окна, стеклотара; легко формуется и меняет форму
Боросиликатное стекло	80 SiO <sub>2</sub> , 15 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5 Na <sub>2</sub> O	Пирекс; кухонная и химич. посуда; жаропрочность, низкий коэфф. расширения, хорошая термостойкость

Стекловидная керамика	Состав	Применение
Фарфор Фарфоровая посуда Керамич. изделия Кирпич	Состоит из глин: гидратированный алюмосиликат Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> смешанный с др. инертными минеральными добавками	Электроизоляторы Художественная керамика и посуда Строительство; огнеупоры

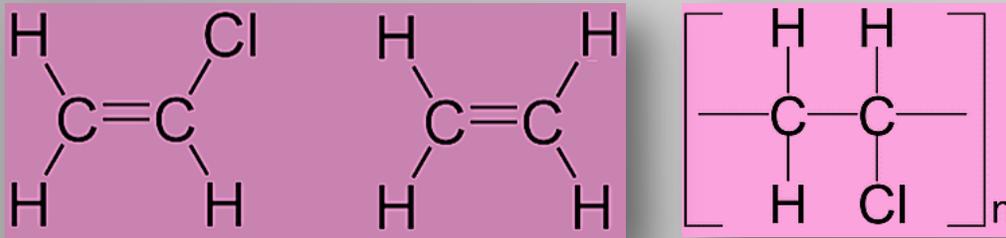
- › **Ситаллы** - стеклокристаллические материалы, полученные объёмной кристаллизацией стёкол и состоящие из одной или нескольких кристаллических фаз, равномерно распределённых в стекловидной фазе (содержание фаз **30-95%**, размеры порядка **1 мкм**)
- › **Радиационно-стойкие** оптические стекла сохраняют высокую пропускающую способность в видимой области спектра в условиях их облучения ионизирующим излучением (до **50% PbO**)
- › **Полимерное стекло** - монолитный поликарбонат, новейшая разработка ученых. **Полимер**, использующийся для его изготовления, обладает теми же характеристиками прозрачности, что и исходный материал, но также имеет набор собственных качеств значительно возвышающих его над простым стеклом



# Полимерные материалы

# Полимеры

- › **Полимеры** - основа неметаллических материалов, высокомолекулярные химические соединения с большой молекулярной массой ( $\sim 10^3$ ). Состоят из многочисленных низкомолекулярных звеньев (**мономеров**) одинакового строения. В мономерах отдельные атомы соединены прочными ковалентными связями. Между макромолекулами полимеров действуют более слабые связи
- › Синтетические полимеры производят из мономеров: **этилен, винилхлорид, винилацетат, пропилен, стирол, фенол, мочевина, меламин и формальдегид**
- › **Способы образования**
  - **Полимеризация** – соединение низкомолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных цепей. Например, мономеры **этилена**  $C_2H_4$  или винилхлорида  $C_2H_3Cl$  после разрыва двойных ковалентных связей образуют полимерные цепи из мономерных звеньев – **полиэтилен** и **поливинилхлорид**. Получают **полипропилен, полистирол, полибутадиен**



Винилхлорид ♦ Этилен ♦ Поливинилхлорид

- **Поликонденсация** – ступенчатая реакция соединения большого количества одинаковых или разных мономеров в **макромолекулы** (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлористый водород, диоксид углерода, метиловый спирт). Получают **полиамиды, полиэстеры, фенопласты, аминопласты, поликарбонаты, силиконы**

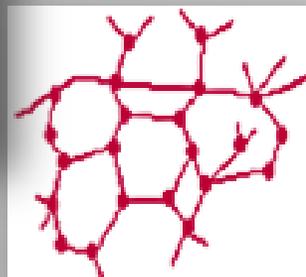
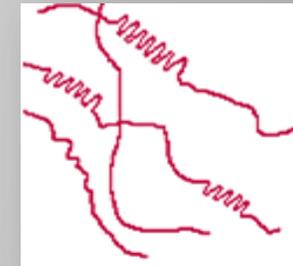
- **Полиприсоединение** – множественное присоединение мономеров, содержащих предельные группы к мономерам с непредельными группами (двойные связи, активные циклы). Такие реакции протекают без выделения побочных продуктов. Получение **полиуретанов, отверждение эпоксидных смол**

## Состав

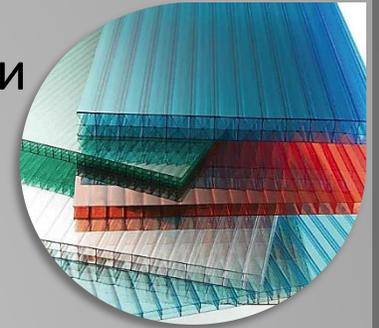
- › **Органические** (обширная группа) состоят из атомов **углерода, водорода, кислорода, азота, серы и галогенов**
- › **Элементоорганические** (синтетические) состоят из атомов **кремния, титана, алюминия** дополнительно к основным цепям соединений. Например, основные цепи кремнийорганических соединений состоят из атомов **кремния и кислорода**
- › **Неорганические** состоят из оксидов **кремния, алюминия, магния**. Не содержат атомов углерода (силикатное стекло, керамика, слюда, асбест)

## Структура

- › **Линейная** - длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки (полиэтилен). Цепочки гибкие, что обуславливает высокую эластичность полимеров и отсутствие хрупкости в твердом состоянии
  - › **Разветвленная** - боковые ответвления (полипропилен, полиизобутилен)



- › **Лестничная** - состоят из двух цепей, соединенных химическими связями (кремнийорганические)
  - › **Сетчатая** - образуется с различной плотностью сетки, при соединении макромолекул полимеров между собой в поперечном направлении. Обладают большой жесткостью и теплостойкостью и являются основой конструкционных неметаллических материалов



- › **Кристаллическое состояние** - наличие **дальнего порядка** в расположении макромолекул. Монокристаллы полимеров состоят из элементарных ячеек. Из них образуются более сложные структуры – **ленты**. Из лент строятся плоскости – основной структурный элемент кристаллического полимера
- › Когда образование правильных кристаллов затруднено, формируется **сферолитная структура**. Сферолиты состоят из **лепестков**, образованных последовательным чередованием кристаллических и аморфных участков
- › **Аморфное состояние** - наличие **ближнего порядка** в расположении молекул. Аморфные полимеры по строению подобны жидкостям с большим коэфф. вязкости. Кристаллическая фаза **повышает** механические характеристики полимера (**твёрдость, прочность, модуль упругости**), но **снижает** гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость и делает полимер более пластичным

Отношение объема кристаллической фазы к общему объему называют **степенью кристалличности**

› Для получения материалов с **заданными свойствами** в технике часто используют не сами полимеры, а их сочетания с другими материалами органического или неорганического происхождения (металлопласты, пластмассы, полимербетоны, стеклопластики)

- › **Пластмассы** (пластики) - искусственные материалы на основе органических полимерных связующих веществ. **Достоинства:** малая плотность, химическая стойкость, электро- и теплоизоляционные свойства, высокая технологичность. **Недостатки:** ограниченная теплостойкость, малая жесткость, вязкость, склонность к старению.
- › **Однородные** (не наполненные) - без наполнителя (полиэтилен, поливинилхлорид). **Пленки**
- › **Неоднородные** (композиционные) с
  - твердым
  - жидким
  - газообразным наполнителями
- › Твердые (древесные шпоны, стружка, опилки, мука) используют для экономии дефицитной, дорогостоящей смолы
- › Жидкие и газообразные уменьшают плотность пластмасс. **Теплозвукоизоляционные материалы (пенопласты)**

