

# Современные проблемы наук о материалах и процессах

## Основные виды материалов

Лекция 5

*Композиционные и наноструктурированные материалы*

*Классификации, структура, особенности физико-химических и механических свойств, применение и перспективы развития*

КЛИМЕНОВ  
Василий Александрович  
профессор ИШНПТ ТПУ



Российский «3D-принтер» разработанный и изготовленный ТПУ с участием РКК «Энергия».

# Содержание лекции

- Введение
- Композиционные материалы
  - Углепластики
  - Полимерные композиты
  - Керамокомпозиты
  - Металлокомпозиты
- Наноструктурированные материалы

# Дополнительная литература

- **ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
/Учебник под общей редакцией Б. А. Калина,  
том 5. Материалы с заданными свойствами,  
Москва 2008, 671.
- «Процессы пластического  
структурообразования металлов / В.М.Сегал,  
В.И.Резников, В.И.Копылов и др. ;». Издано:  
(1994).



# ВВЕДЕНИЕ

# Классификация материалов

<b>Металлы и сплавы</b>	<b>Железо и стали</b> <b>Алюминий и его сплавы</b> <b>Медь и её сплавы</b> <b>Никель и его сплавы</b> <b>Титан и его сплавы</b>
<b>Полимеры</b>	Полиэтилен (PE) Полиметилметакрилат (PMMA) Нейлон или полиамид (PA) Полиэстер (PS) Полиуретан (PU) Поливинилхлорид (PVC) Полиэтилентерефталат (PET) <b>Полиэфирэфиркетон (PEEK)</b> Эпоксидная смола (EP) Эластомеры или натуральная резина (NR) <b>Полилактид (PLA)</b>
<b>Керамика и стекло</b>	Магниева (MgO) <b>Алюминиевая (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b> Силикаты и стекло (SiO) <b>Циркониевая (ZrO<sub>2</sub>)</b> Карбид кремния (SiC) Нитрид кремния (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) Цемент и бетоны
<b>Композиты</b>	Стекловолокно Армированные полимеры углеродным волокном Наполненные полимеры Керметы Композитная керамика
<b>Натуральные материалы</b>	Дерево Кожа Хлопок/шерсть/шёлк Кость Камень Песок

# Основные представления современного материаловедения

По свойствам



Прогрессивные материалы

Полупроводники

Биоматериалы

Умные материалы

Наноматериалы

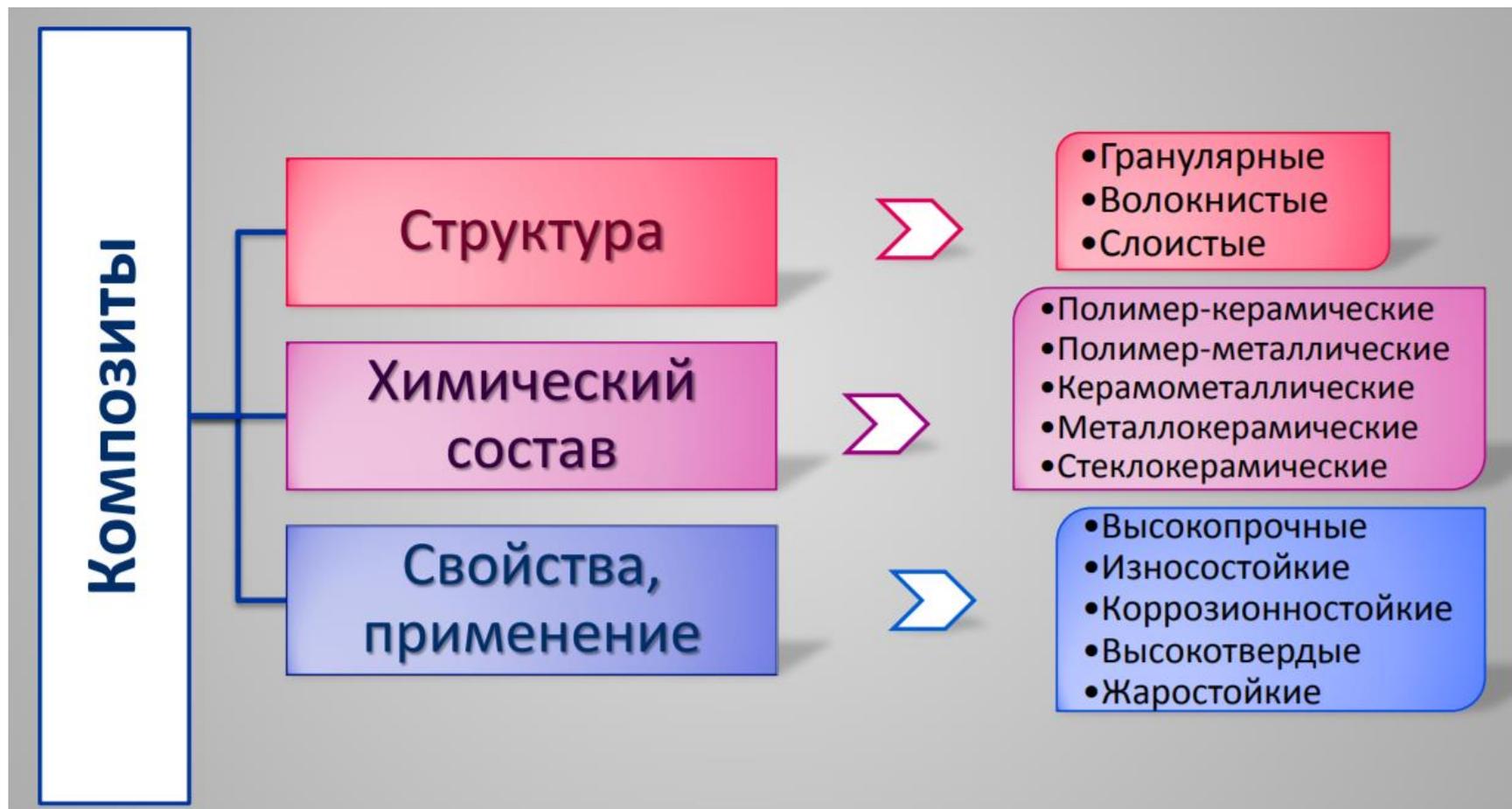
# Свойства материалов, определяющие их конструирование

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)



**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

# Классификация композитов



# 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**

# Свойства и структура композитов

- 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

# Типы матриц КМ

- **Стеклопластик** - конструкционный материал. Корпуса машин, защитные кожухи, вентиляционные трубы, контейнеры, электро- и радиомонтажные платы
- **Фиберглас** – 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)

# Типы матриц КМ

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 подготовленную 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 композитных матриц

## 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

# Виды армирующих материалов

- **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

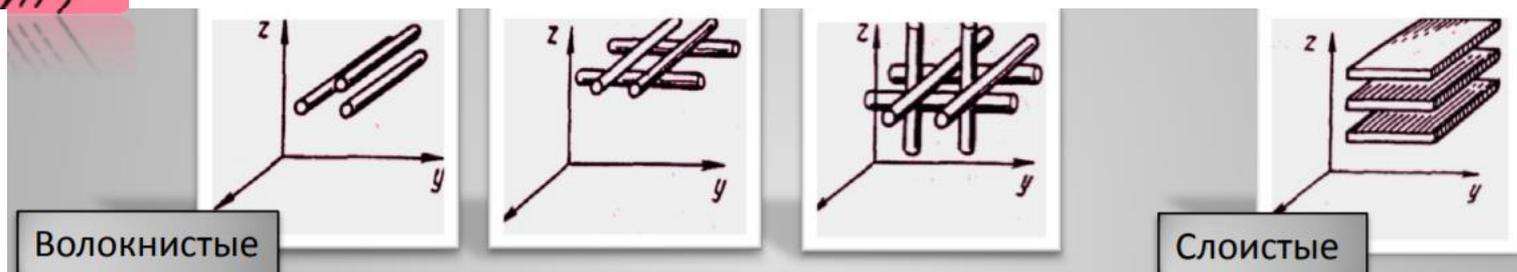
# Виды армирующих материалов

- **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 звукоизоляционные материалы**

# Композиционные материалы

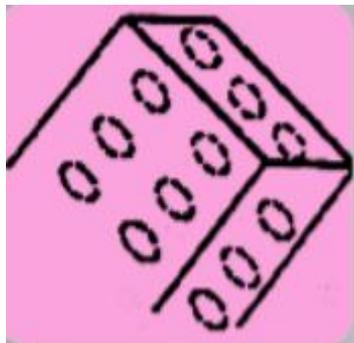


- **Волокнистые** содержат волокна: нити, ленты, сетки различного плетения. **Армирование** волокнистых композитов осуществляется по **одно-, двух- и трехосной** схеме

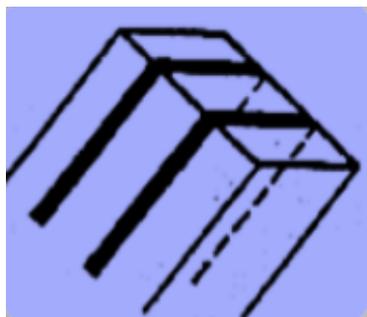


- Прочные и твердые волокна окружены металлич. или пластмассовой матрицей. В качестве волокон используют прочную металлическую проволоку, металлические или керамические нитевидные кристаллы с низкой плотностью дислокаций, стеклянные и керамические нити из бора, углерода. Волокна воспринимают нагрузку, 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

