

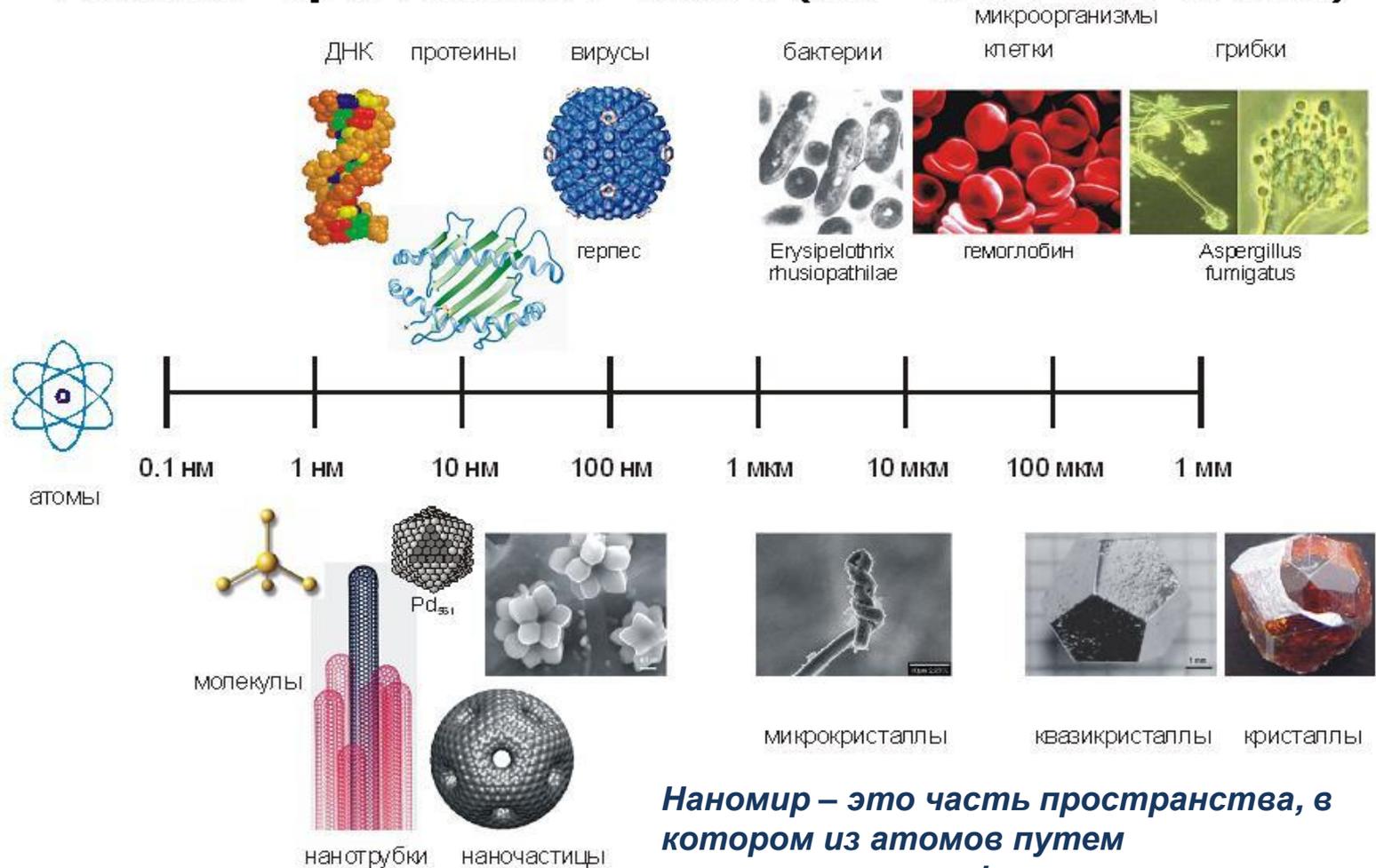


Эластомерные нанокомпозиты
Нанонаполнители для эластомеров
(Петрова Н.Н.)



Нанометрическая шкала

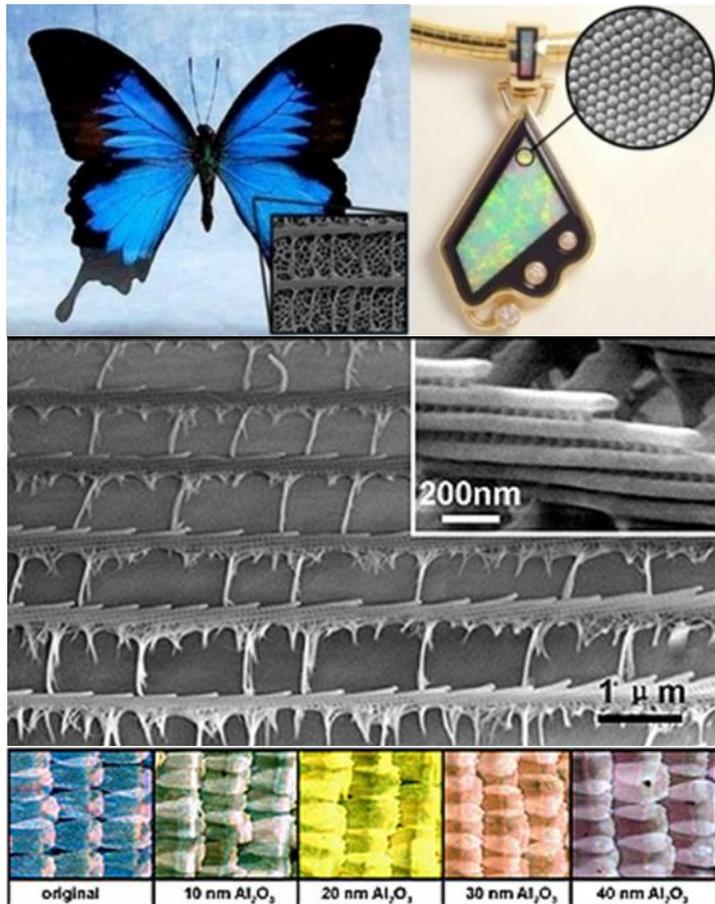
Нанометрическая шкала (по В.Я. Шевченко)



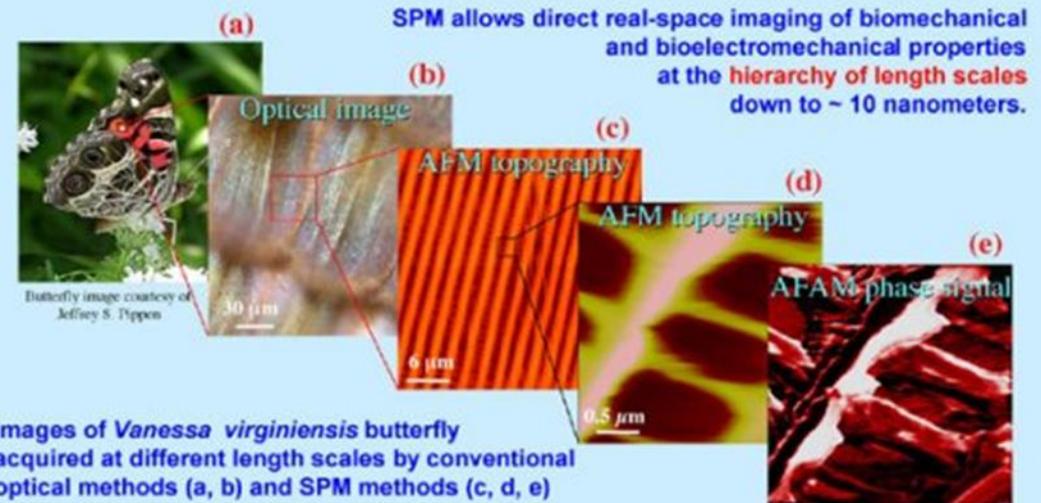
Наномир – это часть пространства, в котором из атомов путем самоорганизации формируется вещество, живое и неживое (В.Я. Шевченко, 2007 г.)



Нанотехнологии в природе



Scanning Probe Microscopy: Bioelectromechanical imaging at the nanoscale



The Team:

A. Gruverman (NCSU), S.V. Kalinin (ORNL)

Изображения крыла бабочки *Vanessa virginiensis*, полученные методом оптической (a, b) и электронной сканирующей микроскопии (c, d, e). В зависимости от толщины слоя оксида алюминия, окраска крыльев разная.



Исторический экскурс



Американский физик, Ричард Фейнман на встрече американской физической ассоциации, 1959 г.

Там, внизу, полно места!
"There's plenty of room at the bottom"



Герд
Биннинг

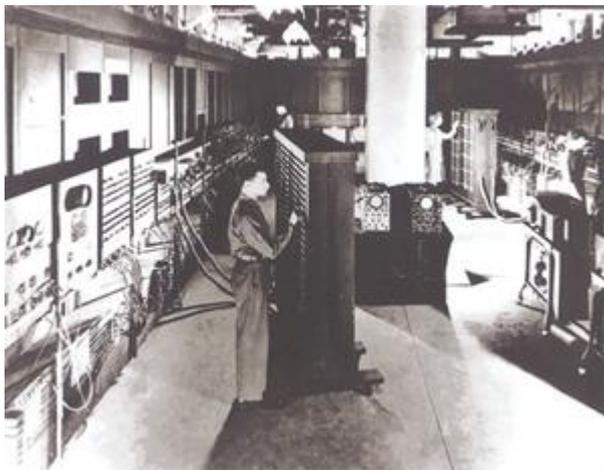


Генрих
Рорер

1981: сканирующий туннельный микроскоп
1986: атомно-силовой микроскоп

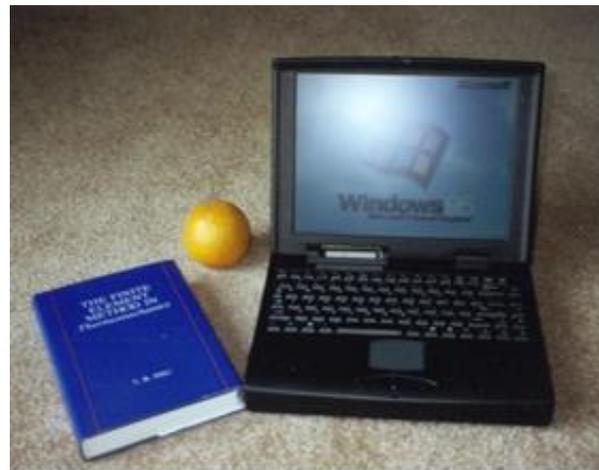


Миниатюризация – ведущая технология XXI века

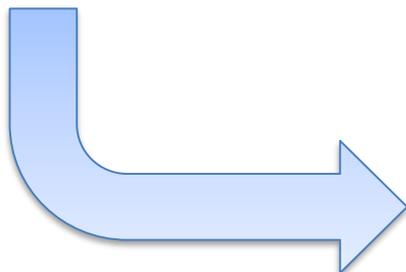


Компьютер ЭНИАК (1946)

Размер: меньше в 10^6 раз
Мощность: больше в 10^6 раз



Ноутбук (1996)



Размер: меньше в 10^8 раз
Мощность: больше в 10^8 раз



Карманные компьютеры в 2000, 2010 гг.

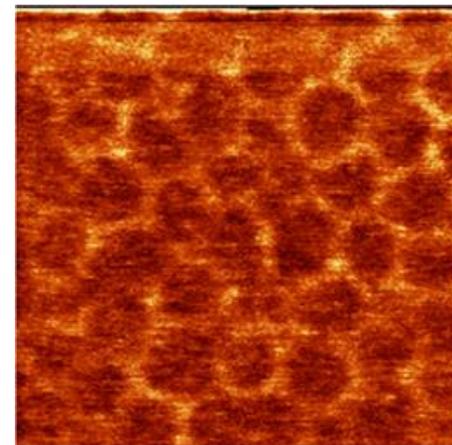
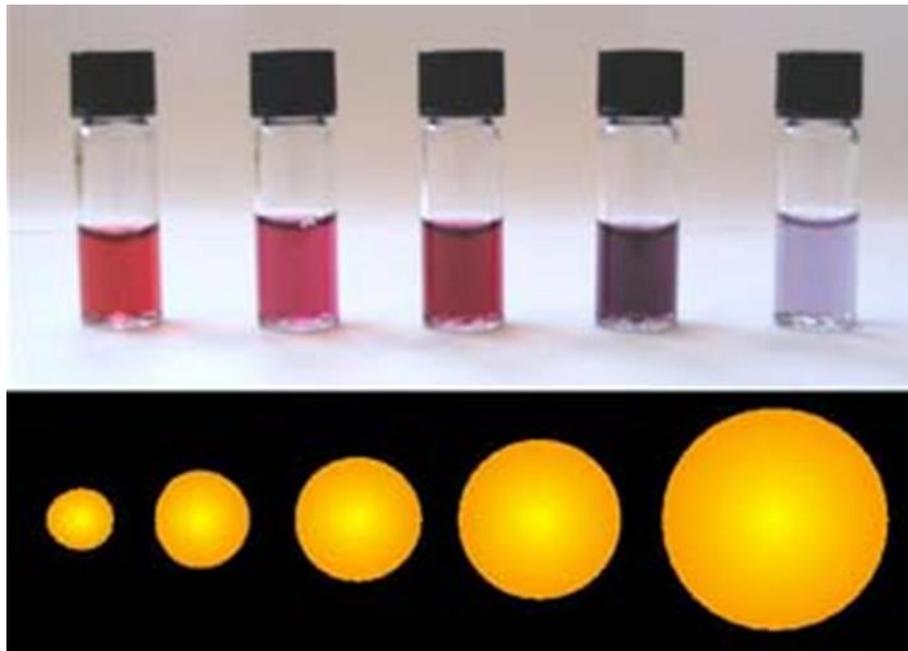


Зависимость свойств нанонаполнителей от степени дисперсности

- С уменьшением размера структурных составляющих значительно возрастает роль поверхностей раздела фаз и поверхностных явлений (адсорбция, адгезия и т.д.);
- Нанонаполнители обладают избытком свободной поверхностной энергии, что приводит к интенсификации всех физико-химических процессов и их активному взаимодействию с другими веществами;
- Многие свойства твердых тел (температура плавления, магнетизм, электропроводность, области прозрачности и т.д.) при уменьшении размеров до 10-20 нм и менее начинают зависеть от размеров частиц. Появляется возможность создания новых материалов не путем изменения химического состава компонентов, а в результате регулирования размера и формы частиц, составляющих систему;
- С уменьшением размера частиц их размер может быть соизмерим с характерным размером некоторых физических явлений (например, с длиной свободного пробега носителей в явлениях переноса). Это приводит к появлению размерных эффектов, которые носят квантовый характер (квантовые точки, квантовые ямы).