# Приготовление пластмассы

- › **Связующие вещества** – основная часть пластмасс. Это природные, искусственные или синтетические полимеры, определяющие формование и затвердевание пластмасс. Определяют физико-механические и химические свойства
- › **Наполнители** – порошкообразные, волокнистые, слоистые неорганические или органические материалы, которые повышают прочность и жесткость пластмасс, тепло- и водостойкость, электроизоляционные свойства.  
**Мел, тальк, каолин, кварцевый песок, волокна хлопка, асбест, ткань, бумага**
- › **Пластификаторы** (мягчители) – маслообразные органические вещества. Вводятся для увеличения эластичности, гибкости, морозостойкости пластмасс
- › **Красители** – для окрашивания (**пигменты, органические красители**, стойкие к воздействию высоких температур при обработке пластмасс)
- › **Стабилизаторы** – для замедления процесса старения пластмасс



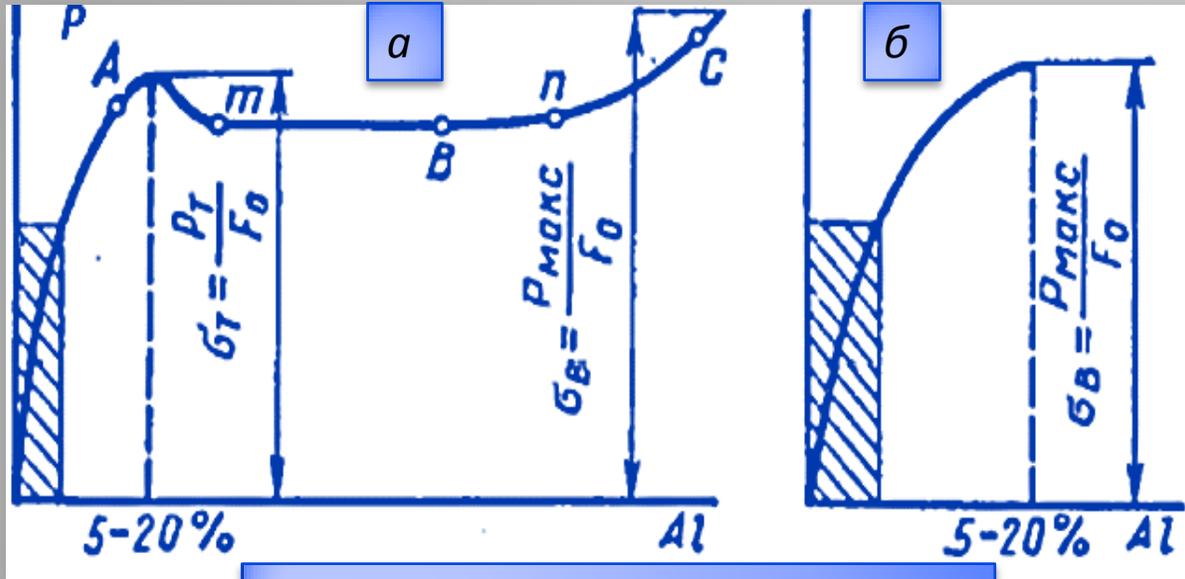
# Классификация пластмасс

- › **Пластмассы** классифицируют по
  - химическому составу
  - жирности
  - жесткости
- › **Поведение при нагревании** - главный критерий, который объясняет природу полимера
  - термопласты
  - реактопласты
  - эластомеры
- › **Термопласты** способны обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное или вязкотекучее состояние. При обычной температуре находятся в твёрдом состоянии
- › **Реактопласты** (термореактивные пластмассы). Их переработка в изделия сопровождается **необратимой химической реакцией**, приводящей к образованию неплавкого и нерастворимого материала. Наиболее распространены реактопласты на основе **феноло-формальдегидных, полиэфирных, эпоксидных и карбамидных смол**. Содержат обычно большие количества наполнителя - **стекловолокна, сажи, мела**
- › **Эластомеры** - любой упругий материал, который может растягиваться. Обладают высокоэластичными свойствами и вязкостью



# Механические свойства

- Деформация полимера – сумма **упругой, высокоэластичной и вязкотекучей** деформаций. Соотношение между составляющими общей деформации зависит от структуры материала, температуры и условий деформирования



Диаграммы растяжения пластмасс

*a* - **вязкие** аморфные и кристаллические термопласты;  
*б* - **хрупкие** термопласты, реактопласты, вязкие термопласты с ориентированной структурой. **A, B, C** – точки разрушения полимеров с разной молекулярной массой:  $M_A < M_B < M_C$

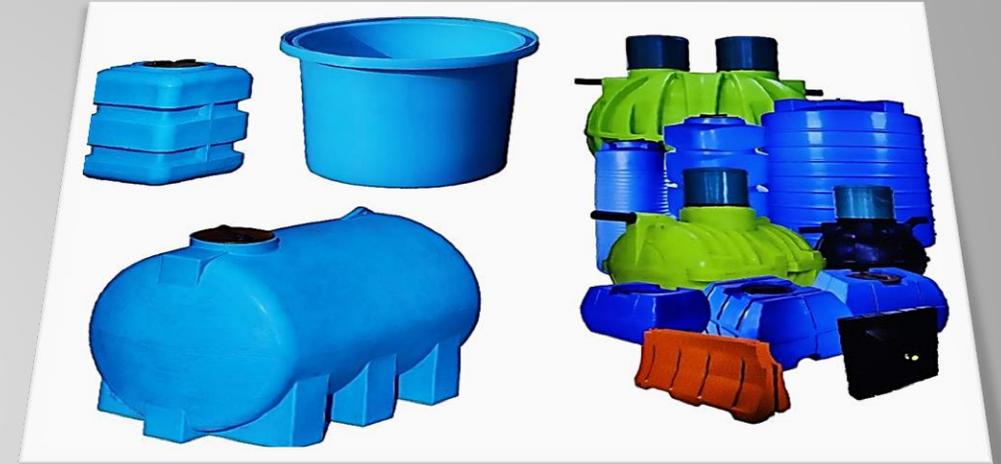
**Высокоэластичная** деформация возникает при вытягивании макромолекул под воздействием напряжений. При растяжении образца появляется шейка. Пластическое течение представляет постепенное развитие шейки по всему образцу (участок *ш*). Механические нагрузки допустимы только в области упругой деформации (заштрихованные области)

- Пластическая деформация кристаллических термопластов сопровождается **рекристаллизацией**, которая состоит из **3** этапов
  - разрушение кристаллов** под действием напряжения
  - вытягивание молекул** вдоль направления растяжения на участке с разрушенными кристаллами
  - образование новых, ориентированных кристаллов** между параллельно ориентированными молекулами. Они фиксируют высокоэластичную деформацию, которая сохраняется после снятия нагрузки