# Композиционные материалы



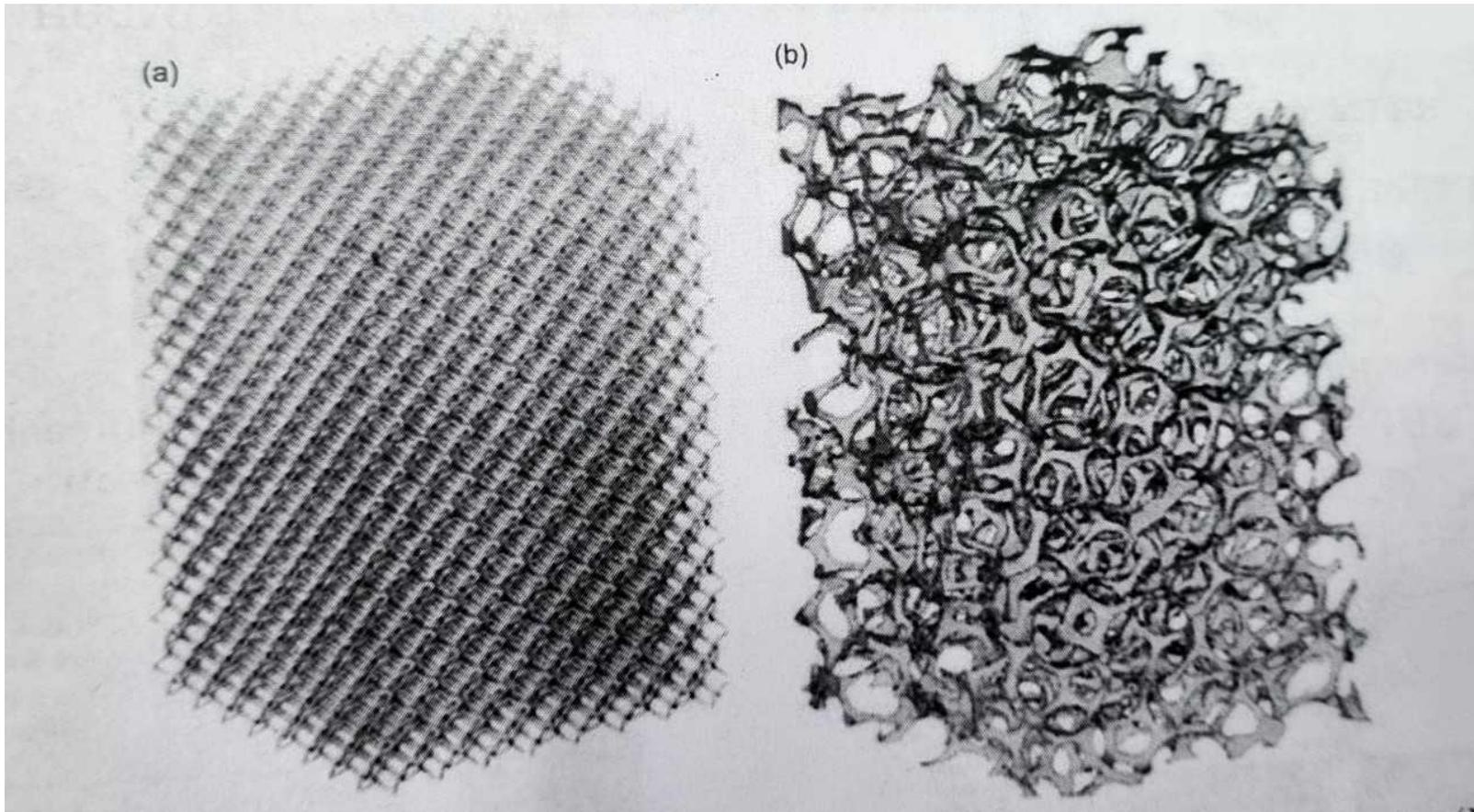
- **Дисперсноупрочненные** содержат мелкие, равномерно распределенные тугоплавкие частицы **карбидов, оксидов, нитридов**, которые не взаимодействуют с матрицей и не растворяются в ней вплоть до темп. плавления. Дисперсные частицы упрочняют материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении. 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

# CAD-модели формирования открытых сотовых структур

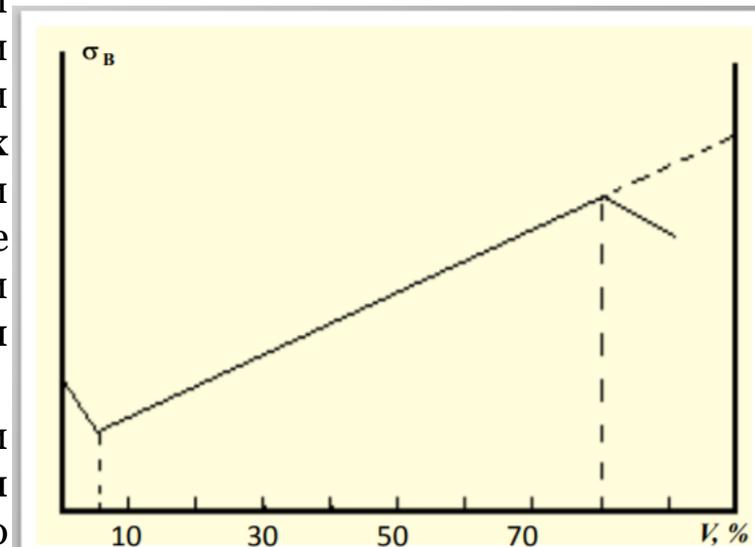


**а) Компьютерное представление на основе элементов meshмодели**

**б) Стохастическая модель пены на основе микро-СТсканированных элементов**

# 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

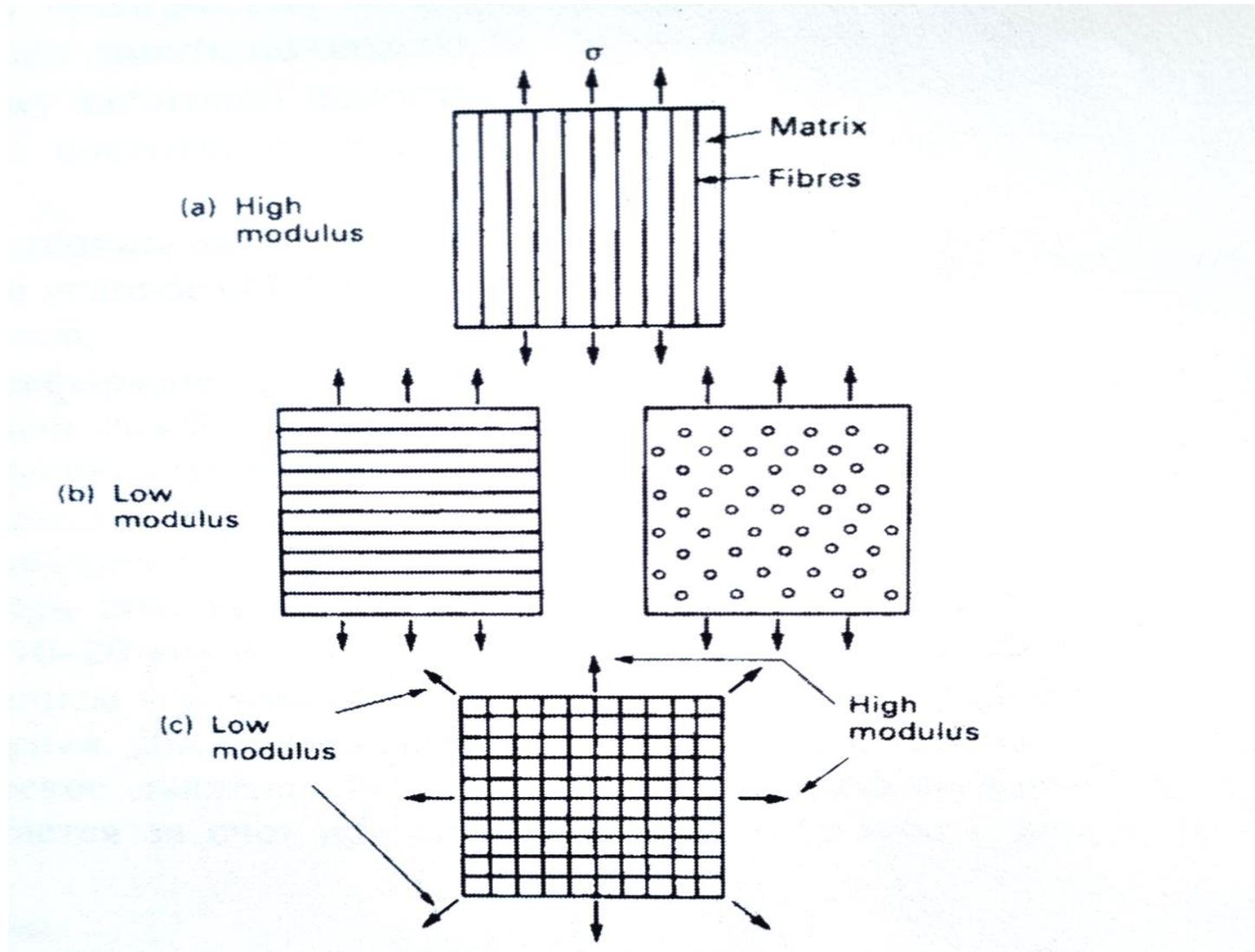


Влияние наполнителя на прочность композита

# Свойства и специфические свойства композитов

Материал	Плотность $\rho$ , мг*м <sup>-3</sup>	Модель Юнга E, (Гпа)	Прочность $\sigma_y$ , (Мпа)	Прочность разрушения $K_c$ , (Мпа*м <sup>1/2</sup> )	E/ $\rho$	E <sup>1/2</sup> / $\rho$	E <sup>1/3</sup> / $\rho$	$\sigma_y/\rho$
Композиты								
CFRP, 58% осевое С в эпоксиде	1,5	189	1050	32-45	126	9	3,8	700
CFRP, 50% осевое стекло в полиэфстер	2,0	48	1240	42-60	24	3,5	1,8	620
Кевлар-эпоксид (KFRP), 60% осевое	1,4	76	1240	-	54	6,2	3,0	886
Кевлар в эпоксиде								
Металлы								
Высокопрочные стали	7,8	207	1000	100	27	1,8	0,76	128
Алюминиевый сплав	2,8	71	500	28	25	3,0	1,5	179