Золи нанозолота



14 нм,
красный цвет

Разные по толщине материалы отражают и поглощают свет по-разному. В зависимости от размера частиц золи золота выглядят по-разному.



Температура плавления наночастиц

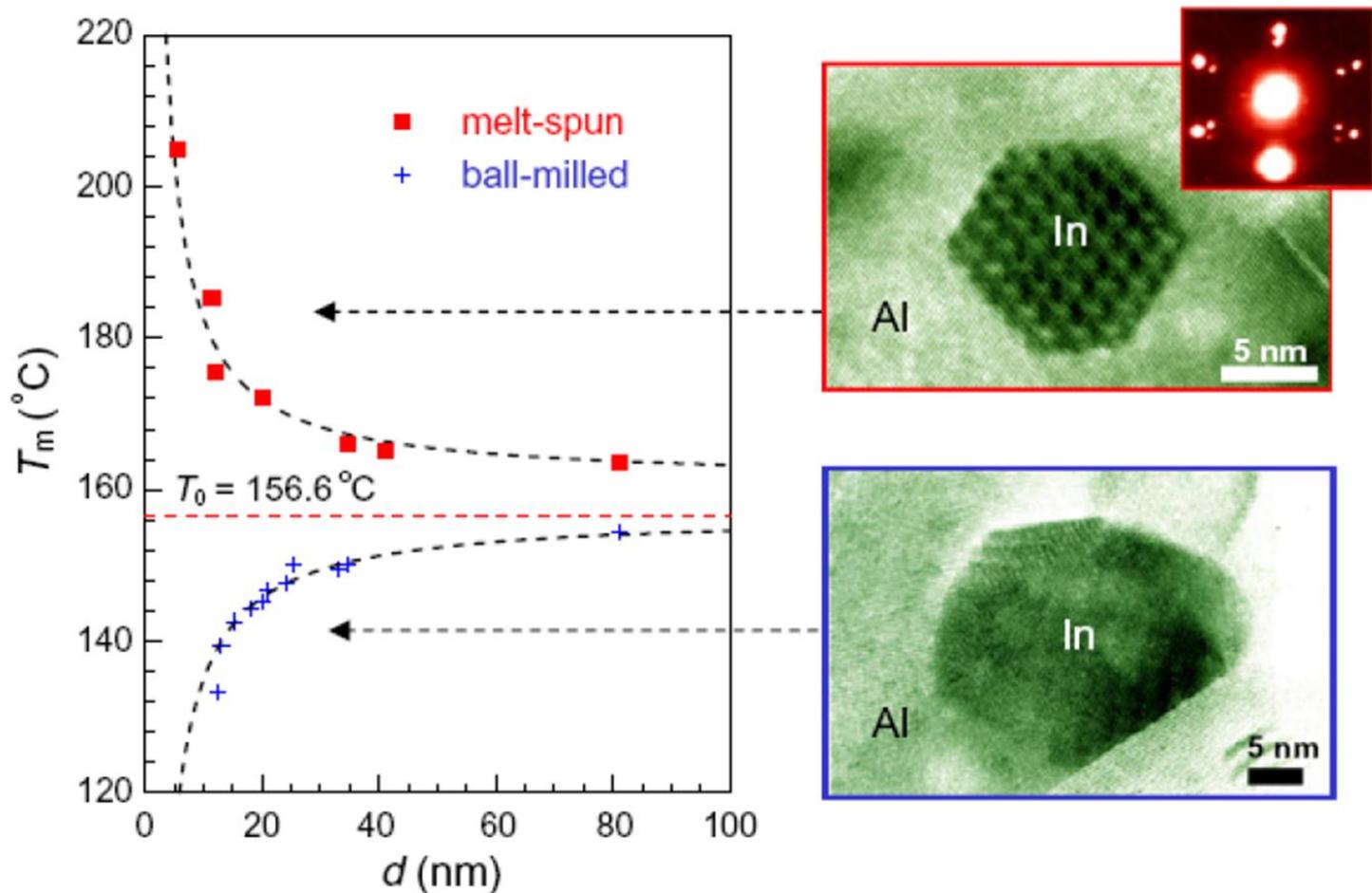
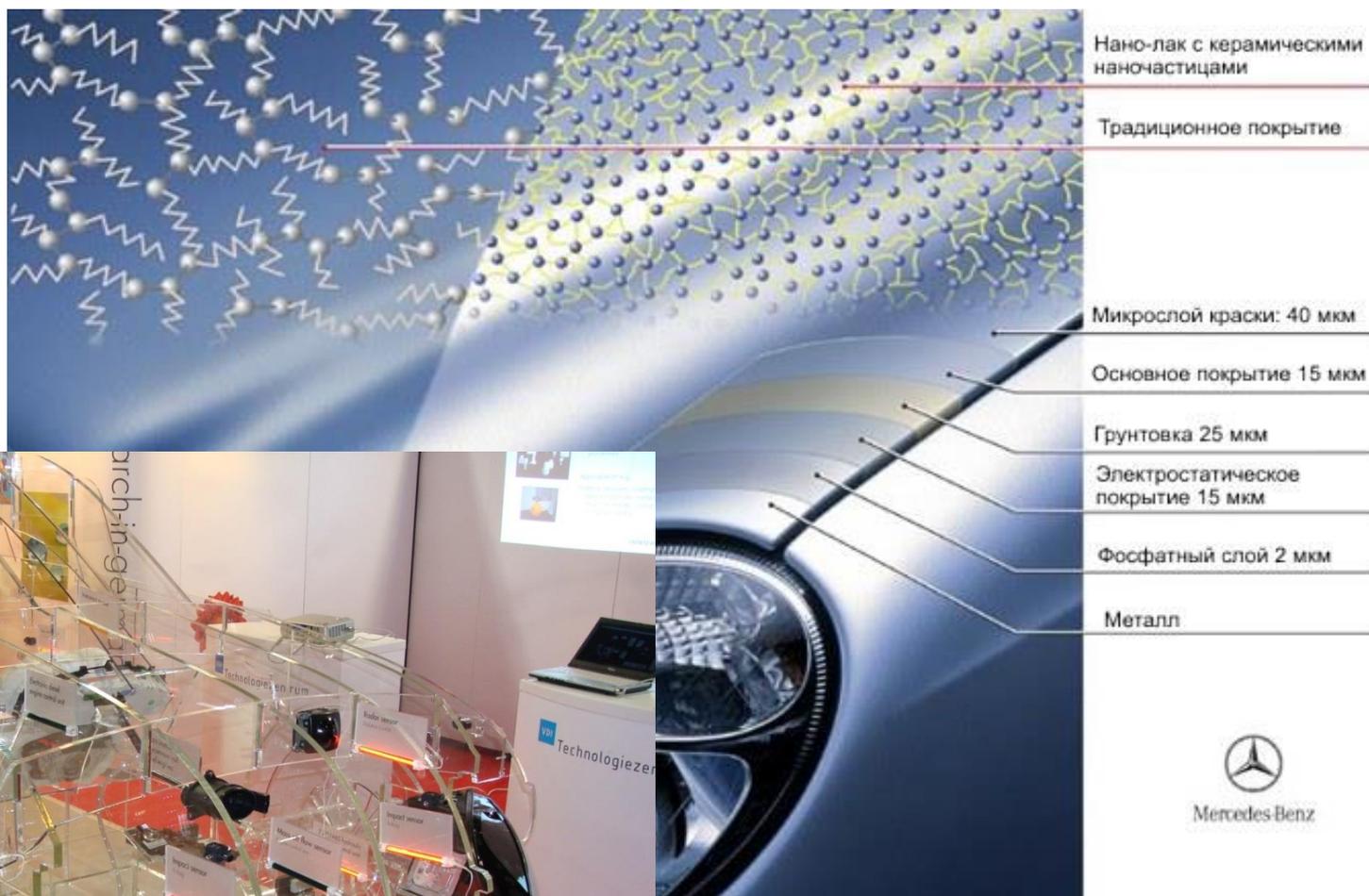


Рис. 1. Влияние диаметра наночастиц In на их температуру плавления в системе In – Al (матрица) в случае когерентных (■) и некогерентных (x) границ раздела [5]. Справа показаны электронно-микроскопические изображения частиц In.



Нанонаполнители для эластомеров

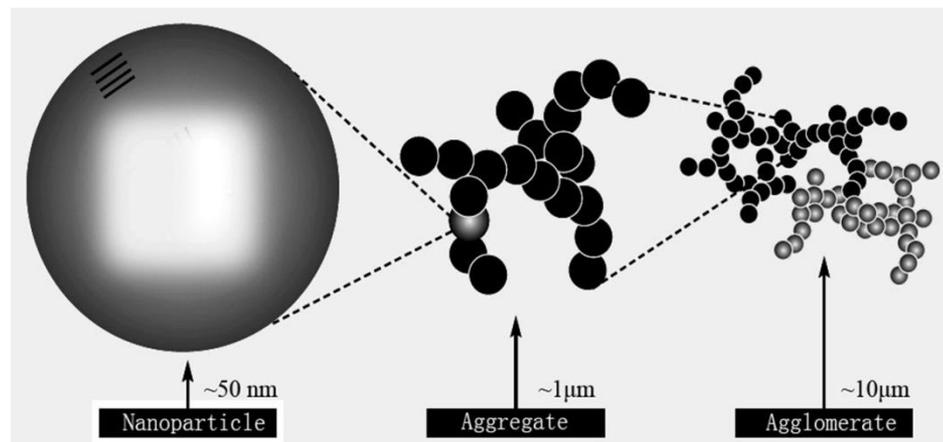


«Нанопolyмерный» автомобиль



Технический углерод

Технический углерод (ТУ) – наиболее массовый усиливающий наполнитель резин. По степени кристалличности ТУ занимает промежуточное положение между кристаллическим графитом и аморфным углеродом. Основными структурными единицами ТУ являются «частицы», которые ассоциируются в «агрегаты».



Наночастица

Агрегат

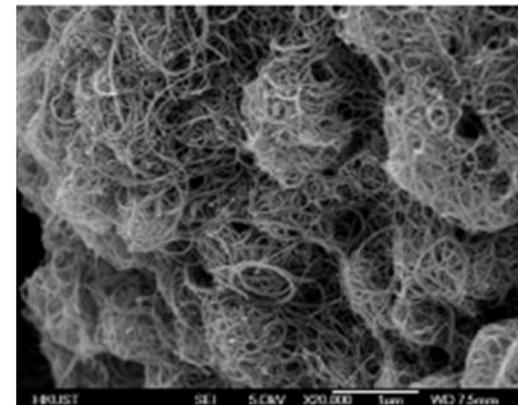
Агломерат

Марка техуглерода (ASTM)	Размер частиц D_{cp} , нм	Размер агрегатов $D_{арг}$, нм	Удельная поверхность, m^2/g
N110	27	93	143
N234	31	109	120
N550	93	240	41
N660	109	252	34

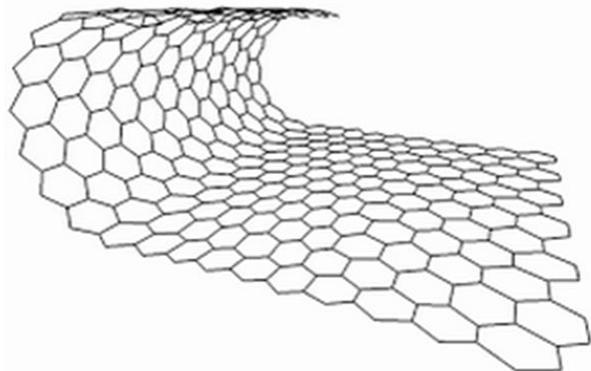


Углеродные нанотрубки и нановолокна

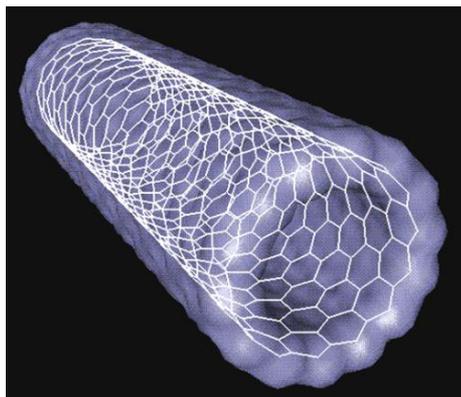
Углеродные нанотрубки и нановолокна – протяженные цилиндрические структуры диаметром от 1 до нескольких десятков нм до нескольких см. Состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов).