# Формообразование пластмассовых изделий

› Переработка пластмасс в **изделия** осуществляется

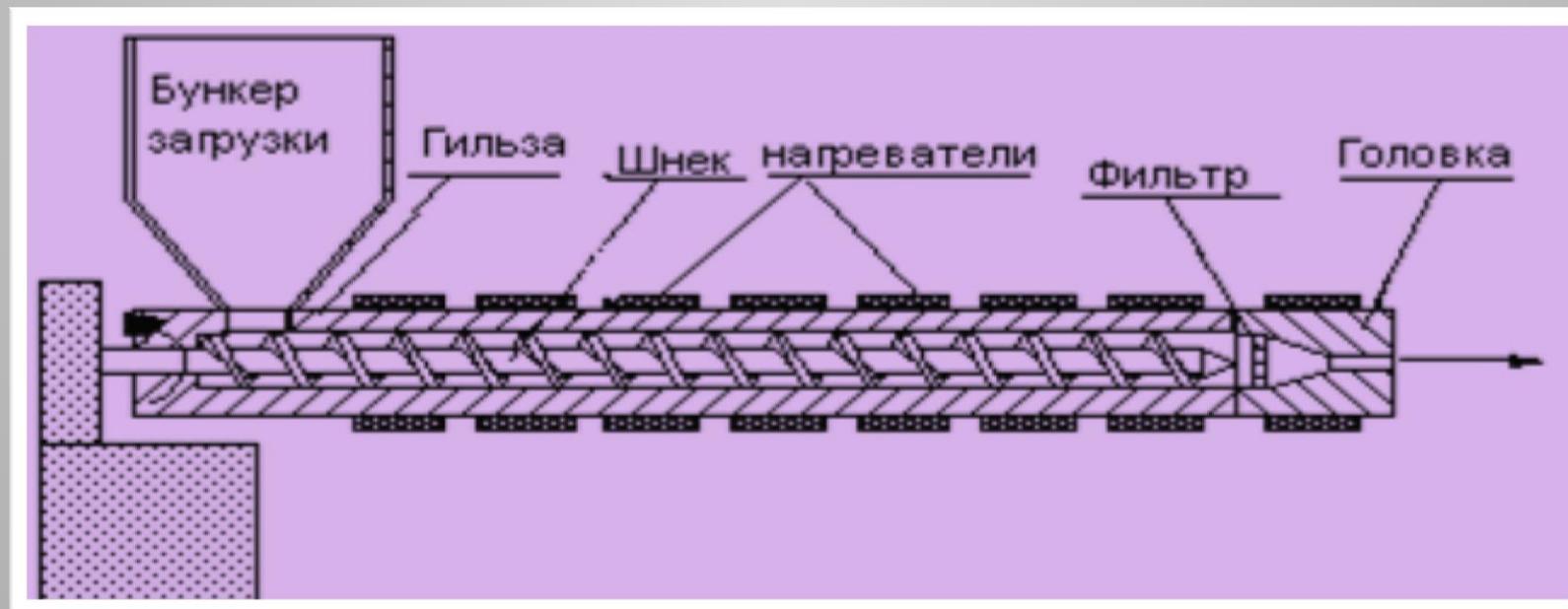
- литьем под давлением
- экструзией
- формованием
  - › в пресс-формах
  - › в штампах
- вакуумным и пневматическим формованием
- сваркой
- склейкой
- механической обработкой



- › Способ зависит от вида пластмасс (термореактивные или термопластичные), конфигурации и геометрических размеров изделия, вязкости, текучести пластмассы
- › **Литье под давлением** — метод формования изделий нагреванием материала до вязкотекучего состояния и передавливанием его в закрытую **литьевую форму**, где материал приобретает конфигурацию внутренней полости формы и затвердевает. Получают изделия массой от нескольких **граммов** до нескольких **килограммов** с толщиной стенок **1-20 мм** (чаще **3-6 мм**). Применяют **плунжерные** или **шнековые литьевые машины** на которых устанавливаются литьевые формы различной конструкции

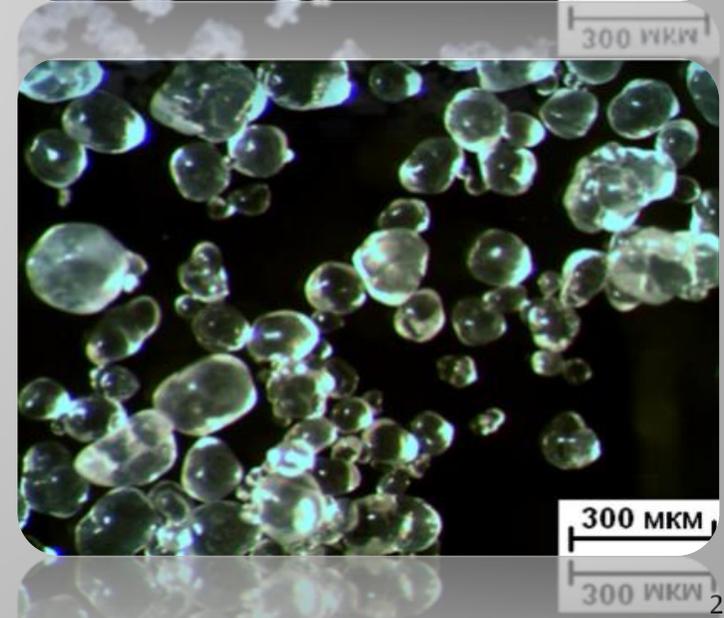
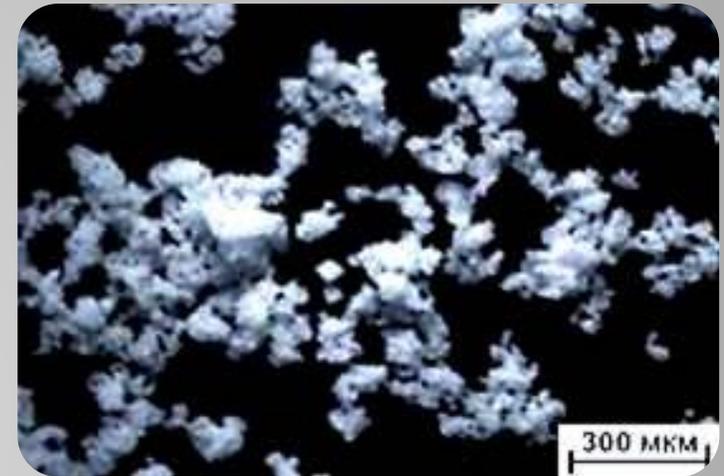
# Получение изделий экструзией

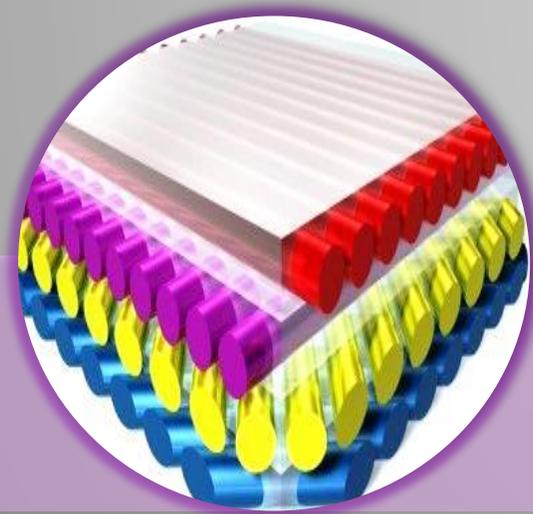
- › **Экструзия** – способ получения изделий или полуфабрикатов из полимерных материалов неограниченной длины путем выдавливания расплава полимера через формующую головку (фильеру) нужного профиля
- › Наряду с литьем пластмасс под давлением, - один из самых популярных методов изготовления пластмассовых изделий. Экструзии подвергаются практически все основные типы полимерных материалов, как термопласты, так и реактопласты и эластомеры