# Зависимость модуля упругости от ориентации ВОЛОКНА



# Области применения углеродных композитов



РАКЕТОСТРОЕНИЕ



НЕФТЕДОБЫЧА



САМОЛЕТОСТРОЕНИЕ



АКСЕССУАРЫ



ПАРЫ СКОЛЬЖЕНИЯ



ЭНЕРГЕТИКА



СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ



СТРОИТЕЛЬСТВО



МЕДИЦИНА



СУДОСТРОЕНИЕ



АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЕ



ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

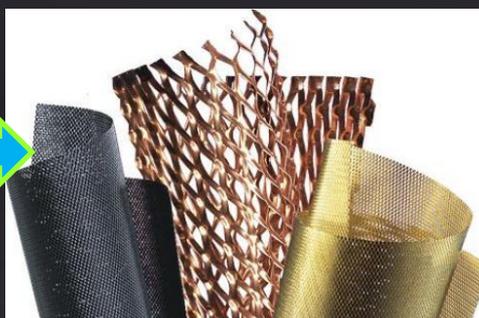
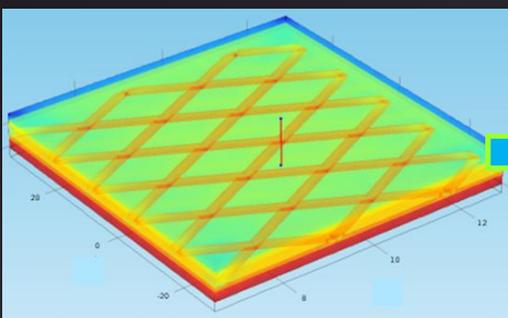
# Углепластики (Бурков М.В. ИФПМ СО РАН)



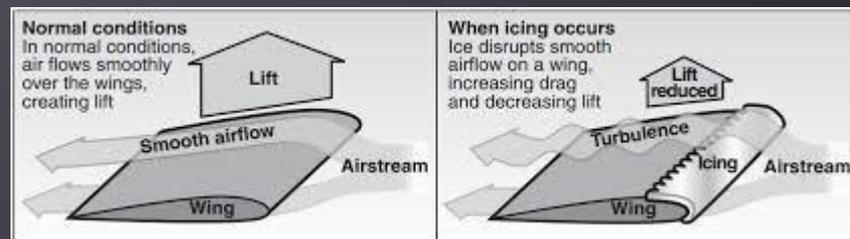
В месте электрического пробоя высоковольтный разряд приводит к серьезному повреждению



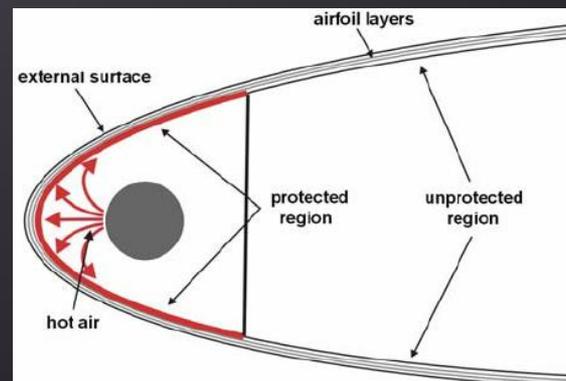
Текущее решение – добавление электропроводных сеток в укладку



## Обледенение носовой кромки несущих поверхностей



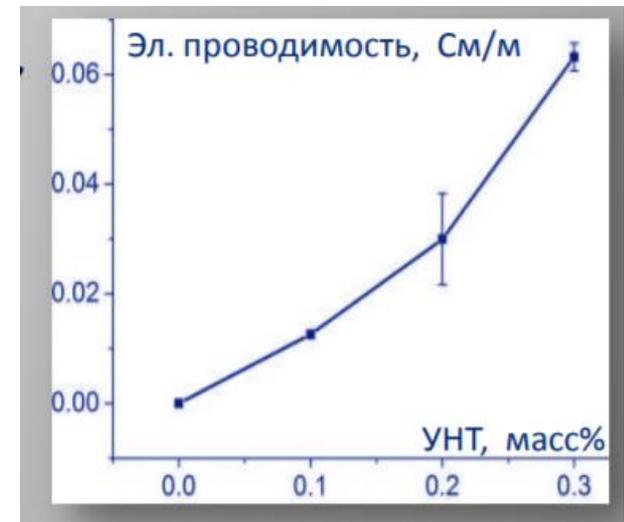
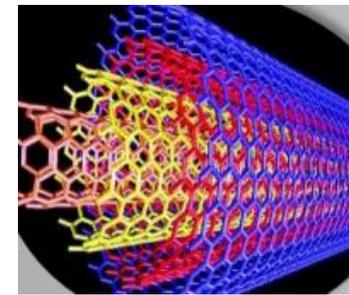
## Нагрев передней кромки



Низкая теплопроводность углепластика не позволяет использовать такие системы

# 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 и 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



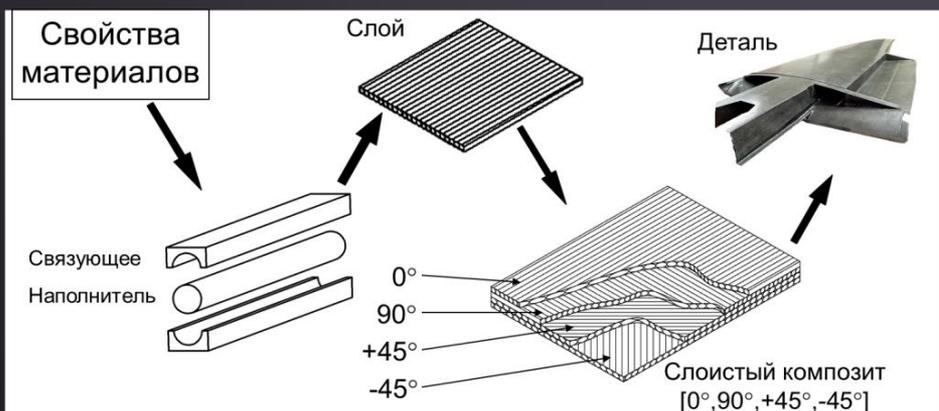
# Углепластики: гибридное армирование

Непрерывные  
углеродные  
волокна

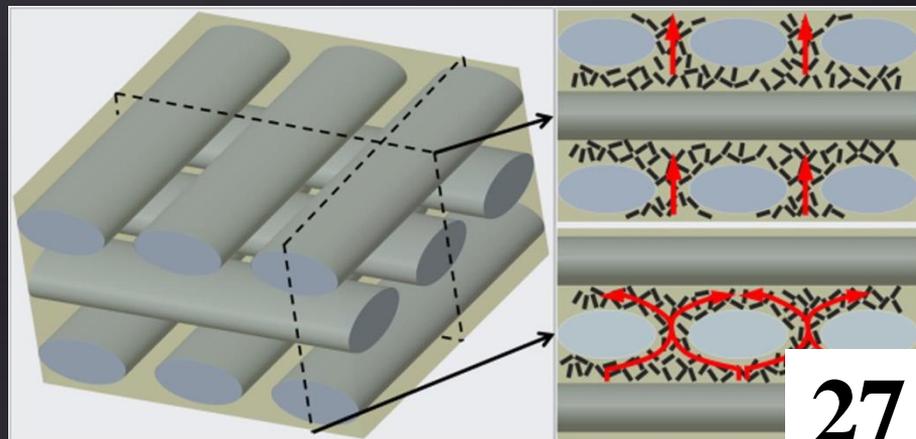
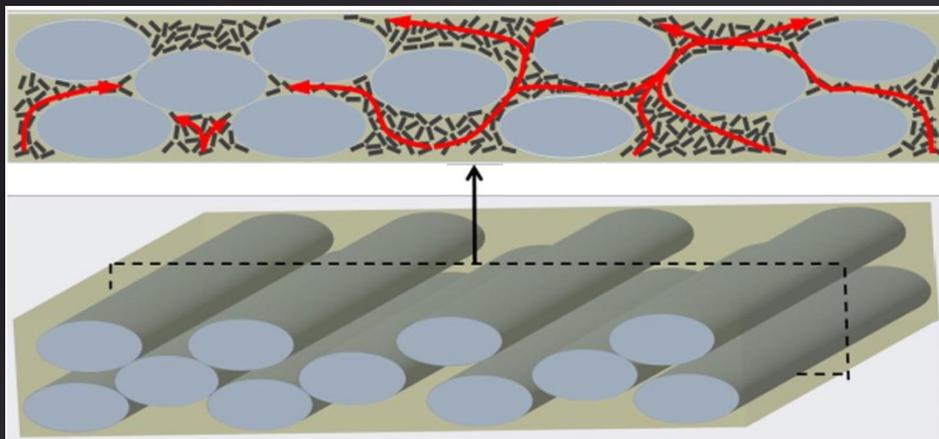


Дополнительные дисперсные наполнители

- Короткие углеродные волокна
- Одностенные углеродные нанотрубки
- Металлические наночастицы (волокна)



Повышение прочности  
матрицы и создание  
электро- и теплопроводящей  
сети распределенных частиц



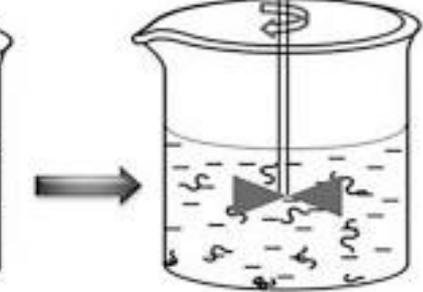
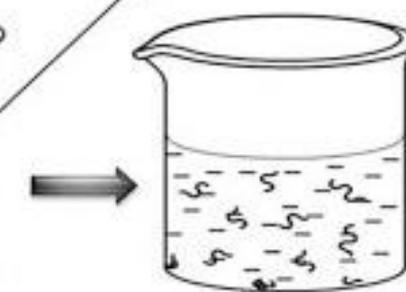
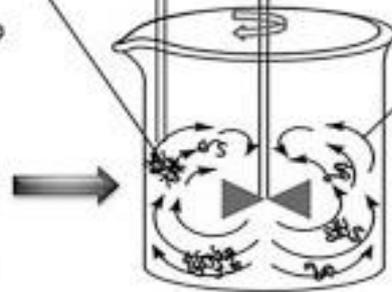
# Формование заготовок гибридных КМ

Отвердитель

Деагломерация (Мех. + УЗ)