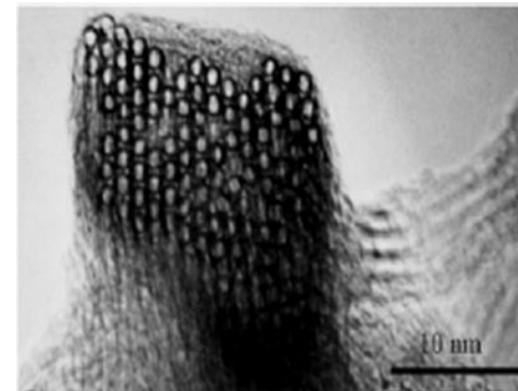
Электронная микрофотография МУНТ



«Сворачивание»
графеновой
плоскости в цилиндр



π -электронное облако
снаружи и внутри
углеродной трубки



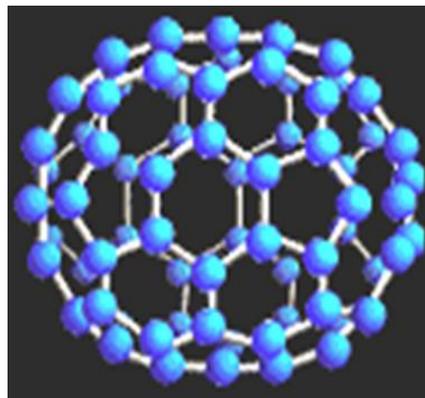
Электронная микрофотография УНТ



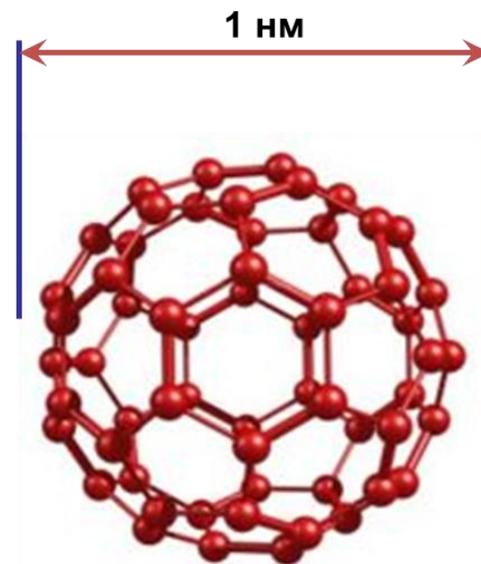
Фуллерены

Фуллерены – молекулярные соединения, принадлежащие к классу аллотропных модификаций углерода и представляющие собой выпуклые, замкнутые многоугольники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода

Фуллерены открыты в 1985 г. В 1996 г. за их открытие присуждена Нобелевская премия. Практически не растворимы в воде и других полярных растворителях, что сильно ограничивает их практическое применение



Фуллерен C₇₀



Фуллерен C₆₀ – состоит только из 60 атомов углерода



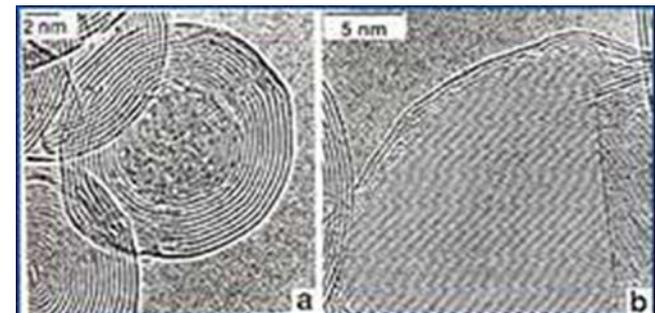
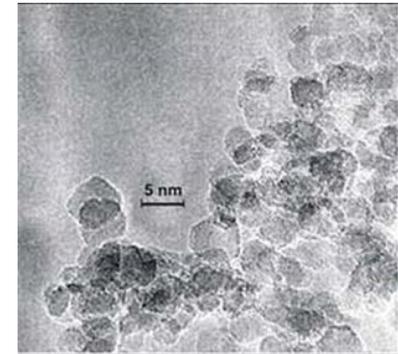
Наноалмазы

Наноалмазы, полученные с помощью детонационных технологий.

Наноалмазы – сложные объекты, обычно с трехслойной структурой, включающей: алмазное ядро размером 4-6 нм, переходную углеродную оболочку (промежуточный слой) вокруг ядра из рентгеноаморфных структур углерода толщиной 0.4 – 1.0 нм; поверхностный слой.

Свойства наноалмазов производства ЗАО «СИНТА»

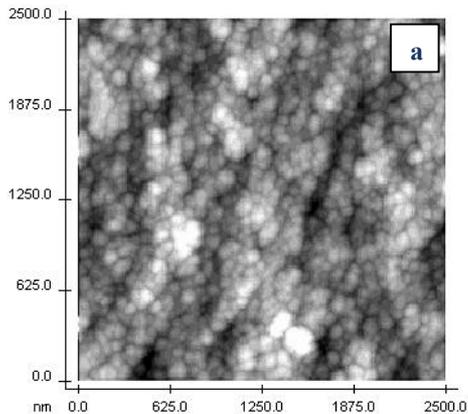
Тип материала	Описание материала	Характеристики	Применение
АШ-М1 Модифицированная алмазодержащая шихта, тип М1	Метод получения: Высокотемпературная обработка в среде различных газов Внешний вид: Черный порошок Размер и форма: Полидисперсный порошок (1-100 мкм) с неправильными частицами	Окисляемые формы углерода: 46,2% Удельная поверхность: 400 м ² /г Функциональные поверхностные группы: CO ₂ H, CH _x , C-N, C=N, N-H, C ₆ H _x Электрокинетический потенциал частиц близок к 0	Полимерные композиции
АШ-М2 Модифицированная алмазодержащая шихта, тип М2	округлой формы Размер единичного кристалла – 8-10 нм	Окисляемые формы углерода: 78,6% Удельная поверхность: 450 м ² /г Функциональные поверхностные группы: CO ₂ H, CH _x , C-N, N-H, C ₆ H _x Электрокинетический потенциал частиц близок к 0	
АШ-М3 Модифицированная алмазодержащая шихта, тип М3		Окисляемые формы углерода: 69,7% Удельная поверхность: 408 м ² /г Функциональные поверхностные группы: CO ₂ H, CH _x , C ₆ H _x Электрокинетический потенциал частиц близок к 0	





Шунгит

Шунгит – специфическая углеродсодержащая порода, шунгитовый углерод образует в породе матрицу, в которой диспергированы силикаты

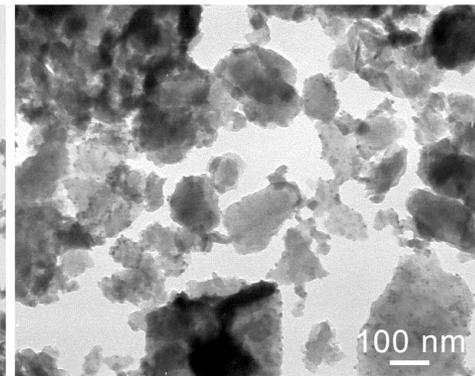
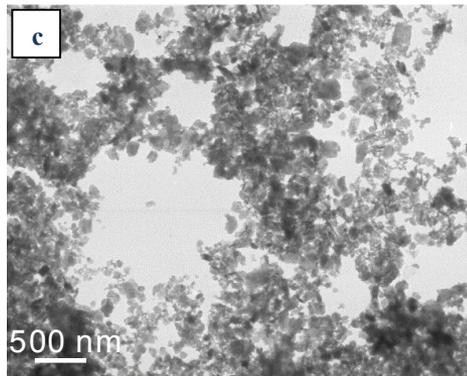
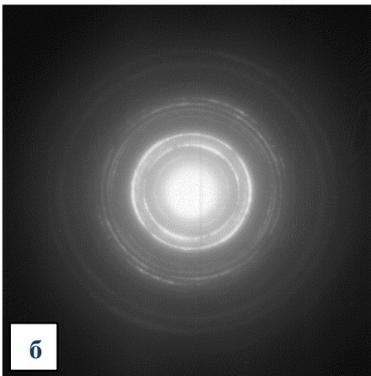


Атомно-силовая микроскопия скола высокоуглеродистого шунгита.

Средний размер глобулярного агрегата 32 нм (а).

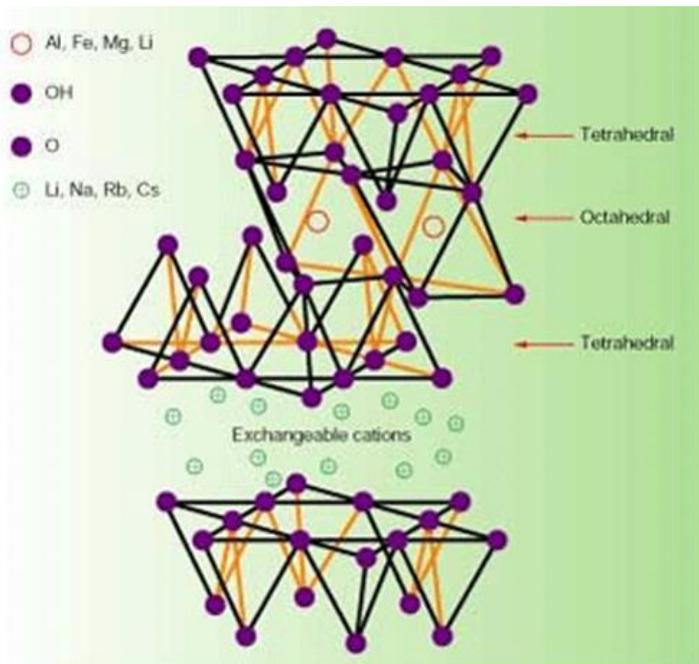
ПЭМ: Морфоструктура коллоида шунгита, осажденного на углеродную пленку и золотую сеточку (с).

Преобладающий тип электронограммы осадка коллоида шунгита (б)

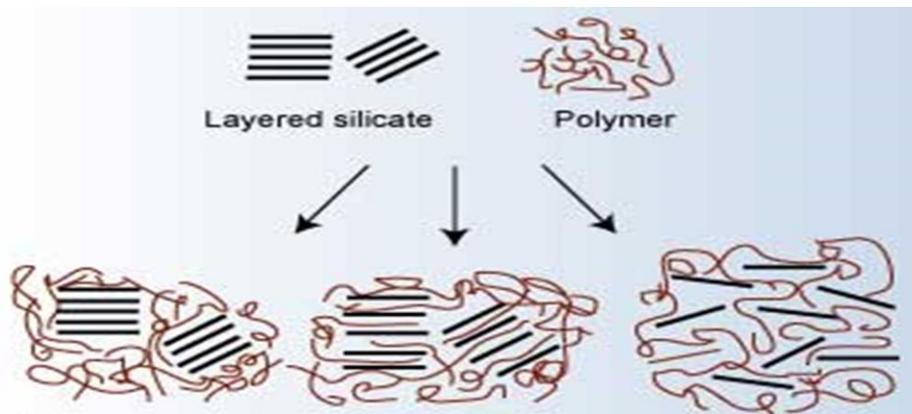
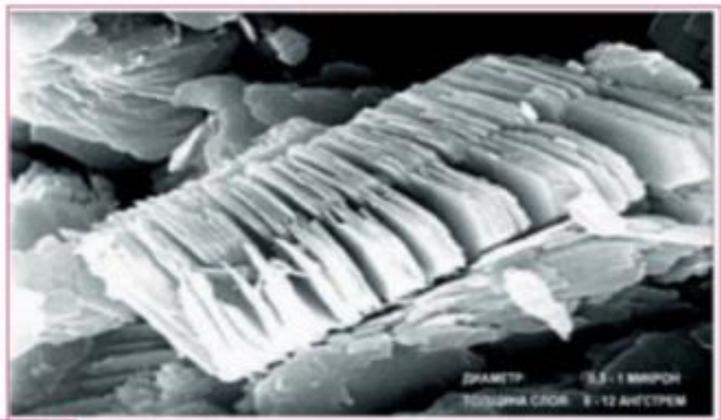




Слоистые алюмосиликаты (глины)



Слоистые алюмосиликаты (глины) – слоистые природные неорганические структуры, такие как монмориллонит, гекторит, вермикулит, каолин, сапонин и др., где размеры неорганических слоев составляют порядка сотен нм в длину и 1 нм в ширину.