# Перспективные разработки в области полимерных материалов

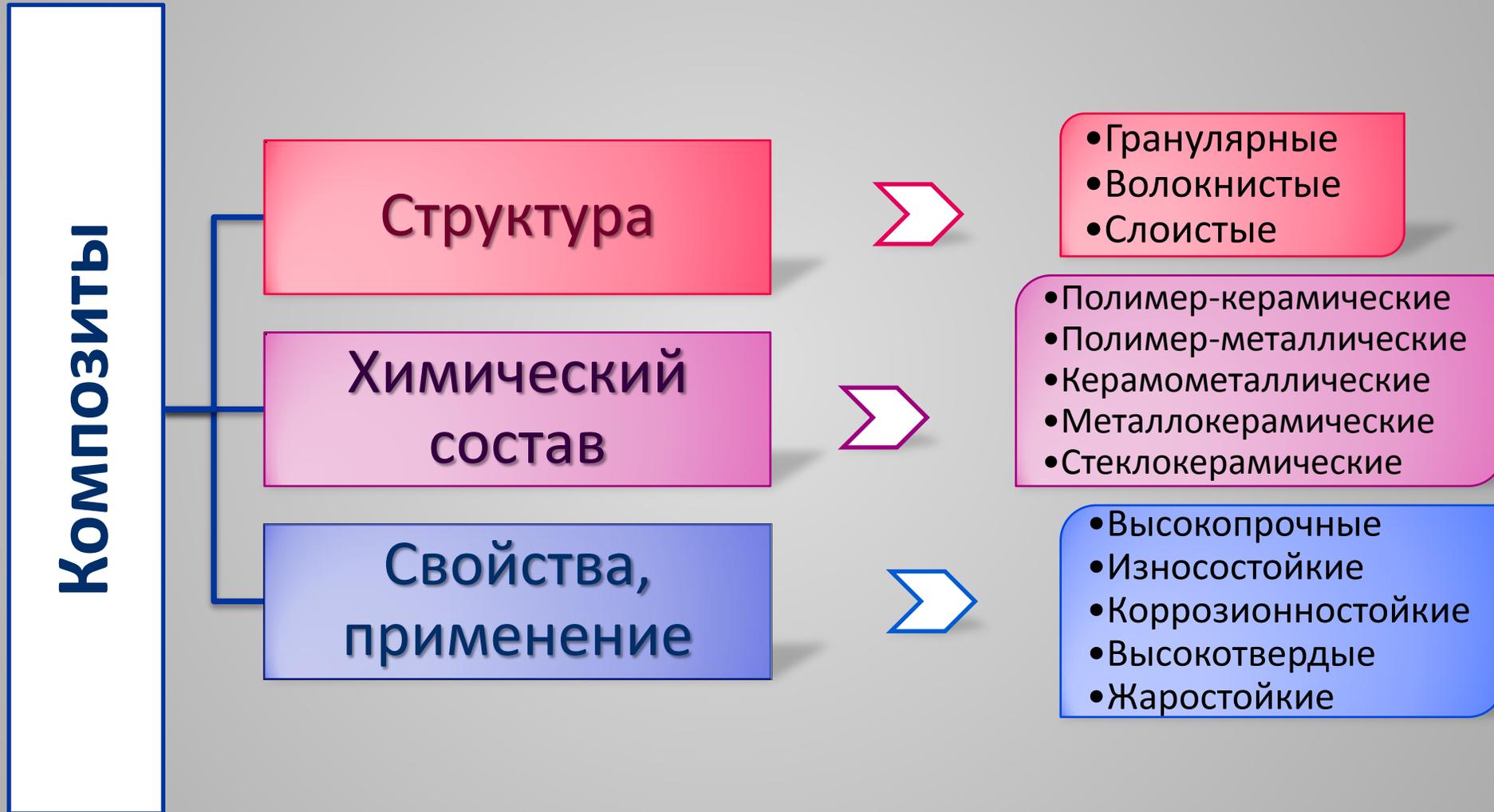
- › **Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)** обладает высокой **прочностью**, низким коэффициентом **трения**, высокой **износо- и химической стойкостью** в агрессивных средах. **Узлы трения машин и механизмов, ортопедические имплантаты**
- › Молекула СВМПЭ состоит из длинных линейных цепочек полиэтилена (молекулярная масса **3,5-7,5 млн. а.е.м.**) с относительно слабыми межмолекулярными связями (**10-20 кДж/моль**), в отличие от кевлара, с его короткими молекулами и сильными межмолекулярными связями
- › Уровень **параллельности ориентации** молекул превышает **95%**, а **степень кристалличности** достигает **85%**
- › Из-за большой длины **полимерных цепей** показатель **текучести** расплава СВМПЭ близок к нулю (**0,06 г/10 мин**), что ограничивает его переработку методами, традиционными для термопластичных полимеров (шнековая экструзия, литье под давлением, послойная экструзионная печать)

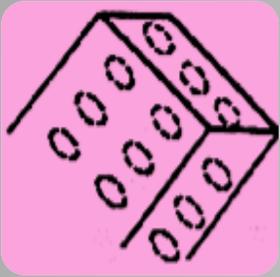




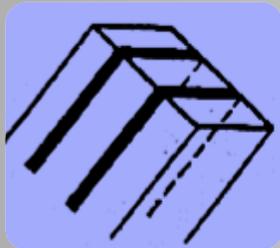
# Композиционные материалы

- › Относятся к **новому** классу легких высокопрочных материалов с высокой трещиностойкостью. Комплекс свойств композитов определяется заранее и реализуется в процессе изготовления. Этими свойствами не обладают отдельные компоненты. Для оптимизации свойств выбирают компоненты с резко отличающимися (по модулям упругости), но дополняющими друг друга свойствами
- › **Матрица** – пластичная основа, обеспечивающая монолитность материала в целом (полмерные, углеродные, керамические и металлические материалы)
- › **Наполнители** (упрочнители) – для **упрочнения** (армирующие компоненты). Обладают высокими **прочностью, твердостью и модулем упругости**
- › Чем выше эти характеристики у наполнителей, тем выше соответствующие свойства композита, хотя они и не достигают характеристик наполнителя
- › По типу упрочняющих наполнителей композиционные материалы делят на **дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые**





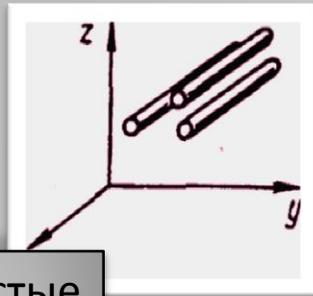
- › **Дисперсноупрочненные** содержат мелкие, равномерно распределенные тугоплавкие частицы **карбидов, оксидов, нитридов**, которые не взаимодействуют с матрицей и не растворяются в ней вплоть до темп. плавления. Дисперсные частицы упрочняют материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении. Чем мельче частицы и расстояние между ними, тем прочнее материал. Сопротивление движению дислокаций сохраняется вплоть до темп. плавления матрицы. Высокие **жаропрочность** и **сопротивление ползучести**



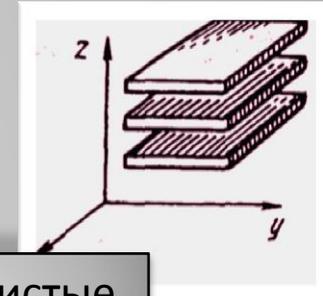
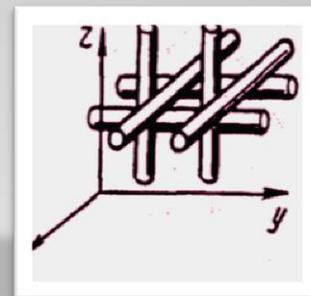
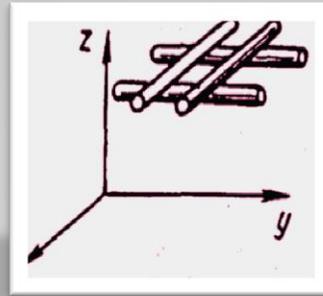
- › **Слоистые** содержат чередующиеся слои наполнителя и материала матрицы («сэндвич»). Слои могут быть различно ориентированы. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из материалов с разными механическими свойствами. Для слоистых композитов обычно используют неметаллические материалы
- › Для расширения комплекса свойств или усиления какого-либо свойства, композиционный материал одновременно армируют наполнителями различной формы и размеров. Для повышения модуля упругости композитов с полимерной матрицей, армированных стеклянными волокнами, вводят волокна **бора**
- › **Полиармированные** - с различными наполнителями
- › **Полиматричные** - с матрицей из чередующихся слоев различного химического состава



