

Электронный курс

# Принципы нано-армирования ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

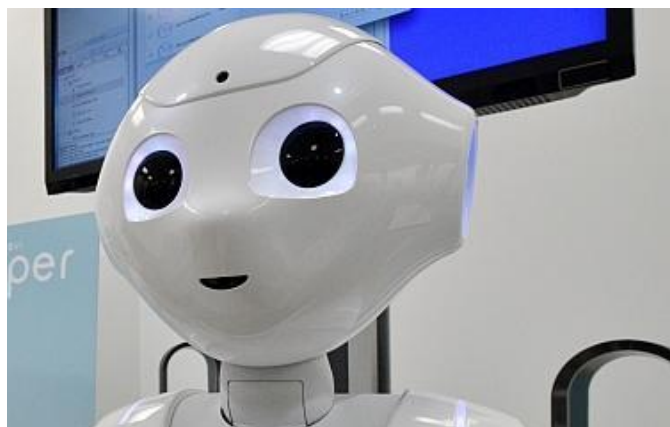
[Изучить](#)

# Принципы нано-армирования волокнистых композитов



Предлагаю тебе  
совершить экскурсию  
по институту теоретической физики!  
Меня зовут Ронан-1!  
по лаборатории и  
в нашей лаборатории  
я твой робот-помощник!  
узнать, что такое  
нано-армирование  
волокнистых композитов!  
композитов!  
и зачем их нано-  
армировать!

# Принципы нано-армирования волокнистых композитов



За каждое правильно выполненное задание у тебя появится возможность добавить совершеннее! к моему основному функционалу дополнительные опции.

| ОСНОВНОЙ ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОПЦИИ |                                                   |
|---------------------|--------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                   | Передвигается по помещениям                      |                      | Способность узнавать лица                         |
| ✓                   | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                      | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                   | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                      | Способность различать звуки                       |
| ✓                   | Записывает видео на встроенную камеру            |                      | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                   | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                      | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Введение



Знаешь ли ты, что объединяет самолеты, поезда и ветрогенераторы?



*Выбери один из вариантов ответа.*

Да, это высокотехнологичные устройства, созданные человеком

Не знаю, но очень хочу узнать

Да, безусловно, самолеты, поезда и ветрогенераторы созданы человеком и имеют очень сложное техническое устройство. Долговечность и прочность их обеспечивается **композиционными материалами**, которые противостоят высоким нагрузкам и работают без поломок десятилетиями.



Миллион с лишним авиапассажиров каждый день находятся одновременно в небе, поезд от Лондона до Парижа идет меньше двух часов, пятая часть жилищ в Европе использует электричество от ветрогенераторов.

Материалы, которые делают все эти повседневные чудеса XXI века возможными – **композиционные материалы** – противостоят высоким нагрузкам и работают без поломок десятилетиями.



# Введение



Композиционные материалы должны быть **легкими, жесткими, прочными и трещиностойкими**. Волокнистые композиты, особенно углепластики, превосходят прочие конструкционные материалы по комбинации этих свойств.



*Нажми кнопку поиска на моем планшете, чтобы узнать о свойствах композиционных материалов.*





Легкость

Жесткость

Прочность

Трещино-  
стойкость



*Нажми на свойство, чтобы увидеть его описание.*

menu



zoom  
X.E





## Легкость

Конструкционный материал считается **легким**, если его плотность существенно меньше, чем плотность конструкционных металлических сплавов.

## Жесткость

## Прочность

## Трещино-стойкость

| Сталь                                    | Алюминий                                    | Титан                                     | Углепластик                                          |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| >                                        | >                                           | >                                         | >                                                    |
| Плотность стали – 7,85 г/см <sup>3</sup> | Плотность алюминия – 2,71 г/см <sup>3</sup> | Плотность титана – 4,50 г/см <sup>3</sup> | Плотность углепластика – 1,4...1,8 г/см <sup>3</sup> |
| <                                        | <                                           | <                                         | <                                                    |

menu



zoom



## Легкость

**Жесткость** конструкционного материала выражает малость его деформаций при воздействии нагрузок и характеризуется соотношением нагрузки и вызываемой ею деформации. Например, при растяжении жесткость характеризуется **модулем Юнга** .