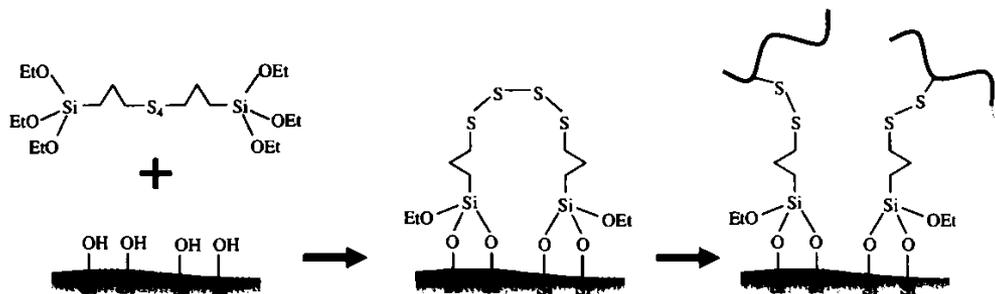


Микрокомпозит Интеркалированный нанокompозит Эксфолированный нанокompозит

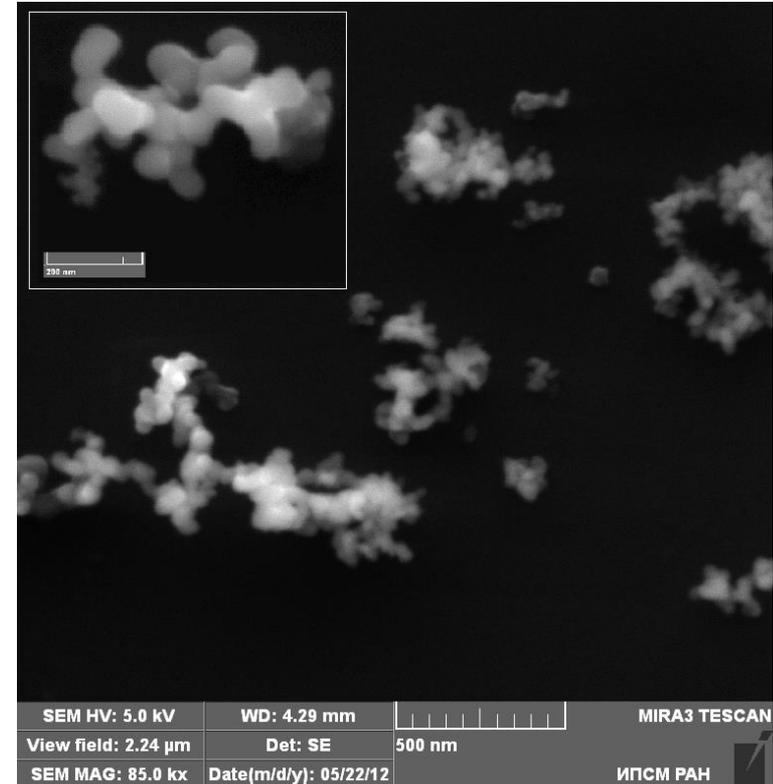


Аэросил (белая сажа)

Аэросил (белая сажа) – высокодисперсный (5-40 нм), высоко-активный, аморфный, пирогенный диоксид кремния (SiO_2), получаемый пламенным гидролизом SiCl_4 высокой чистоты. В отличие от ТУ для усиления эластомеров, помимо SiO_2 , необходимо использовать связывающий агент, например, триэтоксисилилпропилтетрасульфид (ТЭСПТ).



Взаимодействие ТЭСПТ с поверхностью аэросила





Методы определения характеристик промышленных нанообъектов

Нанонаполнители характеризуются определенными

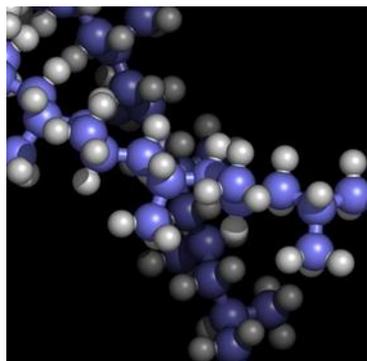
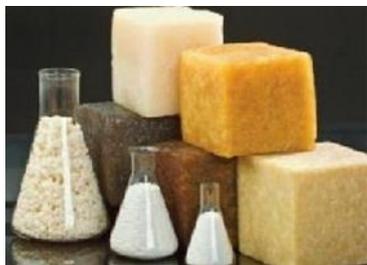
- геометрическими параметрами,
- удельной поверхностью,
- химической структурой
- и физико-химическими свойствами,
- своей химией поверхности
- и морфологическими особенностями.

Огромный запас поверхностной энергии, присущий наночастицам, способствует изменению их свойств при хранении и дальнейшей переработке. Для того, чтобы быть уверенными, что исследователь имеет дело именно с наночастицами, необходимо контролировать параметры, которые приведены в

**ГОСТ Р 55723-2013/ISO/TS 12805:2011.
«Методы определения характеристик
промышленных нанообъектов»**



Методы определения характеристик промышленных нанобъектов



ГОСТ Р 55723-2013/ISO/TS 12805:2011. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННЫХ НАНООБЪЕКТОВ

1. Методы, применяемые для контроля качества материалов в промышленных условиях, с использованием стандартного оборудования.

2. Методы, применяемые для контроля качества материалов в отдельных случаях, с использованием специального оборудования.

Промышленные
нанобъекты

3D- наночастицы

2D- нановолокна

1D- нанопластины



Методы контроля качества нанонаполнителей с помощью стандартного оборудования

Средний размер частиц и гранулометрический состав

- Рассеяние света и дифракция, ИСО 13320-1 или ИСО 21501-2
- Спектроскопия с фотонной корреляцией, ИСО 13321 и ИСО 22412
- Электрокинетическая звуковая амплитуда

Средний размер и распределение по размерам первичных кристаллических частиц

- Уширение дифракционных линий рентгеновских лучей, ЕН 13925-1, ЕН 13925- 3

Степень агрегации/ агломерации

- Вычисление коэффициента агрегации/ агломерации

Площадь поверхности и удельная площадь поверхности

- Метод БЭТ, ИСО 9277 и ИСО 18757

Пористость

- Ртутная пикнометрия или порометрия (с использованием адсорбции газа)

Кристаллическая структура, степень кристалличности, кристаллографическая анизотропия

- Рентгено-структурный анализ, ЕН 13925-1, ЕН 13925- 3

Дисперсность в жидкостях

- Определение - Z потенциала, ИСО 20998-1
- Реометрия, ИСО 6721-10



Методы контроля качества нанонаполнителей с помощью стандартного оборудования

Дисперсность в твердых матрицах

- Рентгено-структурный анализ, ЕН 13925-1, ЕН 13925-3

Химическая чистота

- Термографический анализ

Текучесть порошка

- Определение с помощью прибора кольцевого сдвига
- Определение с помощью прибора Холла, ИСО 4490
- Определение коэффициентов уплотнения и текучности
- Определение с помощью прибора сдвиговых испытаний Дженике

Плотность порошка после его утряски

- Для металлических порошков ИСО 3953, для керамических порошков ИСО 23145-1

Насыпная плотность порошка

- Метод с использованием воронки ИСО 3923-1, и метод волюметра Скотта ИСО 3923-2

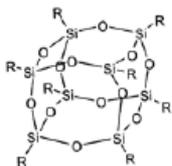
Морфология поверхности

- Конфокальная микроскопия
- Электронная микроскопия, ИСО 13322-1



Примеры использования нанонаполнителей для улучшения свойств полимерных композитов*

Нанонаполнитель	Улучшаемое свойство	Применение
Эксфолиированная глина	Негорючесть, барьерные свойства, совместимость полимерных смесей	
ОУНТ; МУНТ	Электропроводность, перенос заряда	Электротехнические материалы, материалы для электроники и оптоэлектроники
Нано Ag	Антимикробные свойства	
Нано ZnO	Поглощение УФ	Защитные УФ экраны
Кремнезем	Модификация вязкости	Краски, адгезивы
Нано CdSe; CdTe	Перенос заряда	Фотопреобразователи
Графен	Электропроводность, барьерные свойства, перенос заряда	Электротехнические материалы, материалы для электроники
ПОСС	Улучшение стабильности, негорючесть	Сенсоры, светоизлучающие диоды





Эластомерные нанокомпозиты
Особенности введения
нано наполнителей в эластомерные
КОМПОЗИЦИИ



Примеры использования нанонаполнителей для улучшения свойств полимерных композитов

- Наночастицы являются более эффективными усиливающими наполнителями, вследствие малого содержания их в полимере, что вызывает значительное улучшение свойств матрицы, приводит к получению композитов с низкой стоимостью и легкой перерабатываемостью.
- В случае применения наночастиц передача нагрузки от матрицы к наполнителю является более эффективной за счет их большой удельной поверхности при условии хорошей адгезии на границе раздела фаз.
- Длина распространения трещины на границе раздела фаз становится больше из-за уменьшения размера наночастиц, улучшаются прочность и жесткость материала.
- В зависимости от выбранного нанонаполнителя, полученные нанокompозиты могут иметь более высокий по сравнению с исходным материалом комплекс свойств, а также приобрести новые качества (повышенная усталостная выносливость, барьерные свойства, огнестойкость и т.д.).



Эластомерный нанокompозиты

Эластомерный нанокompозиты (ЭН) - каучуки, резины, термопласты, олигомерные эластомерные материалы, которые содержат гетерофазу размером порядка 20-100 нм.

«Старые» ЭН *

- Саженаполненные вулканизаты,
- кристаллизующиеся каучуки и резины,
- термоэластопласты – трех и многоблочные эластомеры и динамические вулканизаты,
- вулканизаты функционально активных эластомеров,
- продукты гетерогенной вулканизации солями непердельных кислот, олигоэфиракрилатами и смолами.

«Новые» ЭН*

Композиции эластомеров с

- глинами,
- монтмориллонитом,
- нанокуглеродными наполнителями,
- наноорганикой,
- нанонорганикой и т.д.

* - по классификации, предложенной Морозовым Ю.Л. (ВНИИЭМИ, 2011)



«Старые» эластомерные нанокомпозиты



а

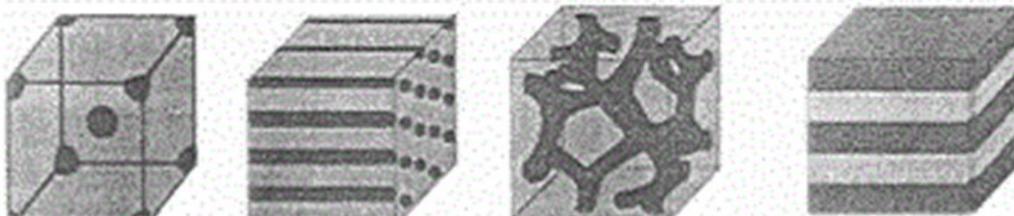
б

в

г

Типы кристаллических образований в полимере:
а - кристаллит, в - радиальные сферолиты,
б - фибрилла, г - кольцевые сферолиты.

Размеры единичных кристаллитов составляют примерно 1 нм.



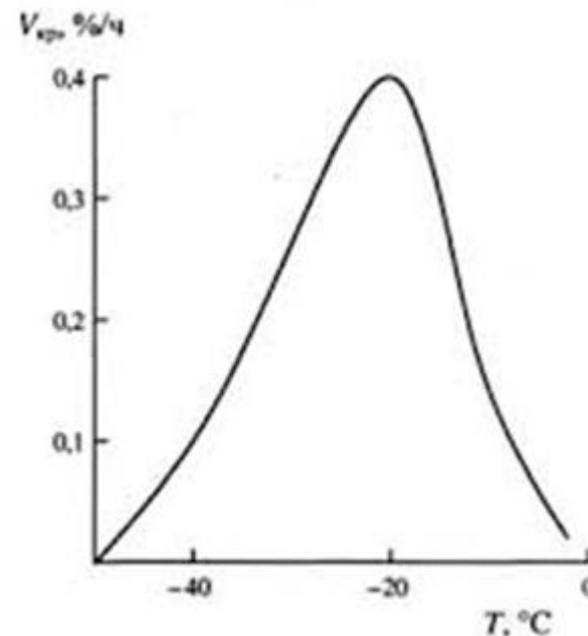
S

C

G

L

Морфология расплавов линейного диблок-сополимера при сильной сегрегации. Обозначения:
S – сферическая, C – цилиндрическая,
G – гироидная, L – ламеллярная.

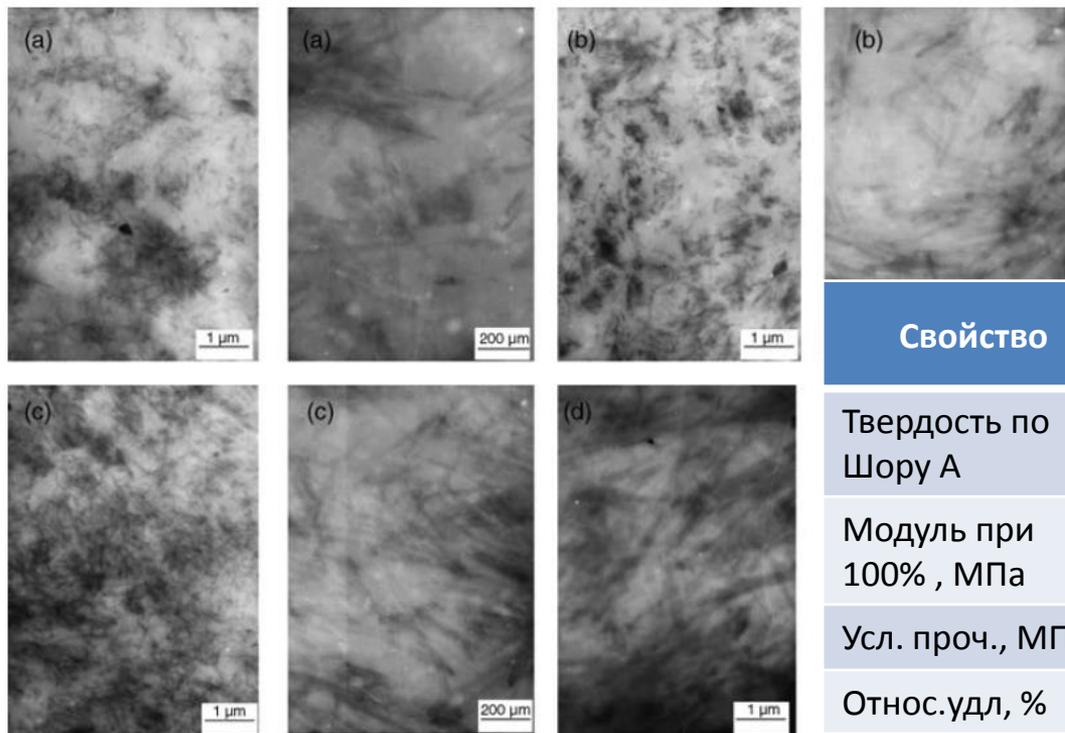


Зависимость скорости кристаллизации натурального каучука от температуры.