- › **Волокнистые** содержат волокна: нити, ленты, сетки различного плетения. **Армирование** волокнистых композитов осуществляется по **одно-, двух- и трехосной** схеме



Волокнистые



Слоистые

- › Прочные и твердые волокна окружены металлич. или пластмассовой матрицей. В качестве волокон используют прочную металлическую проволоку, металлические или керамические нитевидные кристаллы с низкой плотностью дислокаций, стеклянные и керамические нити из бора, углерода. Волокна воспринимают нагрузку, матрица распределяет ее между волокнами, защищает их поверхность и повышает энергию распространения трещины, предупреждая хрупкое разрушение. Такое упрочнение противоположно методам упрочнения металлов, когда металлич. матрица упрочняется за счет выделений второй фазы
- › В композитах твердость матрицы повышать не требуется благодаря наличию прочных волокон. Такое армирование повышает прочность, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо

# Виды армирующих материалов

- › **Углеродные волокна (УВ)** получают высокотемпературной обработкой синтетических органических волокон в инертной среде. УВ получают в виде **нитей, жгутов, лент** или **тканого полотна**. Для производства УВ используют **вискозу**. При нагреве синтетическое волокно разлагается с образованием лентообразных слоев углерода с гексагональной структурой
- › При **450°С** и выше на воздухе УВ окисляются, в восстановительной и нейтральной атмосфере сохраняют свои механические свойства до **2200°С**. **Достоинства:** высокая тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость, стойкость к тепловым ударам. **Недостатки:** плохая смачиваемость расплавленными материалами. Для ее улучшения на поверхность волокон наносят переходные покрытия. УВ для Al матрицы покрывают **боридами титана и циркония**
- › **Борные волокна (БВ)** получают разложением хлорида бора в среде водорода с последующим осаждением бора из газовой фазы на горячую вольфрамовую нить диаметром **12 мкм**. При длительном нагреве, после взаимодействия бора с вольфрамом, сердцевина БВ состоит из **боридов вольфрама** различного состава, в основном **WB<sub>4</sub>**. Низкая плотность и высокие прочность и жесткость. При **400 °С** и выше БВ окисляются, выше **500°С** вступают в химич. взаимодействие с Al матрицей. Для повышения жаростойкости и предохранения от этого взаимодействия, на БВ наносят покрытия из **карбида кремния, карбида** или **нитрида бора** толщиной **3–5 мкм**
- › **Стекловолокно** получают продавливанием стекломассы через фильеры или вытягиванием из расплава. Высокая прочность, теплостойкость, коррозионная стойкость, но низкая теплопроводность
  - **Непрерывное:** диаметр **3–100 мкм**, длина до **20 км**. Сечение квадратное, прямоугольное и шестиугольное повышает прочность и жесткость композитов благодаря плотной упаковке в матрице. **Высокопрочные композиционные материалы на неметаллической основе**
  - **Штапельное:** диаметр **0,5–20 мкм**, длина **0,01–0,5 м**. **Конструкционные материалы с однородными свойствами, тепло- и звукоизоляционных материалы**

- › **Металлическая проволока** - наиболее дешевый и технологичный упрочняющий наполнитель из коррозионно-стойких сталей. Высокое упрочнение проволоки дает пластическая деформация при волочении, за счет явления наклепа. Высокая температура рекристаллизации легированных сталей обеспечивает проволоке из аустенитной стали сохранение прочности при высокой температуре. Для композитов с Al матрицей, армированной стальной проволокой, температура - не выше **550°С**, иначе в материале начинается активное взаимодействие компонентов
- › **Проволока из тугоплавких металлов (Mo, W, Ta)** - для армирования жаропрочных матриц. Высокая жаропрочность (**1200–1500°С**). Высокая удельная прочность у низкоплотной **бериллиевой** проволоки. Ее получают прессованием из литой или порошковой заготовки, заключенной в никелевую оболочку. Деформированная **бериллиевая** проволока имеет высокую температуру рекристаллизации (**700°С**). **Армирование матриц с малой плотностью (Al, Mg, Ti)**
- › **Нитевидные монокристаллы («усы»)** имеют наибольшую жесткость и прочность из всех армирующих материалов. Малая плотность дислокаций. Скручивание усов в процессе образования монокристаллов **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** и **SiO<sub>2</sub>** вызвано наличием в них единственной винтовой дислокации, расположенной вдоль оси роста кристаллов

## Композиционные материалы с металлической матрицей

- › Получение осуществляется:
  - прессованием волокон в порошке
  - пропиткой волокон жидким металлом
  - предварительным осаждением материала матрицы на волокна с последующим прессованием и спеканием
  - горячим формованием
  - спеканием
- › **Основная проблема** - достижение равномерного смешивания волокон и матрицы
- › Металлическая матрица в **жидком** состоянии должна хорошо смачивать волокна наполнителя, т.к. низкая их смачиваемость при пропитке приводит к порообразованию в композите. Пропитка волокон - как за счет капиллярных сил, поднимающих жидкую матрицу по капиллярам между волокнами, так и при заливке сверху
- › **Преимущество:** высокие тепло- и влагостойкость, более высокие характеристики в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон (модуль упругости, прочность, пластичность и вязкость разрушения)
- › Целесообразно применять **Al, Mg, Ti** металлы и сплавы с невысокой плотностью. Для матриц жаропрочных сплавов широко используют **никель**. Например, Al композит **КАС-1** армированный стальной проволокой имеет низкую стоимость упрочнителя и лучшие значения тепло- и электропроводности

**Композиционные материалы с неметаллической матрицей:** полимерные, углеродные и керамические

- › **Полимерные** – гетерофазные композиционные материалы с непрерывной полимерной фазой (матрицей), в которой хаотически или в определенном порядке распределены **твердые, жидкие** или **газообразные** наполнители
- › Эти вещества заполняют часть объема матрицы, сокращая расход дефицитного или дорогостоящего сырья и/или модифицируют композицию, придавая ей нужные качества, обусловленные назначением, особенностями технологических процессов производства и переработки, условиями эксплуатации изделий
- › К ним относятся подавляющее большинство **пластмасс, резин, лакокрасочных материалов, полимерных компаундов, клеев**
- › Получают заливкой жидкого полимера в приготовленную форму с уложенным волокнистым наполнителем. Быстрое твердение и низкий коэфф. диффузии дает отсутствие переходного слоя между компонентами. **Преимущества:** технологичность, низкая плотность, высокие удельная прочность и жесткость, коррозионная стойкость. **Недостатки:** потеря прочности при нагреве выше **100–200°С**, низкая электропроводность

# Типы матриц КМ

- › **Стеклопластик** - конструкционный материал. **Корпуса машин, защитные кожухи, вентиляционные трубы, контейнеры, электро- и радиомонтажные платы**
- › **Фибerglass** – стекловолокно для спортивного инвентаря (шесты для прыжков). **Судо- и автомобилестроение (кузова гоночных машин, гребные винты), детали для авиационной техники, аппаратура химич. промышленности**
- › **Карбоволокнит** – **элементы тепловой защиты, авиационные тормозные диски, химически стойкая аппаратура**
- › **Бороволокнит** – авиа- и космическая техника (**турбинные лопатки компрессоров, лопасти вертолетных винтов тяжело нагруженные несущие валы**)