Эпоксидная смола

Частицы



Плита термопресса

Термостойкая пленка

Впитывающая ткань

Перфорированная пленка

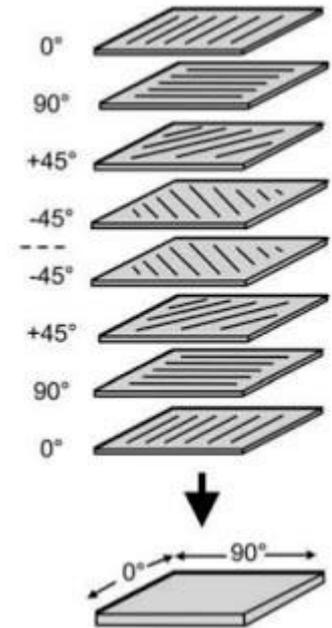
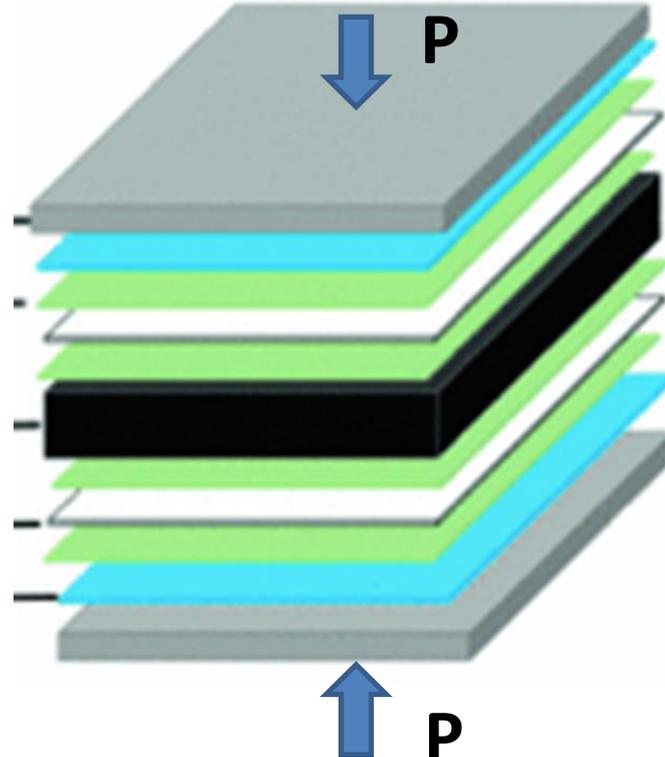
Укладка углеткани с модифицированным связующим

Формование (2 часа):

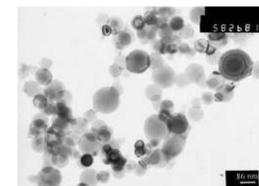
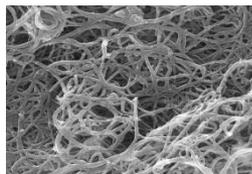
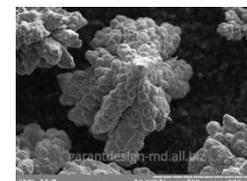
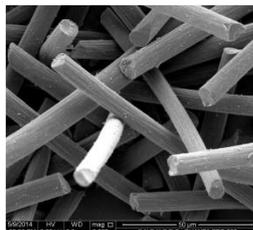
температура 80 °С и давление 0,7 МПа

Постотверждение (24 час):

температура 80 °С



# Формование заготовок гибридных КМ



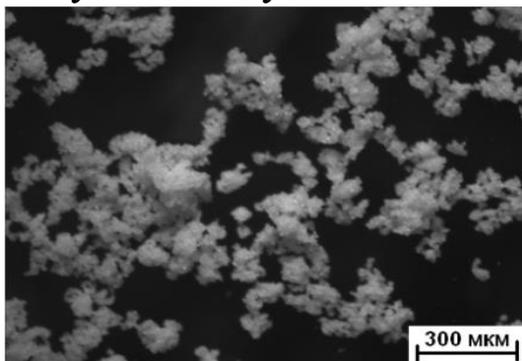
## Разработка высокопрочных износостойких экструдированных композитов на полимерной основе для нужд машиностроения (Панин С.В. и др.)

### Разработка экструдированных износостойких полимерных композитов на сверхвысокомолекулярной матрице для аддитивных технологий

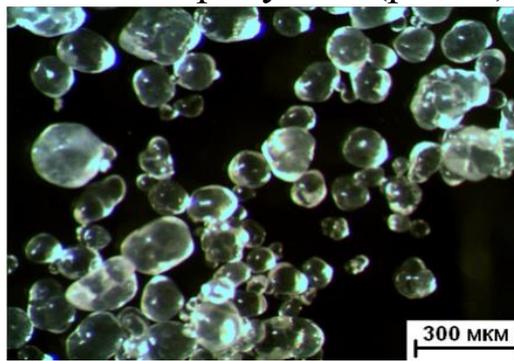
- В качестве фидстоков используются термопластичные полимеры с высоким показателем текучести расплава (ABS, PA, PVB, PVC, PU, PPS, PEEK, PI). Композиты на их основе являются высокопрочными, но обладают высоким коэффициентом трения и недостаточной износостойкостью для их использования в качестве антифрикционных материалов для узлов трения в металлополимерных системах. Полиолефины (PP, HDPE, UHMWPE (СВМПЭ)) реже используются для разработки фидстоков в аддитивных технологиях производства изделий для потребностей различных отраслей экономики. СВМПЭ (сверхвысокомолекулярный полиэтилен), обладая достаточно высокими характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износ- и химической стойкостью в агрессивных средах, находит применение в узлах трения машин и механизмов, а также в медицине для изготовления ортопедических имплантатов. СВМПЭ может быть пластифицирован добавлением полипропилена, полиэтиленгликоля (ПЭГ), изотактического полипропилена (ИПП), ПЭ высокого давления и др. Определенное повышение текучести СВМПЭ, как матрицы для расходных материалов, может быть достигнуто введением альфа-токоферола (витамин Е), гидроксиапатита, полидиметилсилоксана, парафинового масла. Однако все они в той или иной степени ухудшают структуру и механические свойства получаемых композитов.

# Порошки и композиционные смеси

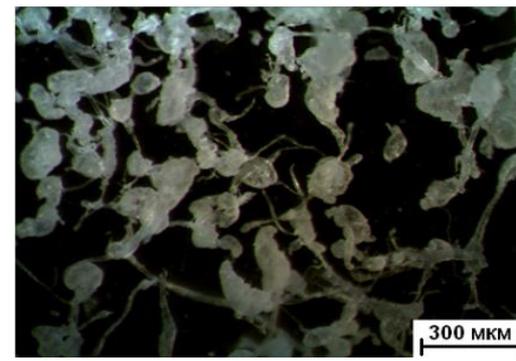
В работе использовали СВМПЭ марки GUR-2122 фирмы Тисона молекулярной массой 4,5 млн, а в качестве пластифицирующих добавок – а) привитый полиэтилен высокой плотности HDPE-g-SMA (молотый гранулят), б) порошок полипропилена марки PP21030, в) блок-сополимер полипропилена с полиэтиленом низкой плотности PP-b-LLDPE и г) сшитый полиэтилен PEX-b с размером частиц ~100-200 мкм, также полученные путем механического помола гранулята (рис. 1).



а



б



в

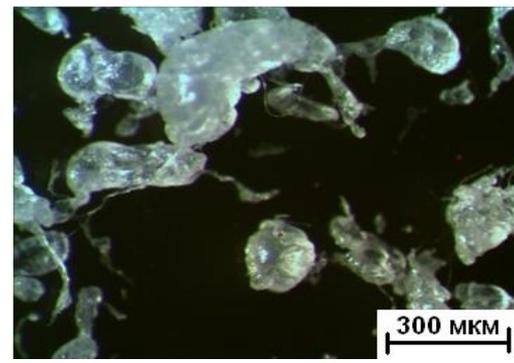
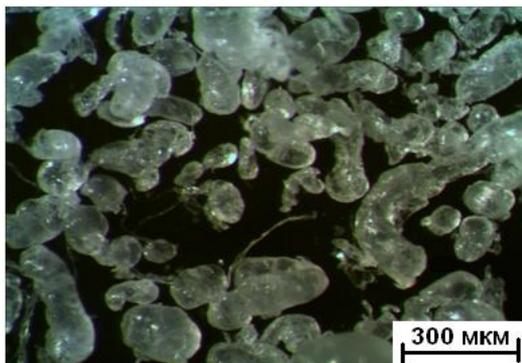
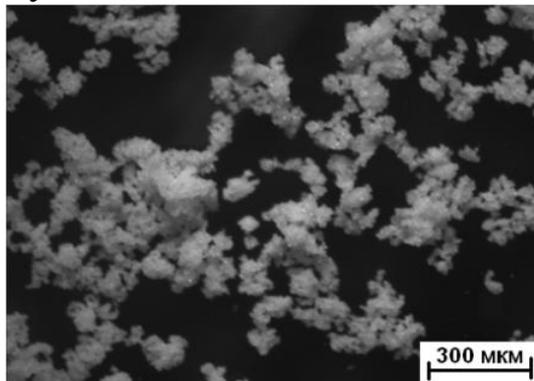


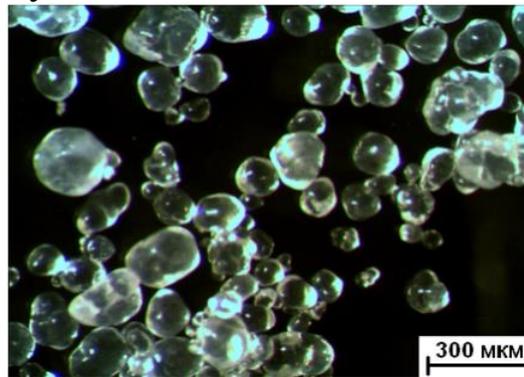
Рис. 1. Микрофотографии порошков УНМВРЕ (а) и смесей композитов УНМВРЕ+20 вес. % РР (б), УНМВРЕ +20 вес. % РР-б-LLDPE (в), УНМВРЕ+ 20 вес. % РЕХ-б (г), УНМВРЕ +20 вес.% HDPE-g-SMA (д).

# Порошки и композиционные смеси

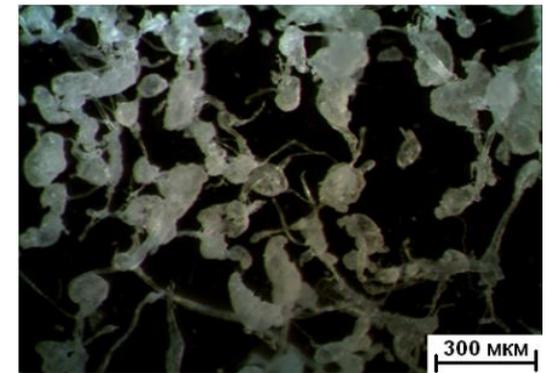
*СВМПЭ* марки GUR-2122 фирмы Ticona молекулярной массой 4,5 млн, а в качестве пластифицирующих добавок – а) привитый полиэтилен высокой плотности HDPE-g-SMA (молотый гранулят), б) порошок полипропилена марки PP21030, в) блок-сополимер полипропилена с полиэтиленом низкой плотности *PP-b-LLDPE* и г) *сшитый* полиэтилен *PEX-b* с размером частиц ~100-200 мкм, также полученные путем механического помола гранулята.