«Новые» эластомерные наноккомпозиты

Резины на основе бутадиен-стирольного каучука и слоистых алюмосиликатов



Свойство	30 мас.ч.	40 мас.ч.	50 мас.ч.	60 мас.ч.
Твердость по Шору А	69	73	75	79
Модуль при 100% , МПа	7,3	7,6	7,8	10,2
Усл. проч., МПа	14,1	14,7	14,4	18,8
Относ.удл, %	350	344	336	309

Результаты трансмиссионной микроскопии резин на основе БСК и $Mg_5[Al]Si_8O_{20}(OH)_2(OH_2)4xH_2O$:

а) 30 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука
с) 50 мас.ч.

б) 40 мас.ч.
д) 60 мас.ч.



Введение нанонаполнителей в эластомерные композиции является эффективным при выполнении следующих условий:

- Наночастицы должны иметь узкое распределение по размерам;
- Типичные (линейные) размеры наночастиц и средние расстояния между наночастицами, диспергированными в полимерной матрице, не должны сильно отличаться от значений величин радиусов инерции макромолекул;
- Взаимодействие наночастица-матрица должно быть оптимальным для того, чтобы обеспечить возможность их диспергирования и последующую иммобилизацию в матрице, и предотвратить агрегацию наночастиц при обработке материала или его длительном хранении;
- Наночастицы должны быть равномерно распределены в эластомерной матрице.



Способы введения нанонаполнителей в эластомерные композиции

- В процессе синтеза эластомера;
- Смешение в расплаве традиционным образом (вальцы, закрытые резиносмесители);
- Растворные методы (набухание в растворе каучука, взаимодействие с активным олигомером);
- Получение нанокомпозитов из латексов;
- Синтез *in situ*, золь-гель анализ.

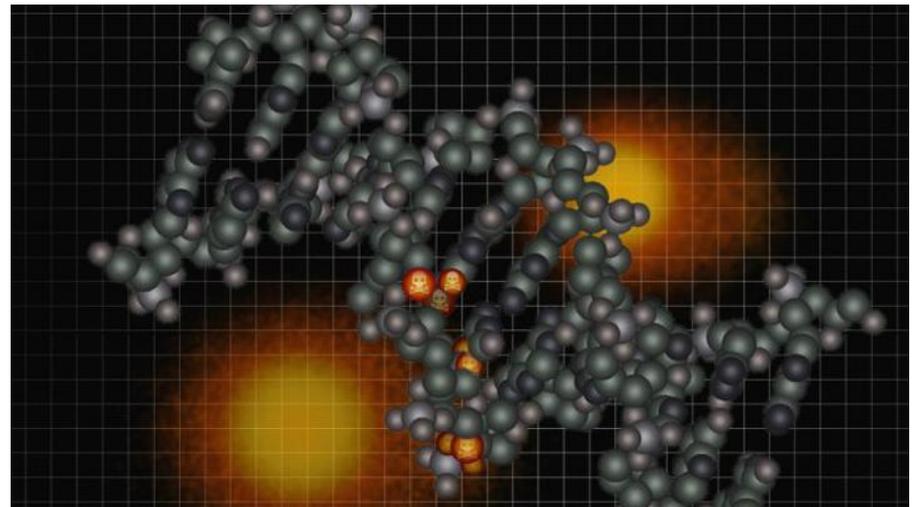
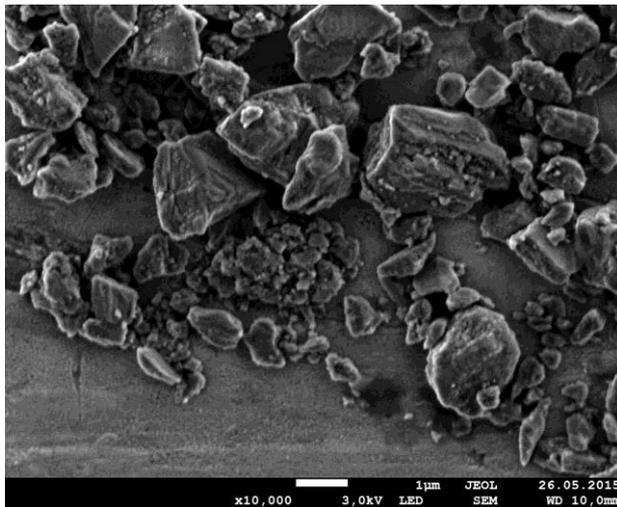
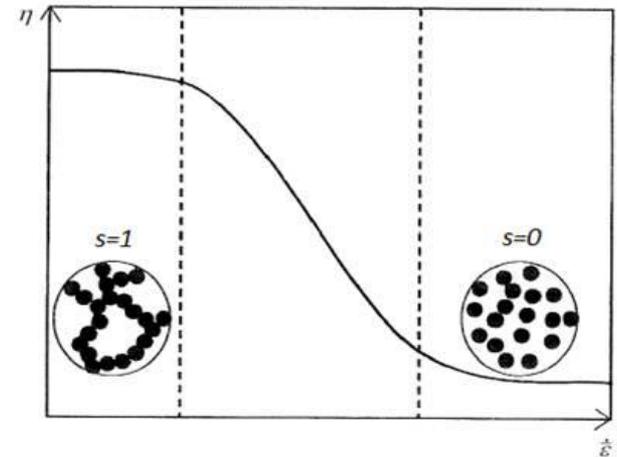
Предварительная модификация нанонаполнителя:

- Способствует хорошему диспергированию наполнителя в полимерной матрице;
- Модифицированный нанонаполнитель лучше взаимодействует с макромолекулами;
- Обработка ПАВ, прививка функциональных групп и т.д. придает новые свойства нанонаполнителю.



Проблемы, возникающие при работе с нанонаполнителями

- Наночастицы имеют тенденцию агрегировать во время процесса производства и хранения.
- Сложно добиться равномерного распределения нанонаполнителя в эластомерной матрице.
- Угрозы здоровью и окружающей среде могут возникнуть при производстве, использовании и утилизации нанокompозитов.





Механоактивация

Усиливающее действие наполнителей определяется в основном удельной поверхностью и адсорбционной активностью.

Механоактивационные методы диспергирования позволяют переводить твердые вещества в неравновесное метастабильное состояние.

Перспективность технологий механической активации порошковых материалов связана с низкими энерго- и металлоемкостью оборудования, экологической безопасностью процесса, возможностью расширения сырьевой базы.

Механоактивация позволяет восстанавливать первоначальное распределение наночастиц по размерам.

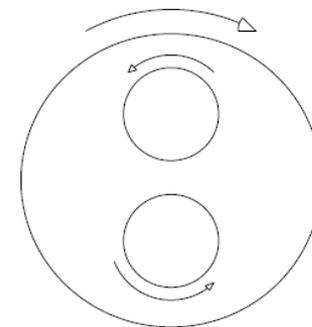
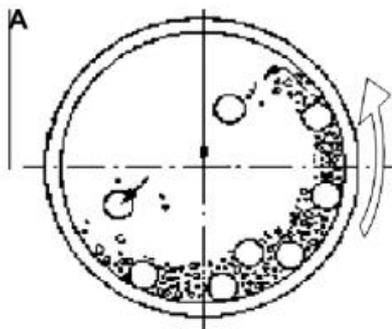


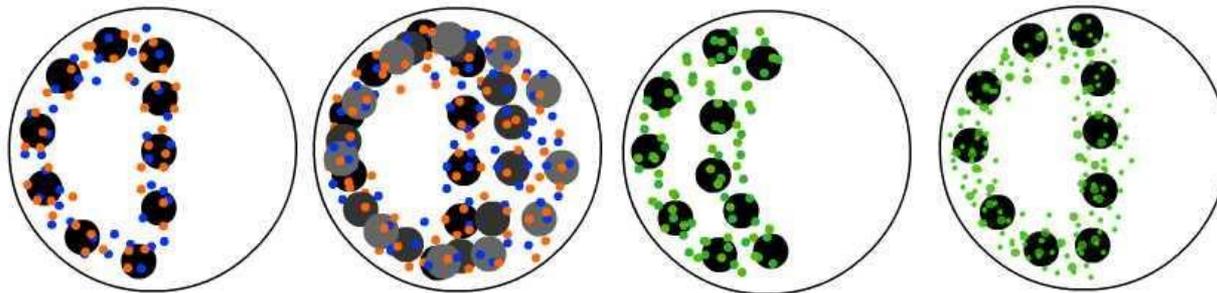
Схема вращения основных элементов планетарной мельницы





Основы механоактивации

- Импульсный характер процесса (чередование процессов возникновения поля напряжения и его релаксации).
- Локальный характер механического воздействия на вещество (при механической обработке поле напряжений возникает не во всем объеме твердой частицы, а только на ее контакте с другой частицей или рабочим телом).
- При проведении процесса возможно протекание химических процессов, вызванных напряжением, а также химическая модификации поверхности наполнителя.





Планетарная мельница АГО-2

Технические характеристики АГО-2

Режим работы	Дискретный
Максимальный исходный размер частиц материала, мм	3
Размер частиц на выходе, мкм	1
Количество и объем барабанов, мл	2×150
Мелющие тела	Шары 6-10 мм
Охлаждающая жидкость	вода
Частота вращения барабанов в переносном движении, об/мин	1290, 1820, 2220
Центробежное ускорение, развиваемое мелющими телами, м/с ²	300, 600, 1000
Мощность электродвигателя, кВт	1,1
Габаритные размеры, мм	500×220×370

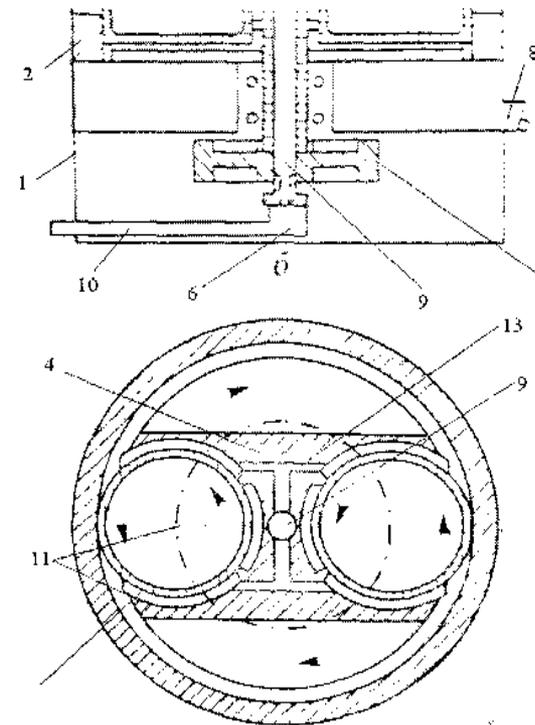
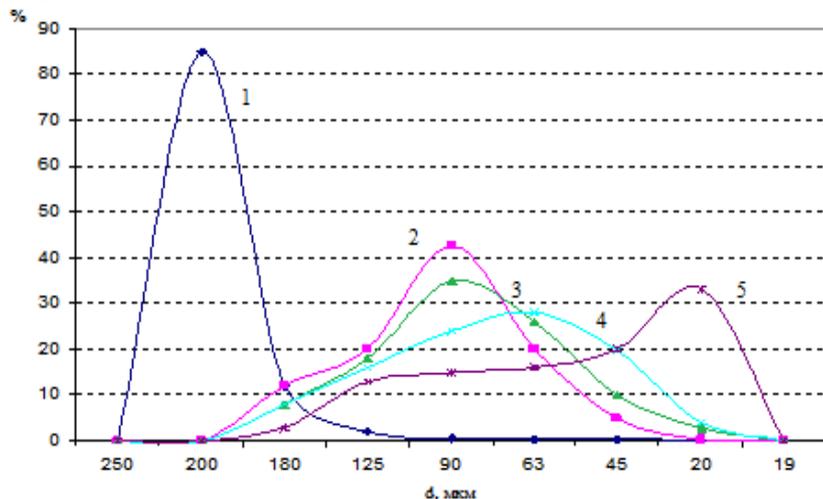


Схема планетарной мельницы АГО-2:

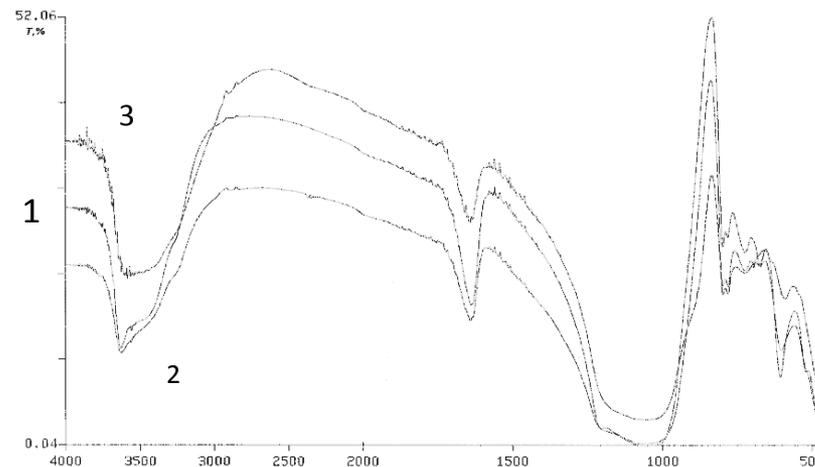
- каркас – 1
- стойка – 2
- корпус – 3
- крышка – 4
- вал – 5
- водило – 6
- штуцер – 7
- шкив – 8
- барабаны – 9
- откидные болты – 10



Характеристики цеолитов до и после механоактивации



Распределение частиц цеолитов по размерам в зависимости от продолжительности механоактивации:
1 – исходный образец; 2 – 1 мин;
3 – 2 мин; 4 – 3 мин; 5 – 5 мин.