## Тип матрицы

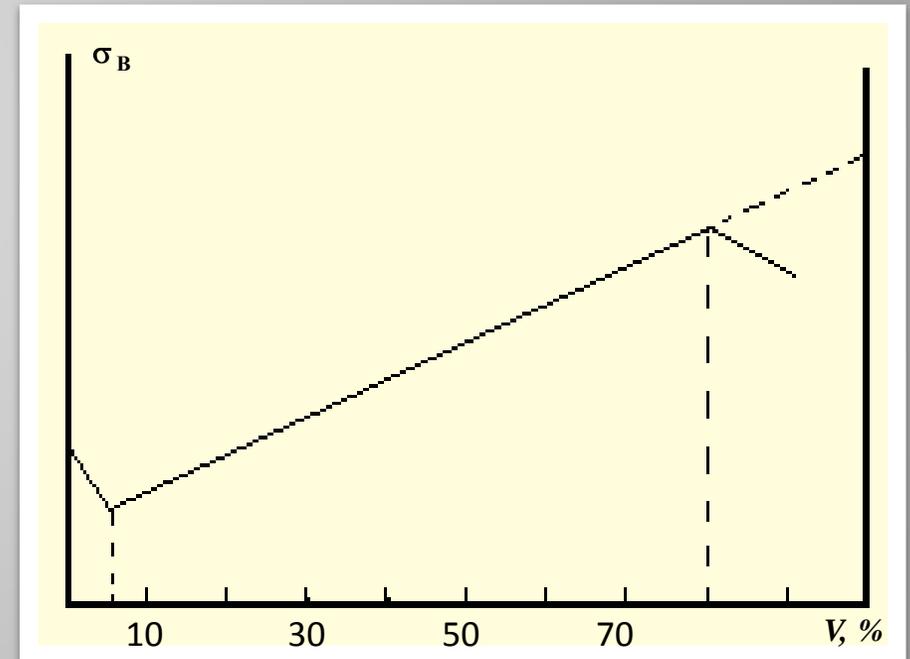
- › **Наполненные** реактопласты, термопласты (полиэтилен, поливинилхлорид, капрон), синтетические смолы (полиэфирные, эпоксифенольные) и каучуки

## Тип наполнителя

- › **Дисперсно-наполненные пластики** (с дисперсными частицами разной формы, измельченное волокно), армированные (с упрочняющим наполнителем непрерывной волокнистой структуры), газонаполненные пластмассы, масло-наполненные каучуки
  - асбопластики (наполнитель-асбест), графито-пласты (графит), древесные слоистые (древесный шпон), стеклопластики (стекловолокно), углепластики (углеродное волокно), органопластики (химические волокна), боропластики (борное волокно), гибридные (поливолоконистые) (с комбинацией разных волокон)

# Свойства и структура КОМПОЗИТОВ

- › Свойства зависят не только от свойств матрицы и наполнителя, но и от **размеров** армирующих волокон, **схемы армирования** и **количества** наполнителя. При упрочнении волокнами конечной длины нагрузка на них передается через матрицу с помощью касательных напряжений. С увеличением длины волокна напряжение в нем повышается. При **критической длине** напряжение достигает максимального значения и уже не меняется при дальнейшем увеличении длины волокна
- › **Схема армирования** сильно влияет на **анизотропию** свойств композитов. При растяжении предел прочности и модуль упругости достигают **наибольших** значений в направлении продольного расположения волокон, **наименьших** – в направлении поперечного расположения. При **двухосном** армировании анизотропия свойств не наблюдается. По сравнению с одноосным, при продольном армировании прочность **уменьшается в 3 раза**
- › **Прочность** композитов зависит от прочности сцепления наполнителя с матрицей. При **малом** содержании упрочнителя вязкая матрица до разрушения испытывает большую деформацию, что ведет к нарушению сцепления волокон наполнителя с матрицей. При **большом** содержании наполнителя снижение прочности связано с достижением предела плотности упаковки упрочнителя



Влияние наполнителя на прочность композита

- › По удельным жесткости и прочности КМ превосходят металлы и их сплавы, что позволяет снизить массу деталей при сохранении их конструкционной прочности.  
**Самолето- и ракетостроение**
- › **Прочность** сцепления обеспечивается диффузионными процессами и химическими реакциями на границе раздела волокон наполнителя и матрицы. Процессы протекают при изготовлении и использовании композитов
- › В **металлических** композитах прочная связь между волокном и матрицей обеспечивается их **взаимодействием** с образованием тонкого слоя интерметаллидных фаз. Если взаимодействия нет, на поверхность волокон наносят специальные покрытия. **Корпуса и камеры сгорания реактивных двигателей**
- › В **неметаллических** композитах связь между компонентами осуществляется за счет **адгезии** (межмолекулярного взаимодействия). Высокопрочные **борные, углеродные и керамические** волокна имеют низкую адгезию с матрицей. Улучшение адгезии достигается травлением волокон или **вискеризацией**. На поверхности волокон после обработки образуется «ворс»

**Вискеризация** - выращивание монокристаллов карбида кремния на поверхности углеродных, борных волокон перпендикулярно их длине

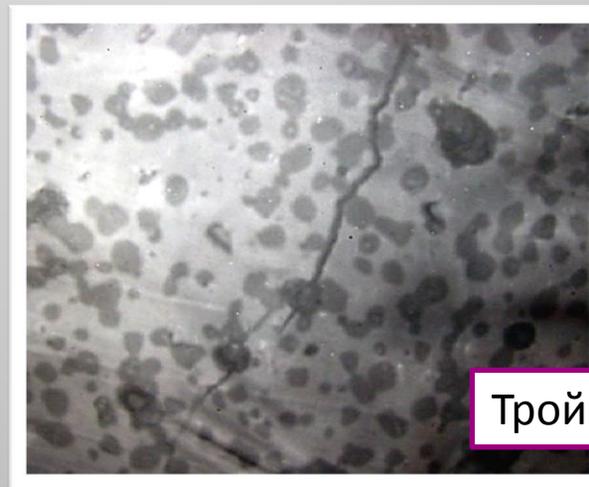
# Повышение вязкости керамики

- › **Диссипация энергии** – единственный способ эффективного повышения вязкости разрушения любого хрупкого тела. Механизмы повышения вязкости:
  - **Структурное превращение** – самый эффективный механизм. Основан на использовании элементов, обладающих структурными превращениями (до  $20 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$ )
  - **Микрорастрескивание** и
  - **Торможение трещин** позволяют получить вязкость в пределах  $6 - 10 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$

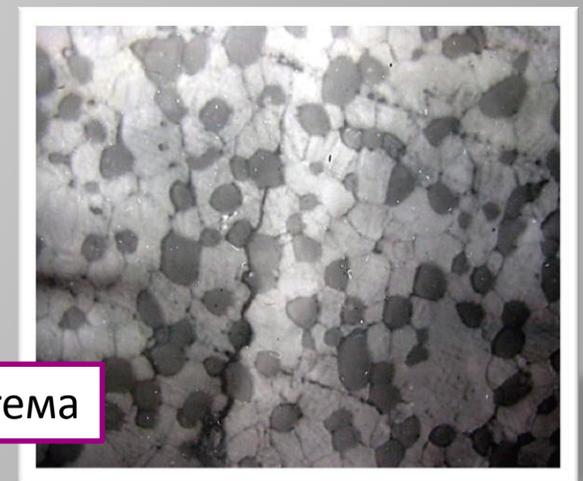
Микроструктура керамического материала с распространяющейся трещиной