а



б



в

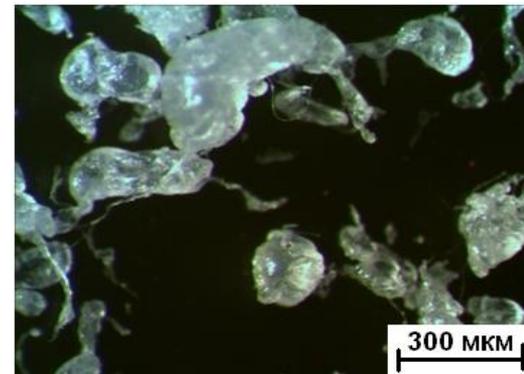
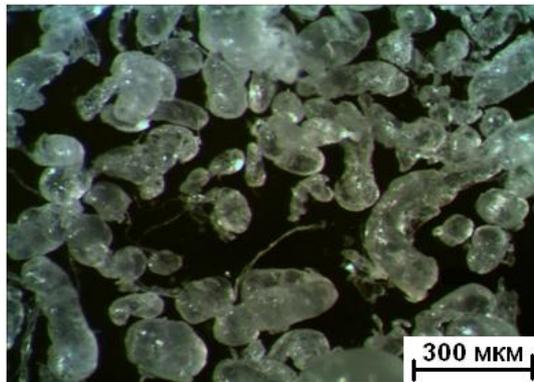
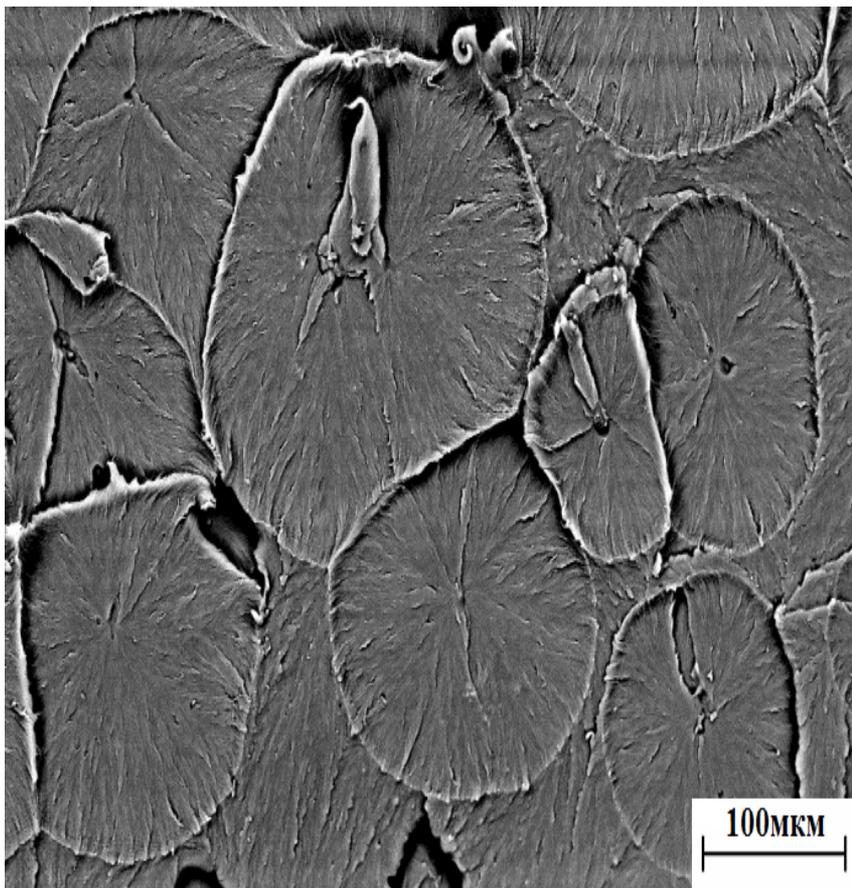
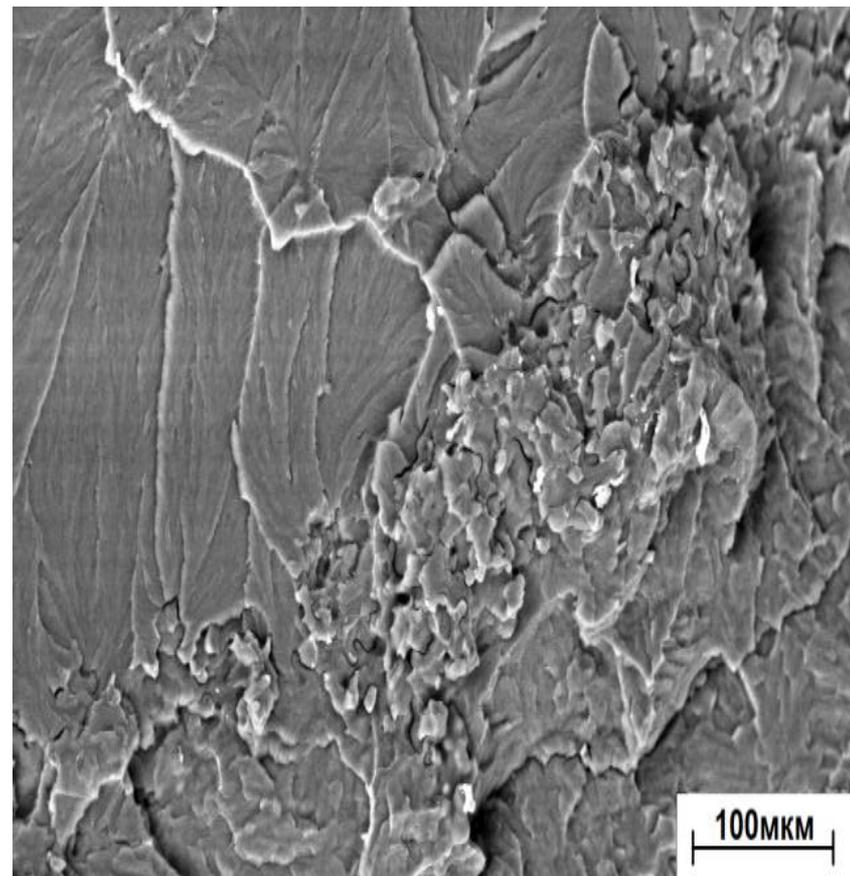


Рис. 1. Микрофотографии порошков УНМВРЕ (а) и смесей композитов УНМВРЕ+20 вес. % PP (б), УНМВРЕ +20 вес. % PP-b-LLDPE (в), УНМВРЕ+20 вес. % PEX-b (г), УНМВРЕ +20 вес.% HDPE-g-SMA (д).

# Надмолекулярная структура экструдированных композиций на основе сверхвысокомолекулярной матрицы



а

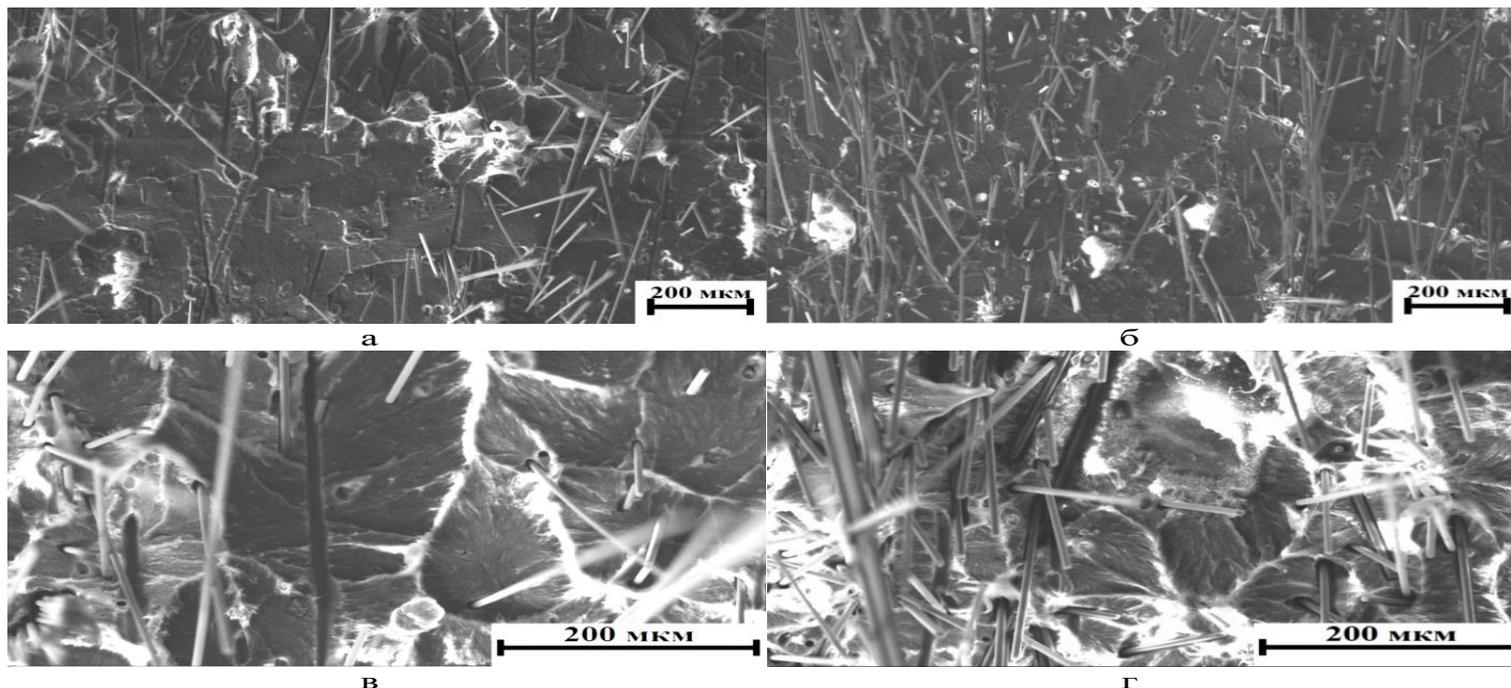


б

# Иерархически армированные гетеромодульные экструдированные твердосмазочные нанокompозиты на основе экструдированной СВМПЭ-матрицы

Техническим результатом предлагаемого решения является получение нанокompозита с высокими прочностными и трибологическими свойствами и удовлетворительной текучестью для аддитивных технологий получения изделий:

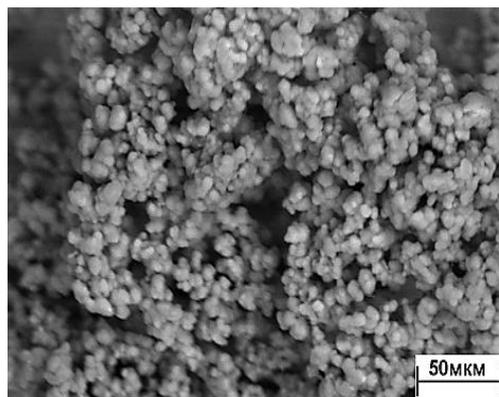
1. Армирование за счет введения углеволокна (милли ,2 мм).
2. Твердая смазка за счет введения наноконуглеродных волокон (нано).