ИК – спектры порошков природных цеолитов:
1 – исходные;
2 – прокаленные в муфельной печи;
3 – активированные в планетарной мельнице АГО-2.

Текстурные характеристики

Показатели	Неактивированный	Активированный
	цеолит	цеолит
Удельный объем пор, см ³ /г	0,017	0,028
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	13,848	17,166

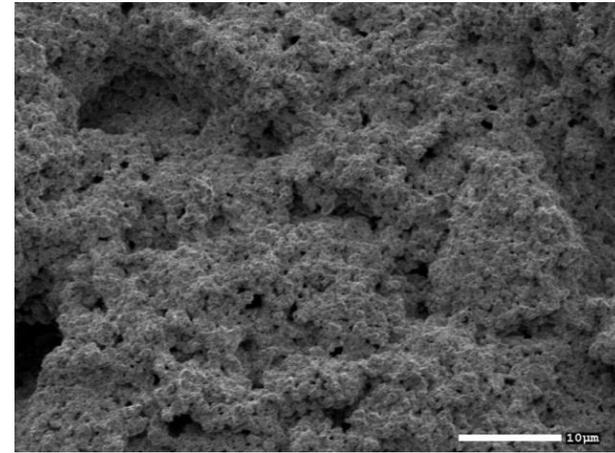
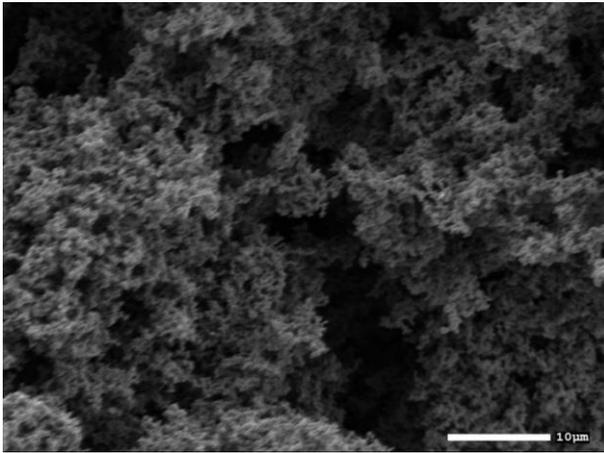


Технический углерод П-803 до и после механоактивации

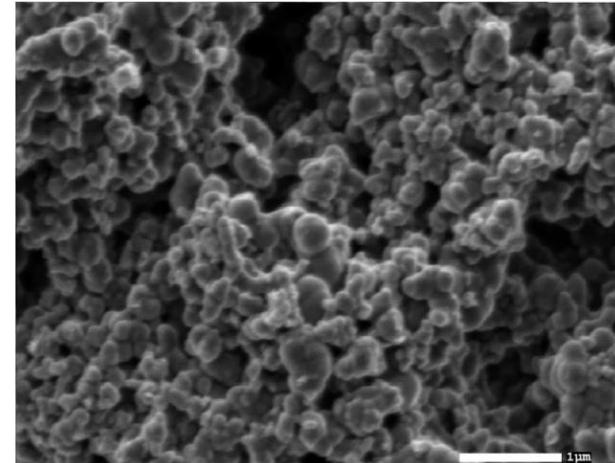
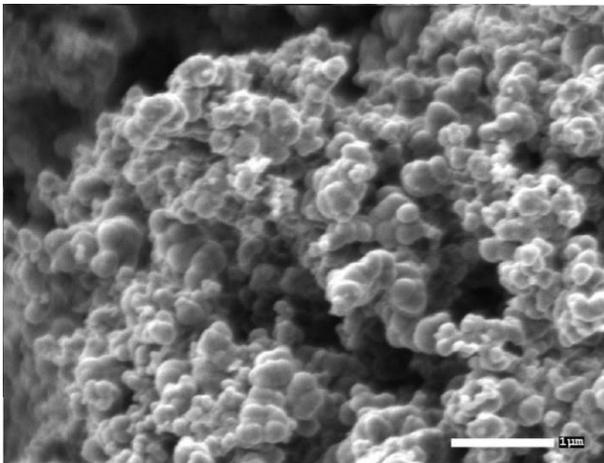
До

После 2 мин
механоактивации

×2000



×20000





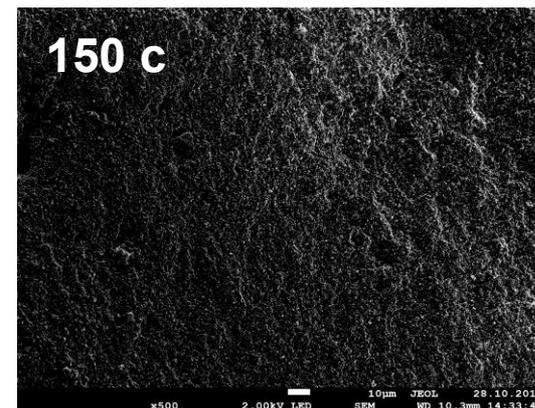
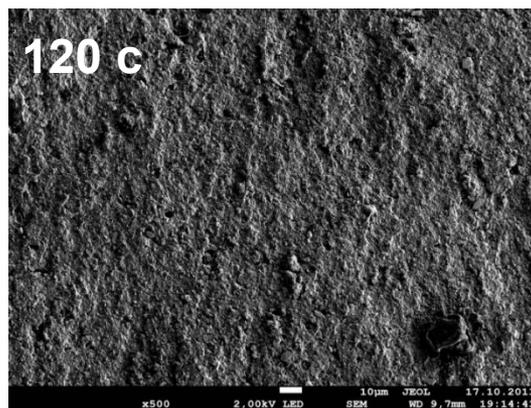
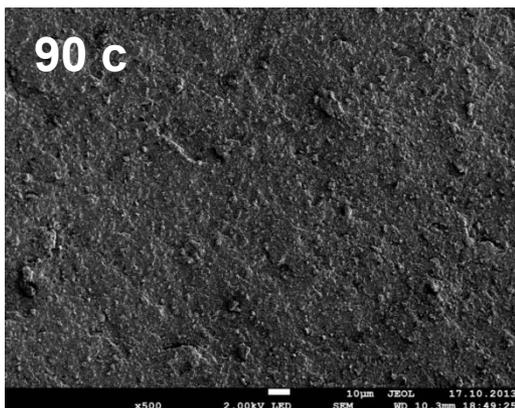
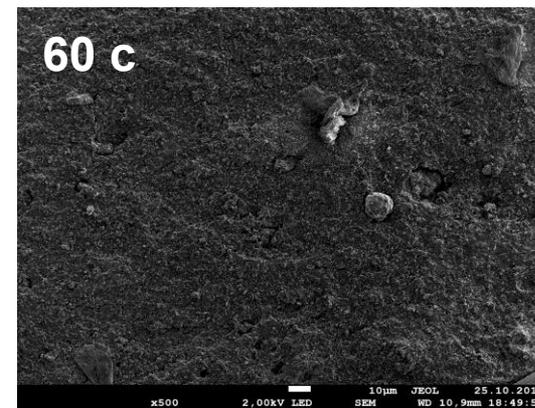
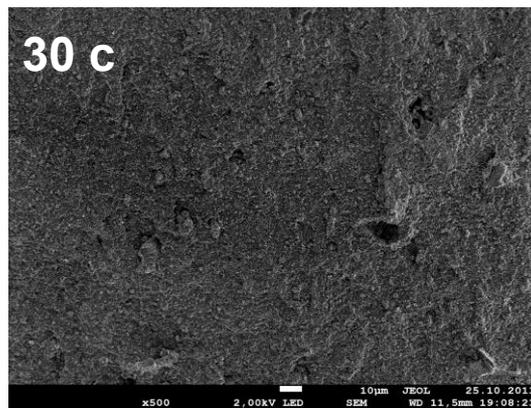
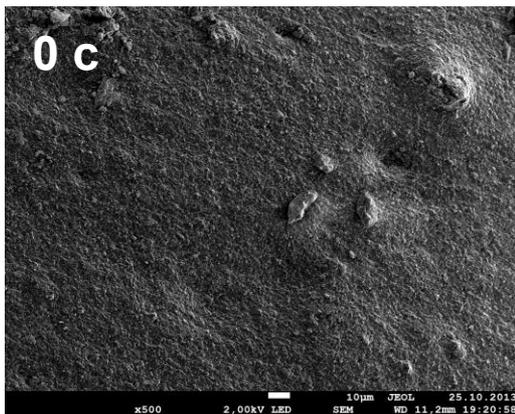
Результаты исследования ТУ на сорбтометре

Марка ТУ	Время активации, сек	Удельная поверхность, м2/г	Удельная поверхность, м2/г, по паспорту
П803	0	9,96	13 - 18
	30	10,60	
	60	14,94	
	90	13,13	
	120	22,60	
	150	20,96	
	180	29,49	
N774	0	14,66	28-32
	90	26,94	
N550	0	33,00	39-43
	90	40,90	