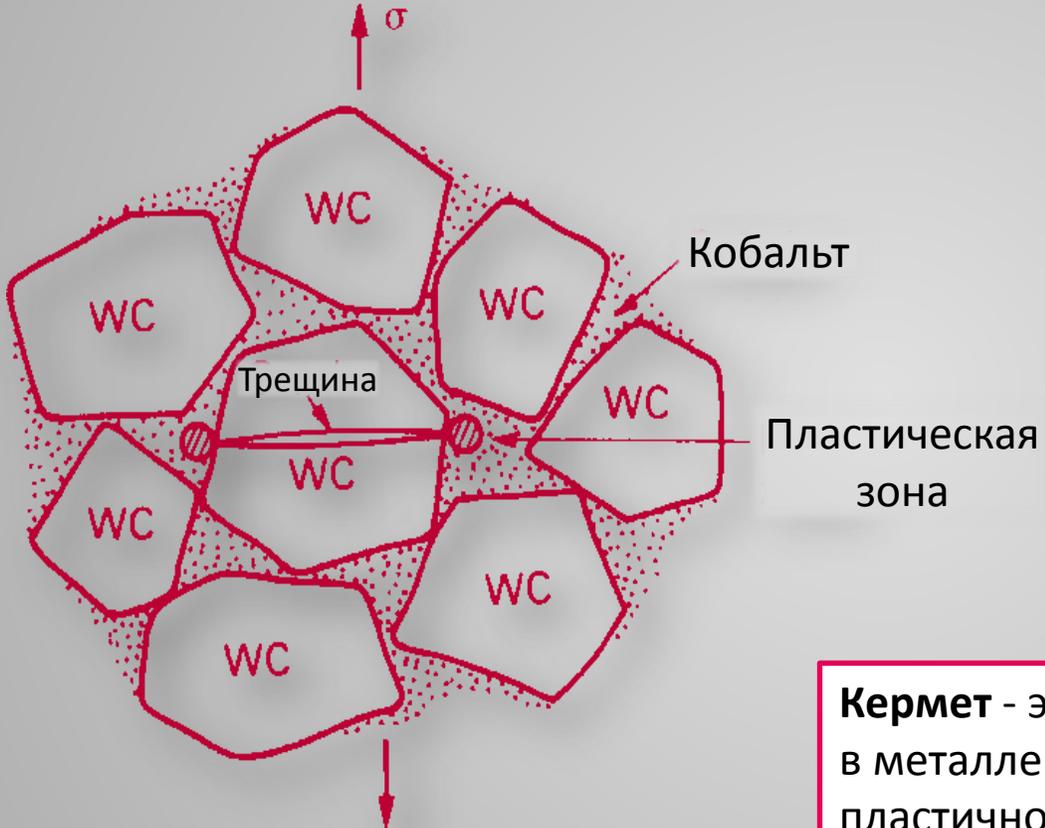
Двойная система



Тройная система



# Металлокерамика



**Кермет** - это композитный материал из керамики (WC) в металле (Co). Трещина в керамике задерживается пластичностью в кобальте

# Сравнительные характеристики

Материал	Керамика	Светоотверждаемый композит	Дерево	Акриловый полимер
Прочность при изгибе, ГПа	19	12	9	3
Относительная ударная прочность (метод падающего шара), см	40	150	80	200

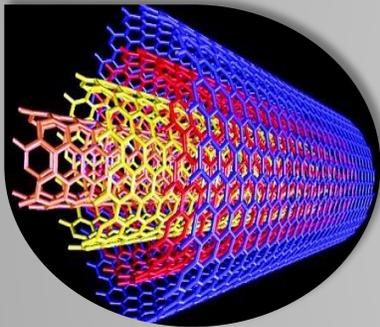
# Керамические композиты и их применение

Керамич. композиты	Состав	Применение
Стекловолокно Углепластик	Полимерное стекло Углерод-полимерные материалы	Высокоэффективные конструкции
Металлокерамика Кость	Победит Гидроксиапатит	Режущий инструмент, бойки. Основной строительный материал животных
Новые керамические композиты	Алюминий-карбид кремния	Высокотемпературные и высокопрочные материалы

Применение	Свойства	Материал
Режущие инструменты	Твердость, прочность	Алюминий, сиалоны
Подшипники, обделки, изоляция	Износостойкость	Алюминий, диоксид циркония
С/х техника	Износостойкость	Алюминий, диоксид циркония
Детали двигателей и турбин, форсунки	Тепло- и износостойкость	SiC, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , алюминий, сиалоны, керамические композиты
Экранирование, армировка	Твердость, прочность	Алюминий, карбид бора
Высокоэфф. окна	Прозрачность и прочность	Алюминий, оксид магния
Искусственная кость, зубы, суставы	Износостойкость, прочность	Диоксид циркония, алюминий
Подложки интегральных микросхем	Изоляционная прочность, теплостойкость	Алюминий, оксид магния

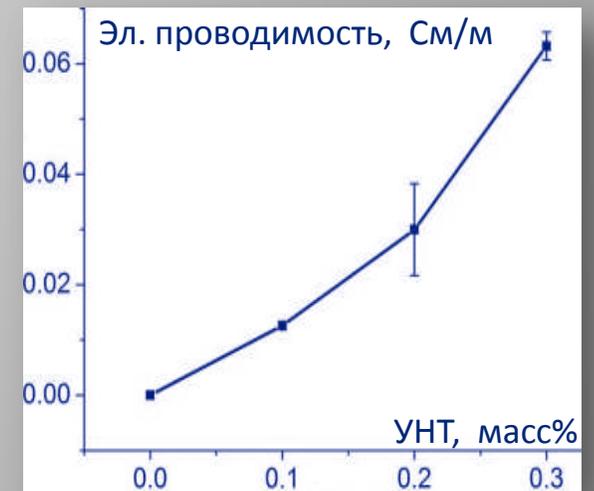
# Углепластики

- Углепластик (карбон, карбонопластик) - полимерный композиционный материал из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (эпоксидных) смол. Плотность **1450-2000 кг/м<sup>3</sup>**. Высокая **прочность, жёсткость** и **малая масса**, прочнее но гораздо **легче стали**. По удельным характеристикам превосходит легированную сталь **25ХГСА**. **Усиливающие дополнения в основном материале конструкции**

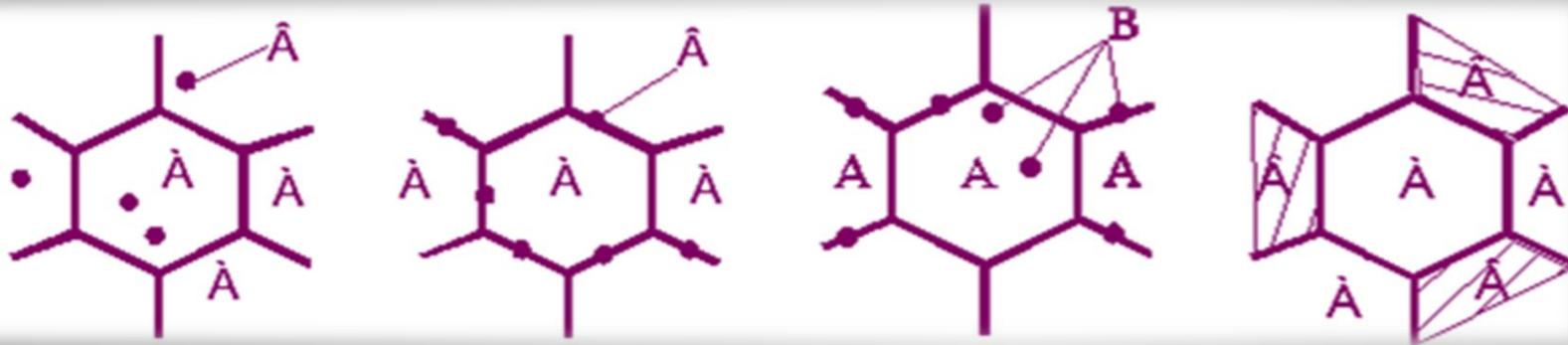


- Недостаточная электро- и теплопроводность усложняют молниезащиту и противообледенение. Электрическую проводимость можно модифицировать одностенными **углеродными нанотрубками**. УНТ - аллотропная модификация углерода, полая цилиндрич. структура диаметром от десятых до нескольких десятков **нм** и длиной от **1 мкм** до нескольких **см**