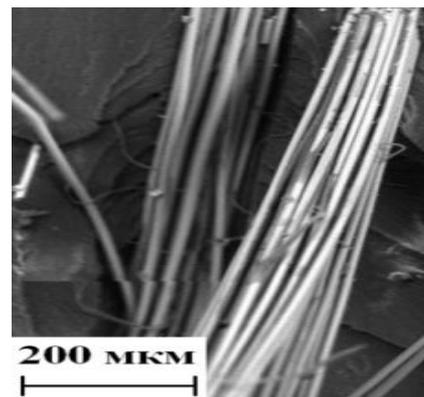
Фиг. 1. РЭМ- фотографии надмолекулярной структуры композитов:  
СВМПЭ + 10 вес. % HDPE-g-SMA + 0.5 вес. % (нано) УВ + 2 вес. % УВ (милли) (а,в) и  
СВМПЭ + 10 вес. % HDPE-g-SMA + 0.5 вес. % (нано) УВ + 5 вес. % УВ (милли) (б,г).

# Композиты на основе СВМПЭ со стекловолокном, функционализированным различными силансодержащими модификаторами

- Стекловолокно обладает высокой прочностью и жесткостью и широко используется в качестве наполнителя для полимерных композиционных материалов, прежде всего для повышения их механических свойств. Обработка стекловолокон с помощью силансодержащих модификаторов способна улучшить совместимость и адгезию между ними, приводя одновременно к повышению механических и триботехнических свойств СВМПЭ-композитов.



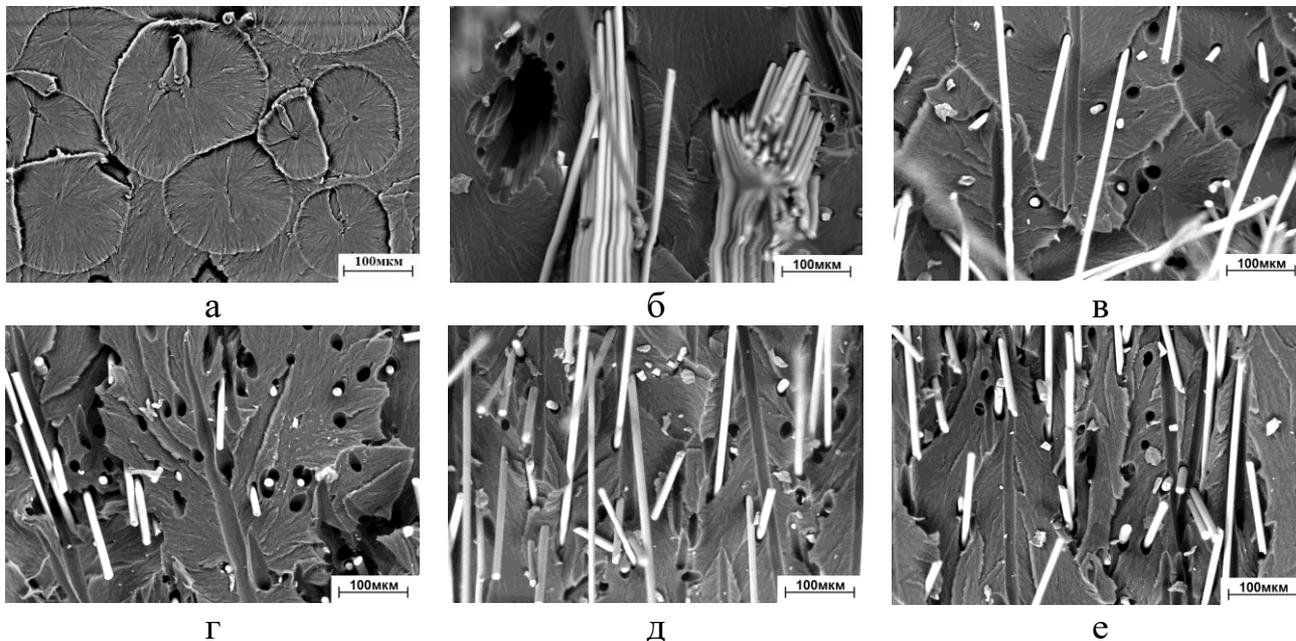
а



б

Рис. 1. Микрофотографии исходного порошка СВМПЭ (а) и рубленых стекловолокон (б).

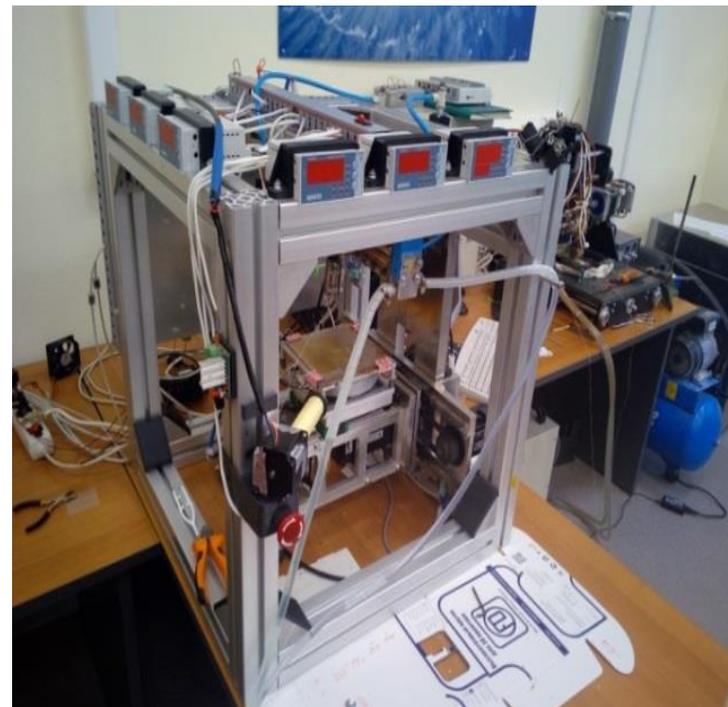
# Структура композитов



Надмолекулярная структура СВМПЭ (а) и композитов: СВМПЭ + 10 вес. % РСВ (исходные, б), СВМПЭ + 10 вес. % РСВ (отожженные, в), СВМПЭ + 10 вес. % РСВ (аппрет - КН550, г), СВМПЭ + 10 вес. % РСВ (аппрет – пента 1006, д), СВМПЭ + 10 вес. % РСВ (аппрет – ONS, е).

## Уникальный 3D-принтер композиционных полимерных материалов

Показатель	Значение	Ед. изм.
минимальная высота печати одного слоя	150	мкм
количество осей манипулятора	4+1 (XYZA + наклон) с возможностью доведения до 5+1	
количество регулируемых зон нагрева	минимум 3	
печать непрерывно армирующим волокном	Да	
область построения	200x200x200 (ДxШxВ)	мм
максимальная	150	°С

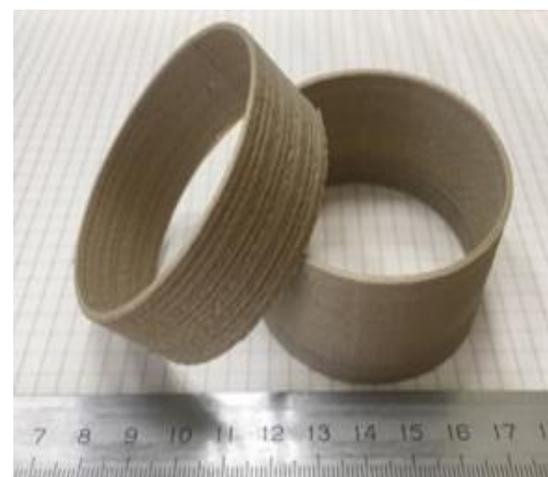


## 3D – печать композитными полимерными материалами

3D-печать полимером с армированием непрерывной кевларовой нитью, при этом прочность изделий превышает прочность алюминия

3D-печать супер конструкционными полимерами прочность которых намного превышает прочность конструкционных пластиков, с температурами плавления более 340°C и содержащими стекловолокно.

На рисунках фотографии образцов с непрерывной нитью (вверху) и высокотемпературного пластика РЕЕК (внизу).



## Наноструктурные керамические композиционные материалы

- Разработана технология получения новых высокопрочных и высоковязких керамических материалов с нанокристаллической структурой, синтезированных из **нанокристаллических** оксидных порошков на основе *диоксида циркония, оксида алюминия и их гомогенных смесей, полученных плазмохимическим способом.*
  - Нанопорошки обладают высокой активностью при спекании, что обеспечивает значительную прочность спеченной керамики.
  - Полученные уникальные свойства материалов обусловлены малым размером зерен в нанокристаллических материалах и наличием структурных фазовых превращений.