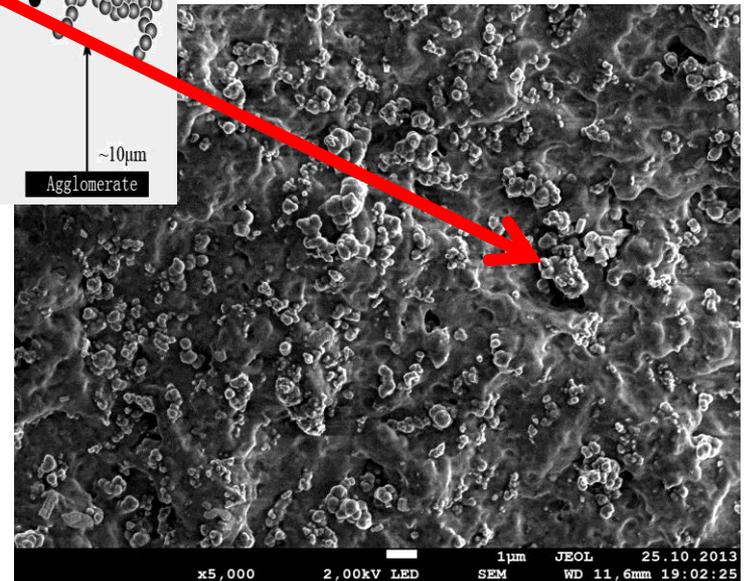
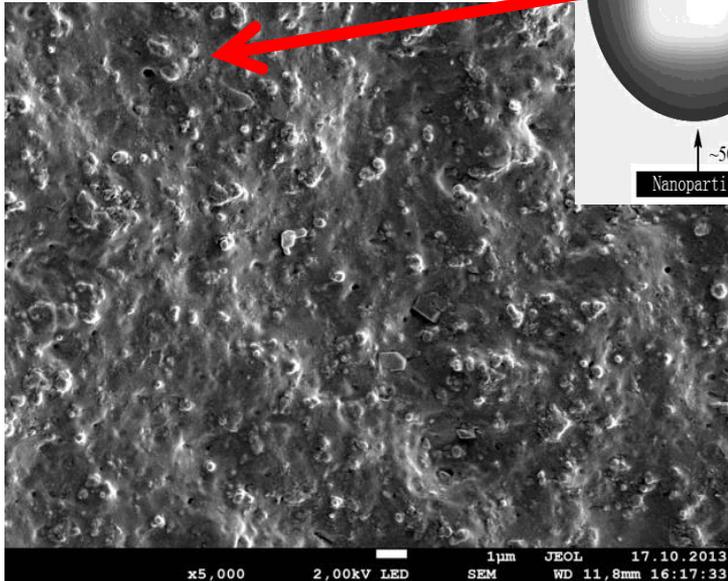
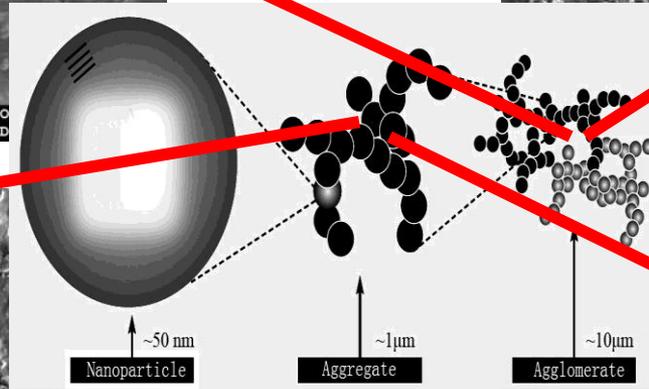
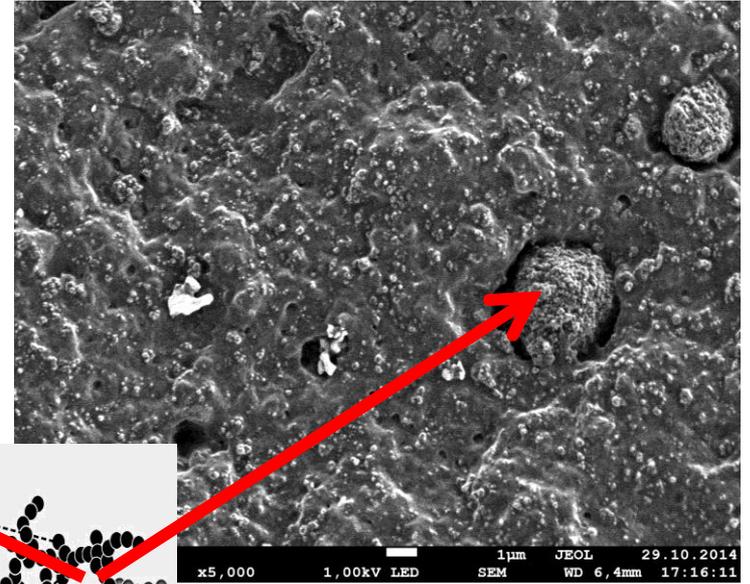
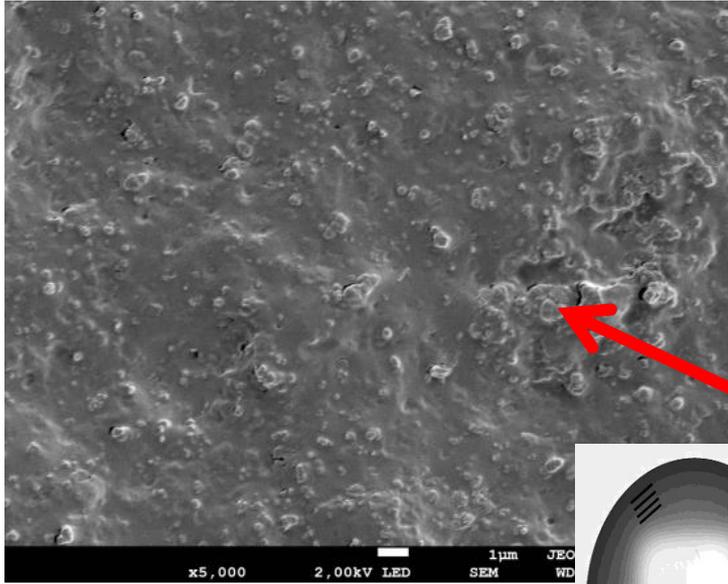
Активация резин, содержащих ТУ

Электронные микрофотографии образцов резин, содержащих ТУ с различной продолжительностью активации, при увеличении x500





Активация резин, содержащих ТУ



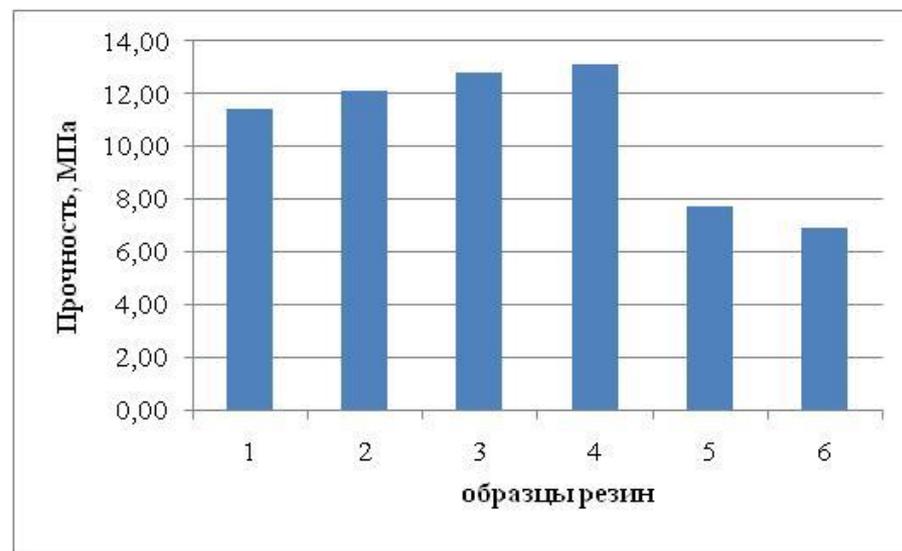
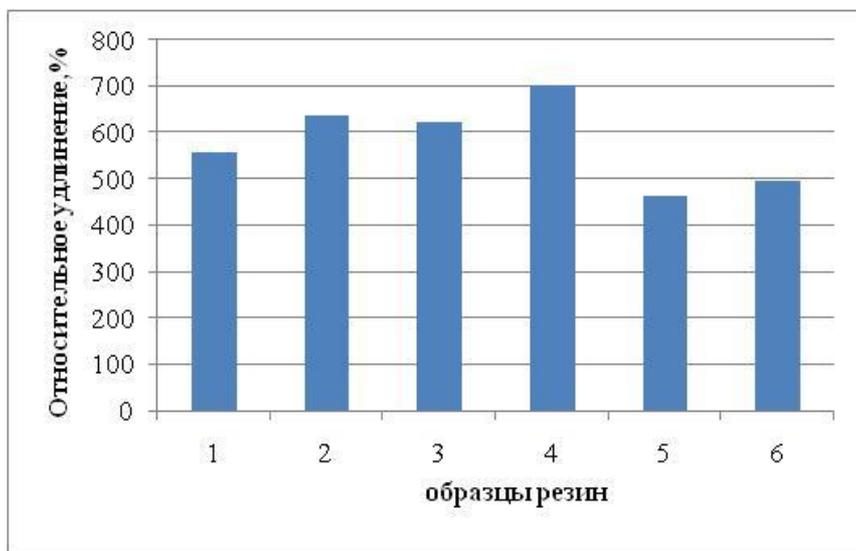
X5000

x5,000 2,00kV LED SEM 1μm JEOL 17.10.2013 WD 11,8mm 16:17:33

x5,000 2,00kV LED SEM 1μm JEOL 25.10.2013 WD 11,6mm 19:02:25



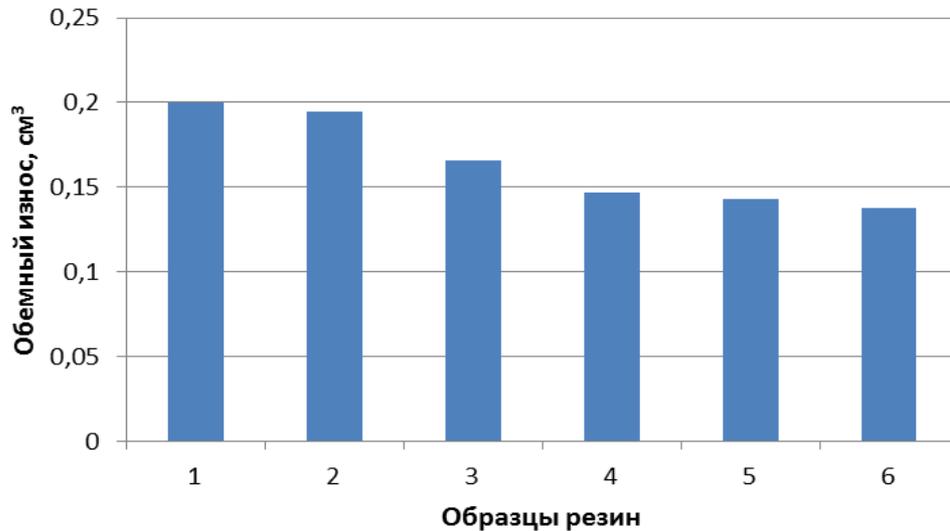
Физико-механические свойства резин на основе БНКС-18, содержащих активированный и не активированный ТУ



1 – П803, 0 секунд	2 – П803, 90 секунд
3 – N774, 0 секунд	3 – N774, 90 секунд
5 – N550, 0 секунд	6 – N550, 90 секунд



Абразивостойкость резин



1 – П803, 0 секунд

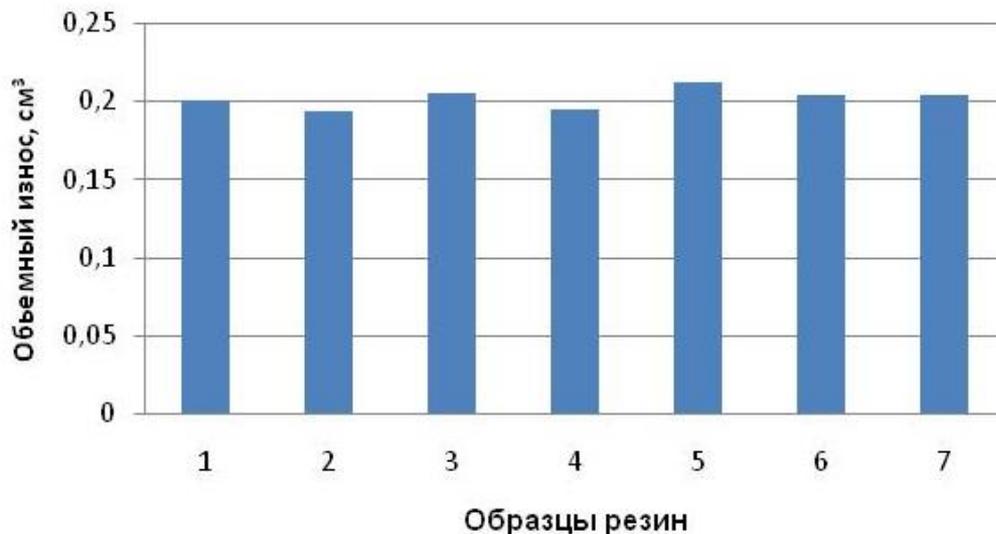
2 – П803, 90 секунд

3 – N774, 0 секунд

4 – N774, 90 секунд

5 – N550, 0 секунд

6 – N550, 90 секунд



1 – П803, 0 секунд

2 – П803, 30 секунд

3 – П803, 60 секунд

4 – П803, 90 секунд

5 – П803, 120 секунд

6 – П803, 150 секунд

7 – П803, 180 секунд

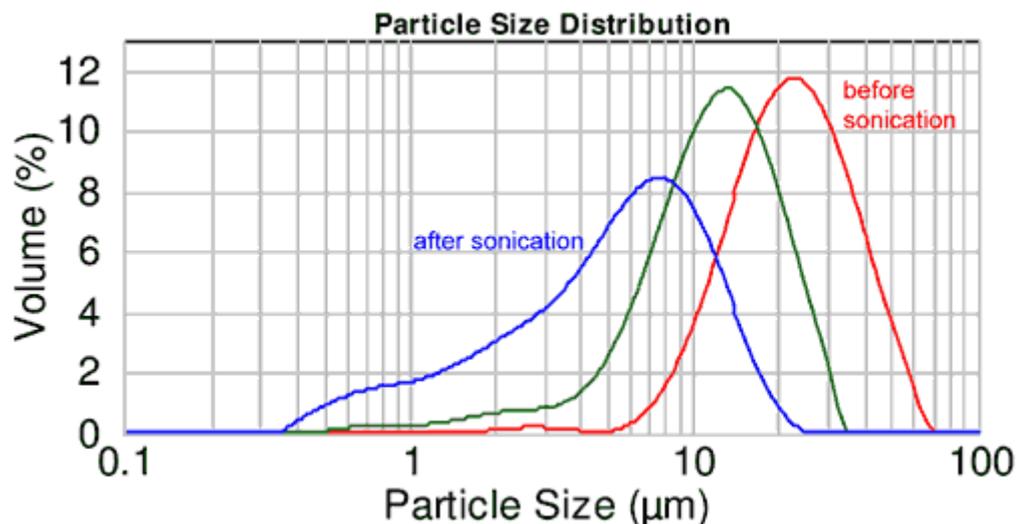


Ультразвук в нанотехнологиях

Для диспергирования наночастиц применяют метод ультразвуковой обработки. Принцип действия заключается в том, что когда ультразвук распространяет ударную волну сжатия, ослабленные волны индуцируются в молекулах среды, через которую она проходит.

Производство этих ударных волн позволяет "срезать" отдельные наночастицы, расположенные на внешней части агломератов, в чего результате происходит их разделение.

Ультразвуковая обработка - это эффективный метод диспергирования агломератов наночастиц в жидкостях, имеющих низкую вязкость: вода, ацетон, этанол.