- Новые технологии позволяют сплести их в нити неограниченной длины, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку графеновых плоскостей
- Измерения показали хорошее повышение проводимости модифицированной эпоксидной смолы и углепластика
- Испытание механических характеристик показывает повышение изгибной прочности, что связано с более высокими сдвиговыми свойствами модифицированной эпоксидной матрицы



## Структура



Наноккомпозиты с ультрадисперсной структурой  
А, В – фазовые составляющие

интра- • интер- • интра/интер- • нано/наноструктурный

- › Для первого и второго типов характерно распределение дисперсных частиц второй фазы в пределах или по границам зерен матричной фазы, соответственно
- › При этом обеспечивается повышение твердости, прочности как при комнатных, так и при повышенных температурах

# Области применения углеродных композитов



РАКЕТОСТРОЕНИЕ



НЕФТЕДОБЫЧА



ПАРЫ СКОЛЬЖЕНИЯ



СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ



САМОЛЕТОСТРОЕНИЕ



АКСЕССУАРЫ



ЭНЕРГЕТИКА



СТРОИТЕЛЬСТВО



СУДОСТРОЕНИЕ



АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЕ

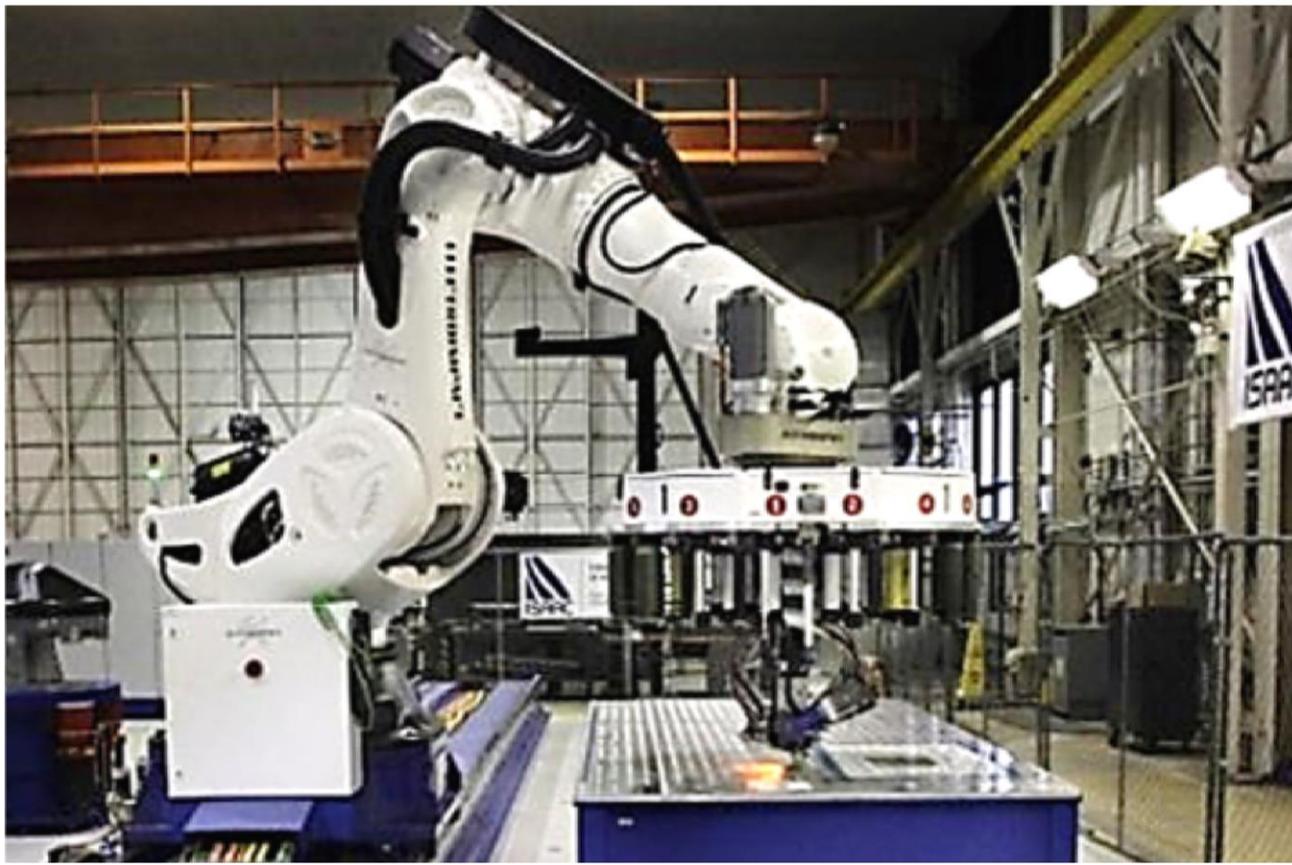


МЕДИЦИНА



ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

# Революция в производстве роботов



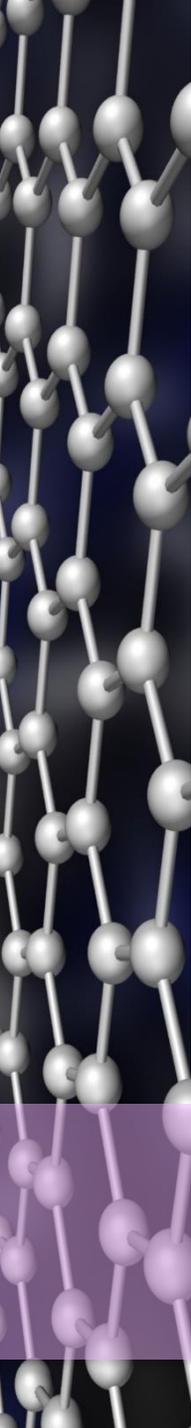
- › Американское космическое агентство (NASA) планирует запустить новую роботизированную линию с рабочим названием **интегрированная структурная сборка современных композитов (ISAAC)** в научно-исследовательском центре Лэнгли (Хэмптон, штат Вирджиния)

- › Роботизированная система **ISAAC** выполнена на основе стандартного промышленного робота компании **KUKA**. **ISAAC** оснащена большим съемным барабаном в виде диска вмещающего до **16** катушек с различными типами углеродного волокна. Это позволяет **ISAAC** не только быстро переключаться между используемыми материалами, но дает возможность заменить барабан, чтобы робот мог выполнять совершенно иные функции

# Революция в производстве роботов



- › Слой частично отвержденных смол армируется углеродными волокнами. По данным NASA, ранее в производстве композитных деталей слой укладывался в одном из трех положений – 0,45 или 90 градусов
- › Новый манипулятор и барабан робота **ISAAC** позволяет ему не только использовать сложные кривые формы, накладывая слои друг на друга. Он быстро меняет тип армирующего волокна для создания более прочных и легких материалов, которые можно быстро сконфигурировать под точные характеристики аэрокосмических аппаратов при меньших трудозатратах

A decorative graphic on the left side of the slide, showing a 3D molecular structure with white and purple spheres connected by thin lines, resembling a lattice or network of atoms.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**