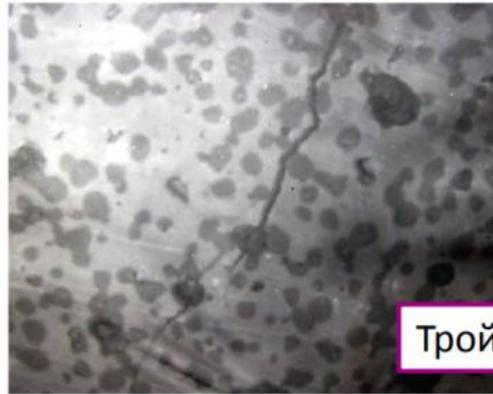
# Повышение вязкости керамики

- **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 МПа** х **м<sup>1/2</sup>**)
  - **Микрорастрескивание** и
  - **Торможение трещин** позволяют получить вязкость в пределах **6 -10 МПа** х **м<sup>1/2</sup>**

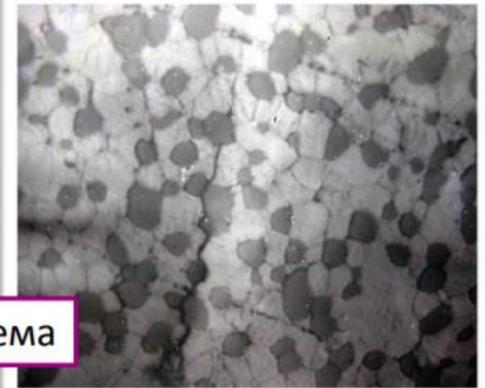
Микроструктура керамического материала с распространяющейся трещиной



Двойная система



Тройная система



# Применение композиционной керамики (ИФПМ СО РАН)



Конструкционная нанокерамика применяется для изготовления ножей и фильер для переработки пластмасс, резки химических волокон, изготовления лезвий бытовых ножниц и медицинских скальпелей; фильер протяжки проволоки, форсунок распылительных камер; втулок клапанов, различного рода уплотнений и др. Керамические материалы обладают высокой стойкостью в химических растворах. Востребованные на рынке продукты:

- Высокопрочные, ударновязкие, износ-, коррозионно- и термостойкие детали: втулки клапанов, уплотнения, сопла, штуцеры, фильеры, крыльчатки и др.
- Твердый электролит для датчиков содержания кислорода в расплавах металлов.
- Фильеры для формования сварочных электродов из корундовой керамики.

# Керамические композиты и их применение

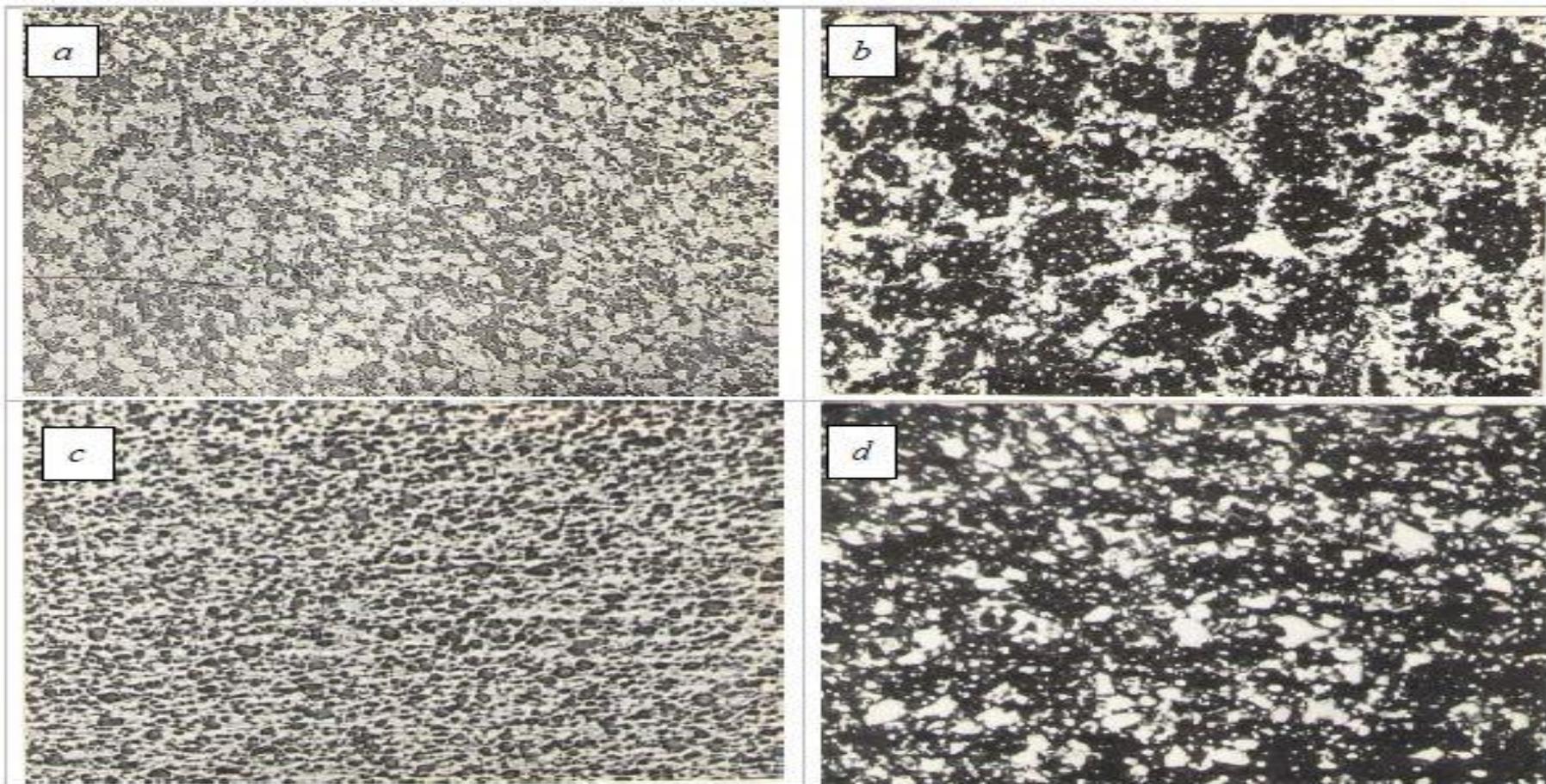
Керамич. композиты	Состав	Применение
Стекловолокно Углепластик	Полимерное стекло Углерод-полимерные материалы	Высокоэффективные конструкции
Металлокерамика Кость	Победит Гидроксиапатит	Режущий инструмент, бойки. Основной строительный материал животных
Новые керамические композиты	Алюминий-карбид кремния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

# Металлокерамика



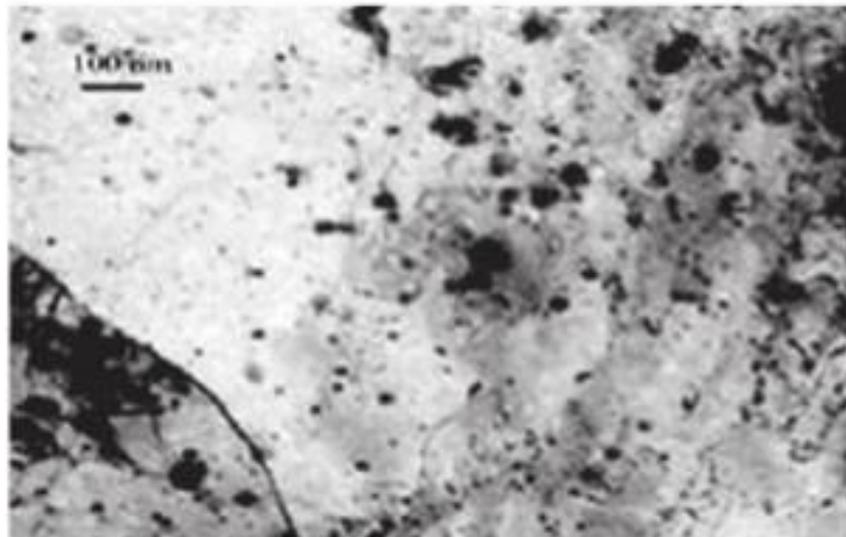
**Карбидостали** — семейство композиционных инструментальных материалов, которые изготавливаются методами [порошковой металлургии](#) и предназначены для [металлообработки](#). Карбидостали отличаются термостойкостью, сочетанием характеристик твёрдых сплавов (твёрдости, износостойкости) и [легированных сталей](#) (прочность, вязкость). По своим параметрам занимают промежуточное положение между [быстрорежущими сталями](#) и [твёрдыми сплавами](#), однако карбидостали легче быстрорежущих сталей на 13 %, твёрдых сплавов — на 50 %. В структуре карбидосталей тугоплавкие карбидные зёрна (как правило [TiC](#)) равномерно распределены в связке с [легированной сталью](#).



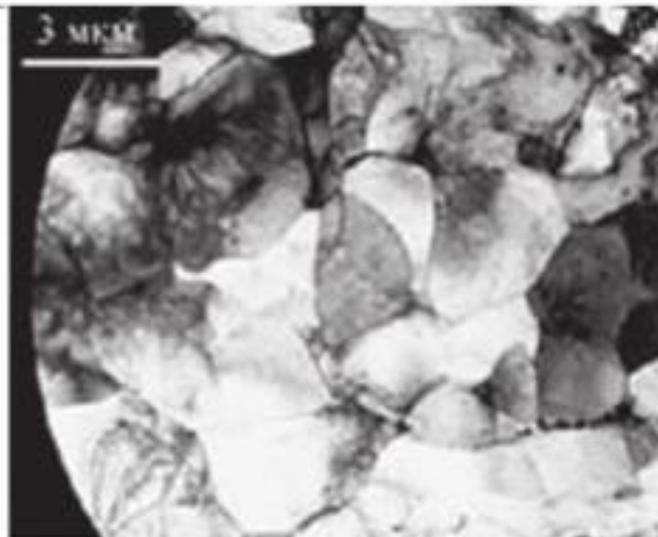
## Дисперсно-упрочняемые оксидами (ДУО) стали.

Новый класс ферритно-мартенситных радиационно стойких сталей, упрочненных частицами оксидов нанометрового размера,, обладающими при этом высокими прочностными и механическими свойствами. Такой путь лежит в глобальном направлении создания конструкционных материалов, упрочненных высодисперсными неметаллическими частицами (наночастицами) и предназначенных для элементов активных зон перспективных ядерных реакторов.