Гранулометрический состав порошка до (—) и после (—) обработки ультразвуком



Ультразвуковой генератор ИЛ 100-6/3



Общий вид лабораторной ультразвуковой установки ИЛ-100

Технические характеристики ультразвукового генератора ИЛ100-6/3 (Россия)

Выходная мощность, не менее, Вт	1500
Рабочая частота, кГц	22±10%
Потребляемая мощность, не более, Вт	1700
Напряжение питания, В	220±10%
Частота сети питания, Гц	50
Габаритные размеры, мм	310×310×160
Диапазон температуры окр. среды °С	10 – 35
Масса, не более, кг	9

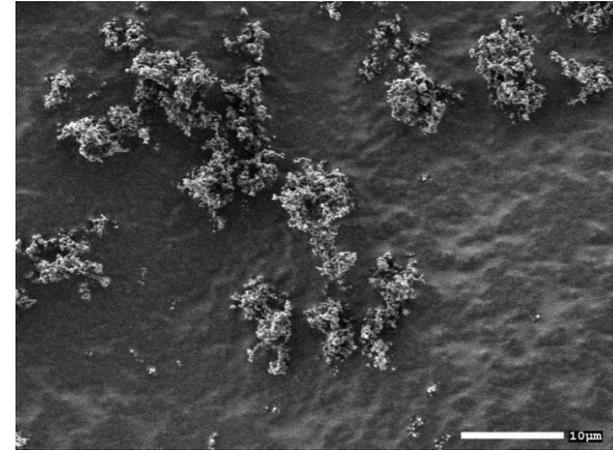
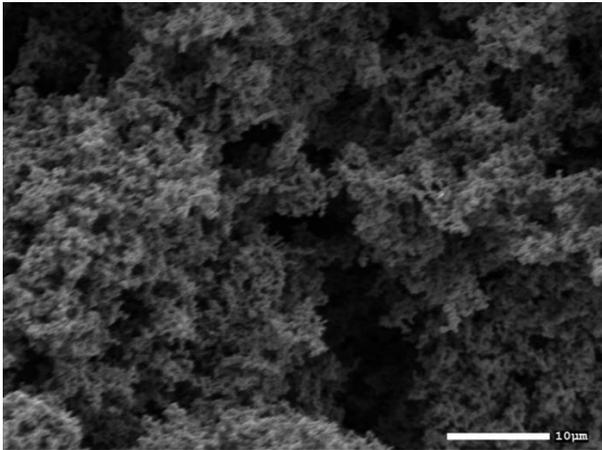


Технический углерод П-803 до и после ультразвуковой обработки

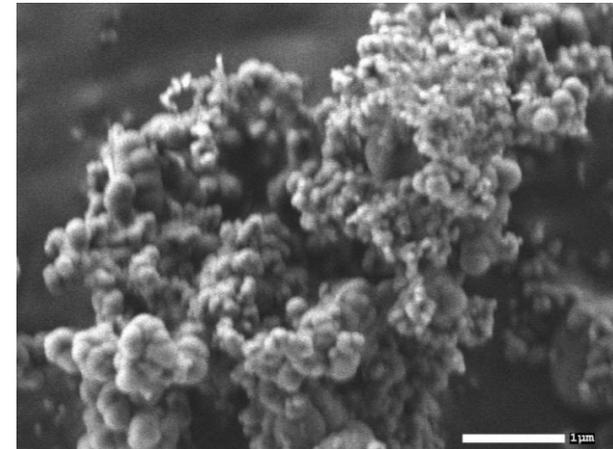
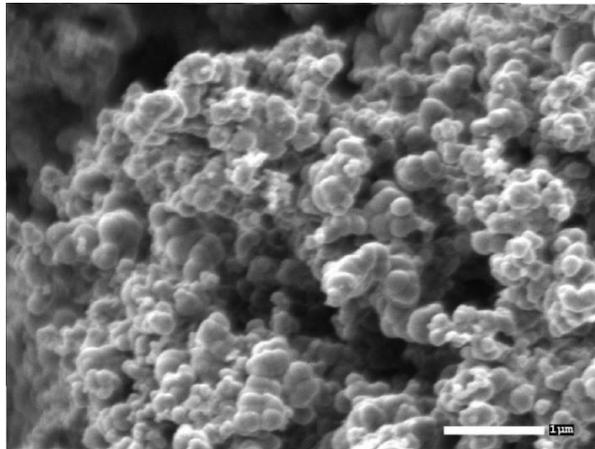
До

После 10 мин
ультразвуковой обработки

×2000



×20000



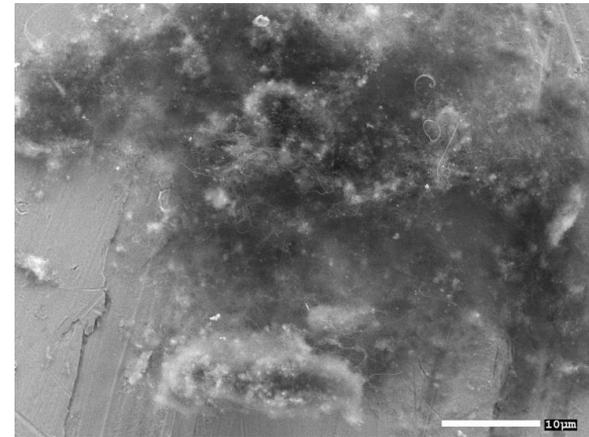
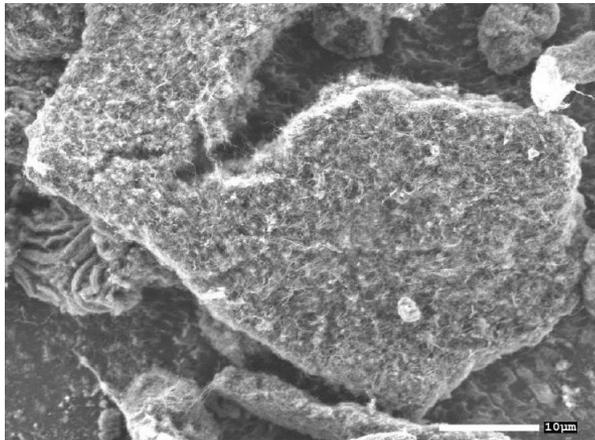


Многостенные углеродные нанотрубки до и после ультразвуковой обработки

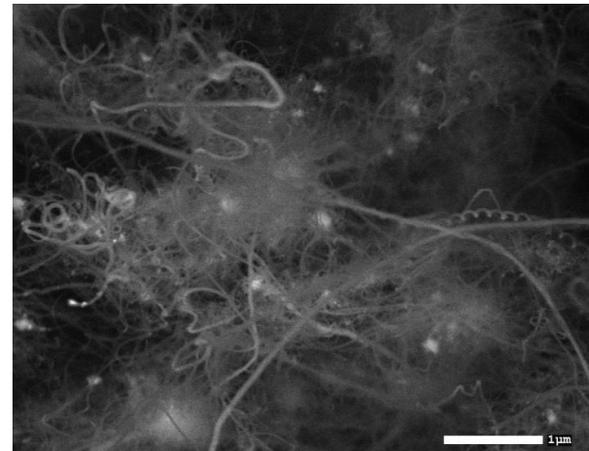
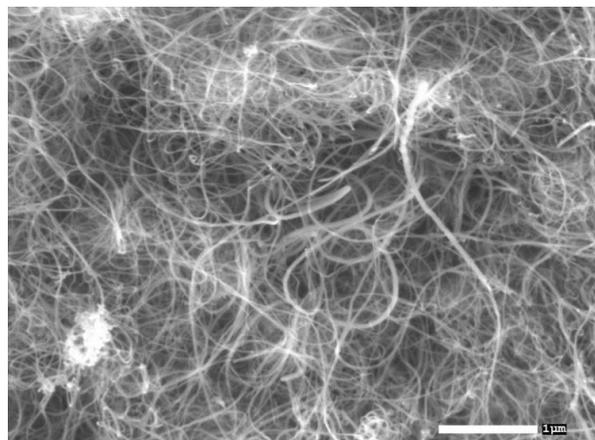
До

**После
10 мин в среде этанола**

×2000



×20000



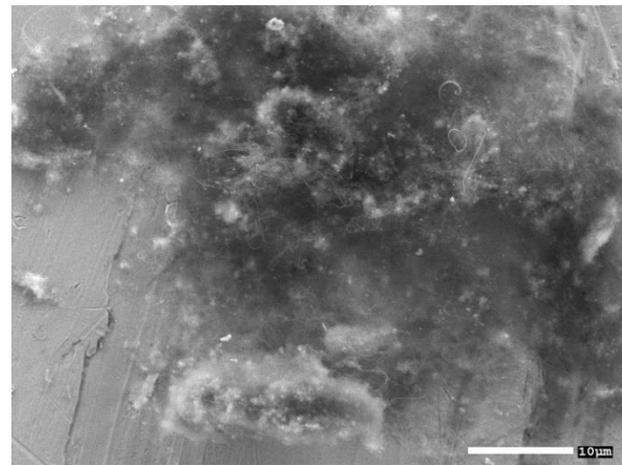
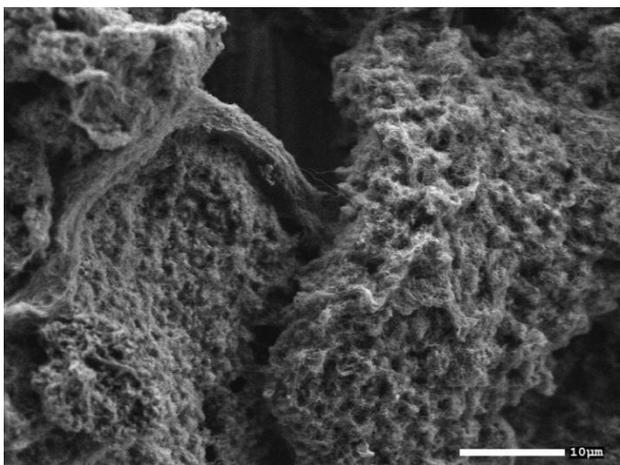


Ультразвуковая обработка многостенных углеродных нанотрубок

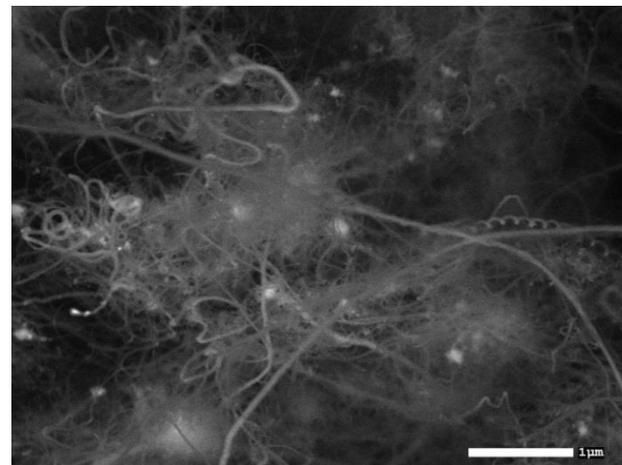
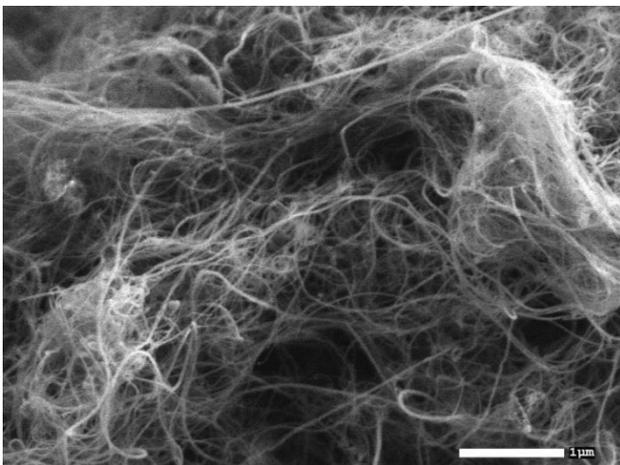
МУНТ после механохимической активации в среде этанола в течение 5 мин

МУНТ после ультразвуковой обработки в среде этанола в течение 10 мин

×2000



×20000





Заключение

- Эластомерные нанокомпозиты длительное время успешно применяются для производства различных резино-технических изделий. Для их производства широко используются различные марки технического углерода, белой сажи, а в последние годы также органоглины, шунгит, углеродные нанотрубки и нановолокна.
- В эластомерные материалы можно ввести более высокие дозировки наночастиц по сравнению с нанокомпозитами на основе других классов полимеров без потери основных свойств, что связывают с более высоким свободным объемом эластомеров. Дозировка нанонаполнителя может быть различной: от сотых долей до 60-80 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука.
- Для равномерного диспергирования наночастиц в эластомерной матрице необходимо учитывать уровень их взаимодействия с матрицей, химизм поверхности наполнителя. В ряде случаев необходима предварительная модификация наночастиц функциональными группами (например, с помощью ПАВ).
- Нанонаполнители склонны к агрегации при хранении, поэтому необходимо оценивать средние размеры частиц и их распределение их по размерам непосредственно перед введением в резиновые смеси. Для восстановления необходимой степени дисперсности наночастиц эффективны такие методы воздействия, как механохимическая активация и ультразвуковая обработка.