а

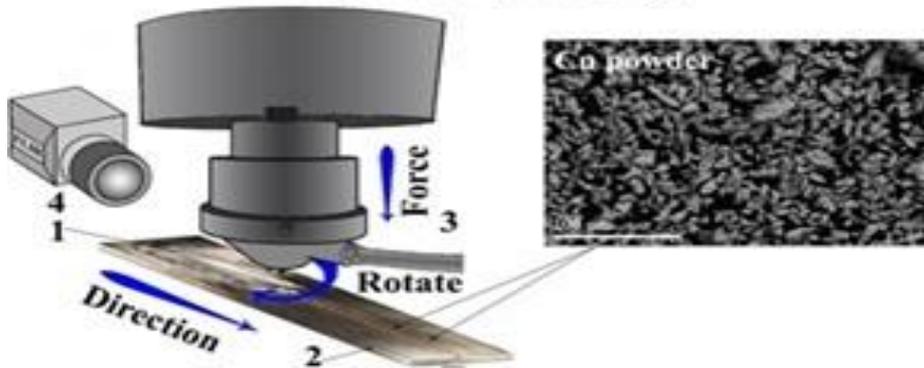


б

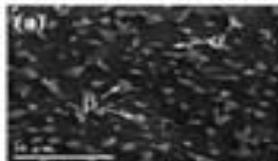


# In situ синтез композита титан-медь, полученный фрикционной перемешивающей обработкой (ИФПМ СО РАН)

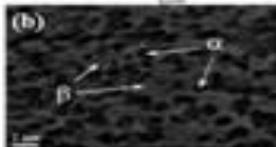
Friction stir processing



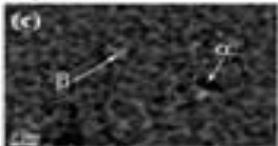
Hybrid layer microstructures



Ti6Al4V FSP



Top of SZ



Middle of SZ

(Ti6Al4V + Cu) FSP

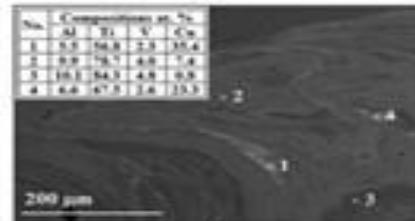


Top of SZ

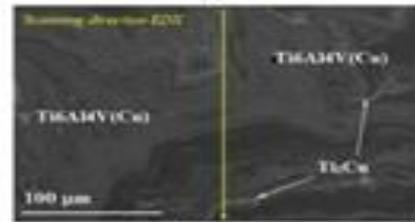


Middle of SZ

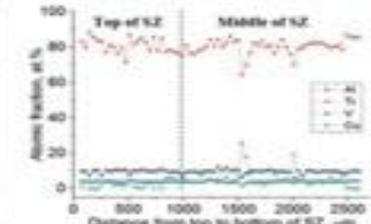
Intermetallic compounds



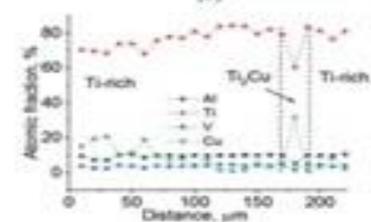
(a)



(c)

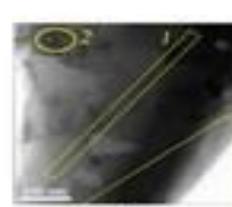


(b)

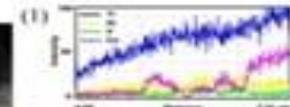


(d)

Spinodal decomposition



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

# Коментарий

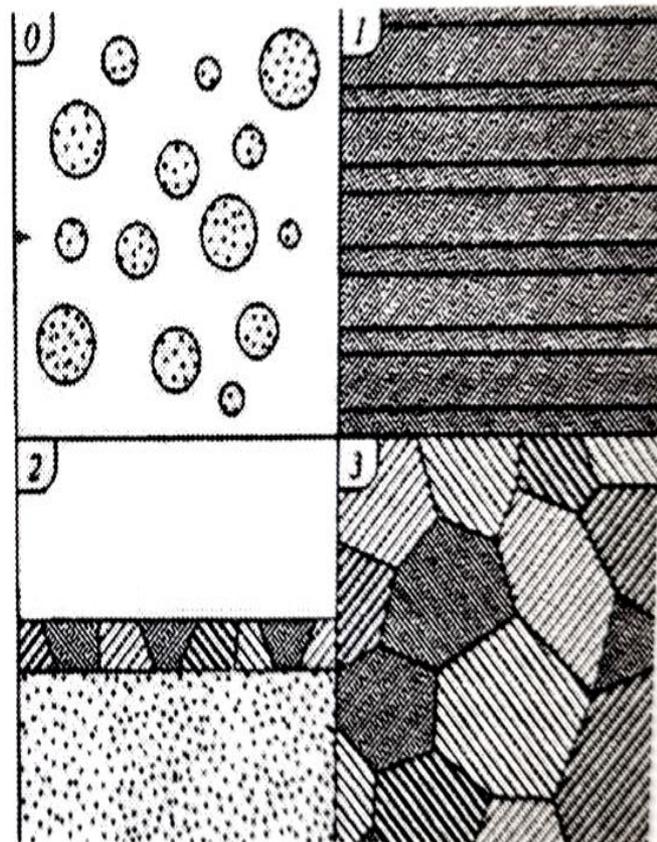
- В работе показано, что в результате многопроходной фрикционной перемешивающей обработки на подложке титанового сплава **Ti6Al4V** с внедренным медным порошком, сформировалась макроструктурно-неоднородная зона. Верхняя часть зоны перемешивания представляет собой мелкозернистую равноосную структуру  $\alpha$ - и  $\beta$ -Ti и **Ti2Cu**. Некоторые обедненные медью области  $\beta$ -Ti располагались вблизи интерметаллидов, испытавших  $\beta \rightarrow \alpha$  превращение, что обуславливает рост либо игольчатых зерен  $\alpha$ -Ti внутри бывших зерен  $\beta$ -Ti, либо рост речной структуры  $\alpha$ -Ti на границах зерен  $\beta$ -Ti. Микроструктура средней части зоны перемешивания, состоит из вышеописанных компонентов, но дополнительно содержит крупные статически рекристаллизованные бездислокационные зерна  $\beta$ -Ti, и зерна с модулированной структурой, возникшие в результате спинодального распада. Было высказано предположение, что верхняя часть зоны перемешивания содержит меньше меди по сравнению со средней частью зоны перемешивания. Такая разница также привела к более высокой микротвердости в средней части зоны перемешивания. Введение медного порошка в сплав **Ti6Al4V** позволило повысить твердость и улучшить износостойкость **Ti6Al4V/Cu**.



**НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

# КЛАССИФИКАЦИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Рис. 21.1. Классификация наноматериалов:  
0 – атомные кластеры и частицы,  
1 – многослойные и волокнистые материалы,  
2 – наноструктурные покрытия и пленки,  
3 – объемные наноструктурные материалы



# Коментарий

Уникальные свойства наноматериалов (частиц, волокон, пленок и объемных материалов с размерами фрагментов менее 100 нм) связаны следующим: **число атомов на поверхности нано объекта равно числу атомов в объёме**, что влияет на физико-химические свойства наноматериалов, которые в значительной степени определяются свойствами атомов, а при малых размерах фрагментов начинают проявляться *квантовые эффекты*.

Такие фундаментальные свойства химических элементов, как температура плавления, модуль упругости, электропроводность и другие, которые ранее считались структурно-независимыми, зависят от размера структурных фрагментов (размера частиц, размера зерна).

# Принципиальные схемы методов получения объёмных наноматериалов

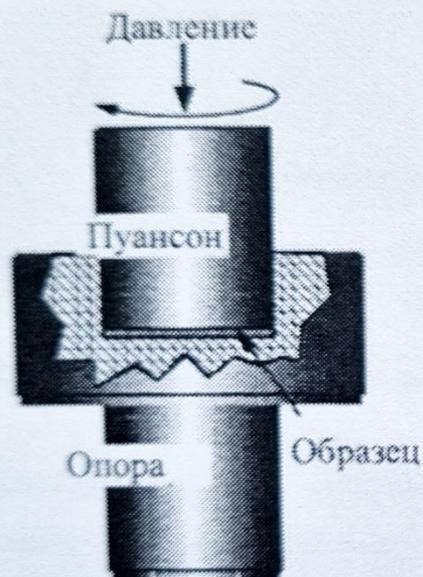


Рис. 21.24. Принципиальная схема метода интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением

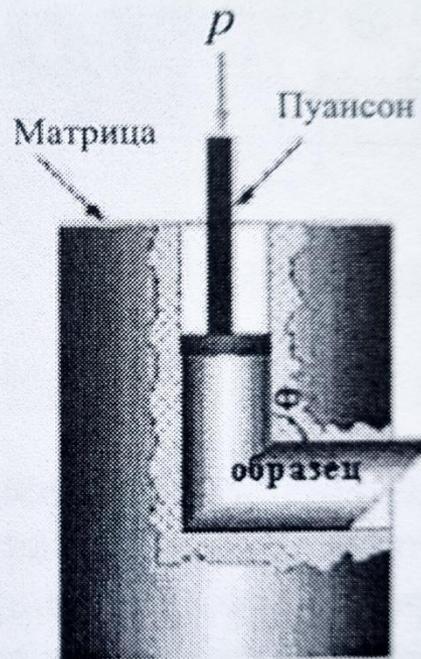


Рис. 21.25. Принципиальная схема метода равноканального углового прессования

# Соотношение характеристик для сталей



# Сравнительные характеристики алюминиевых сплавов



Рис. 21.29. Соотношения между прочностью и пластичностью для различных алюминиевых сплавов:

- 1 – сплав системы Al–Mg–Li после ИПД;
- 2 – компакты из порошков системы Al–Zr–Ni;
- 3 – сплав 5083; 4 – сплав системы Al–Mg–Cr–Zr после ИПД;
- 5 – компакты из порошков аморфного сплава  $Al_{85}Ni_5Y_8Co_2$

# Свойства алюминиевых сплавов



Рис. 21.28. Соотношение между износостойкостью и твердостью алюминиевых сплавов

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**