## Жесткость

## Прочность

## Трещино-стойкость

| Сталь                     | Дюр-алюминий                    | Сплавы титана                      | Угле-пластик                                                                              | «Черный алюминий»                                                                   | Угле-волокно                                                                 |
|---------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| >                         | >                               | >                                  | >                                                                                         | >                                                                                   | >                                                                            |
| Жесткость стали – 210 ГПа | Жесткость дюр-алюминия – 74 ГПа | Жесткость сплавов титана – 110 ГПа | Жесткость однонаправленного углепластика – 140 ГПа (при нагружении в направлении волокон) | Жесткость квазиизотропного ламината – 75 ГПа (при нагружении в направлении волокон) | Жесткость углеволокна – 200...300 ГПа (при нагружении в направлении волокон) |
| <                         | <                               | <                                  | <                                                                                         | <                                                                                   | <                                                                            |

«Модуль Юнга» композиционных материалов зависит от геометрии армирования

menu



mod  
X.E  
2008



Томас Юнг



**Модуль Юнга** – физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации и выражающая коэффициент пропорциональности между деформацией и приложенным напряжением.

Назван в честь английского физика XIX века Томаса Юнга.



Легкость

Жесткость

**Прочность**

Трещи-  
стойкость

**Прочность** характеризует предельную нагрузку, которую способен нести материал.

|                                                               |                                                                                                                     |                                                                                                                 |                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Металлы<br>(сталь,<br>алюминиевые и<br>титановые<br>сплавы) > | Углепластик >                                                                                                       | «Черный<br>алюминий» >                                                                                          | Углеволокно >                                                                                   |
| Прочность при<br>растяжении – 300<br>... 600 МПа <            | Прочность<br>однаправленного<br>углепластика –<br>1200...2500 МПа<br>(при нагружении в<br>направлении<br>волокон) < | Прочность<br>квазиизотропного<br>ламината –<br>800...1600 ГПа (при<br>нагружении в<br>направлении<br>волокон) < | Жесткость<br>углеволокна –<br>2000...4000 МПа<br>(при нагружении в<br>направлении<br>волокон) < |

Прочность композиционных материалов зависит от геометрии армирования

menu



zoom



### Легкость

**Трещиностойкость** характеризует сопротивление материала зарождению и развитию трещин. Это комплексная характеристика материала, которая описывается набором показателей. Наиболее важными из них является прочность и энергия, расходуемая на образование единицы поверхности .

### Жесткость

Strain Energy Release Rate, SERR

### Прочность

| Прочность типичных углепластиков | SERR типичных углепластиков |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 50 ... 100 МПа                   | 100...300 Дж/м <sup>2</sup> |

### Трещино-стойкость

Трещиностойкость связана с хрупкостью материала (выражаемой, например, малым предельным удлинением), но не исчерпывается ею.

Жесткость и прочность конструкционных материалов находятся, как правило, в обратном соотношении с трещиностойкостью.

menu





Поскольку трещины в композитах образуются первоначально в связующем и распространяются вдоль волокон или между слоев ламината, то прочность, существенная для трещиностойкости – это **прочность при нагружении однонаправленного слоя волокон в направлении поперек волокон.**

# Введение



Угле- и стеклопластики являются широко применяемыми конструкционными материалами. Их дальнейшее развитие идет по двум направлениям, связанным с двумя различными уровнями иерархической структуры материала.

Хочешь узнать, что это за направления?

Хочу

## Уровни иерархической структуры конструкционных материалов

Уровень волокнистой структуры материала  
(масштаб миллиметров и сотен микрон) –  
слоистой, тканой, плетеной, вязаной

Более глубокие иерархические уровни структуры,  
уходящие вниз от нитей и слоев волокон к  
отдельным волокнам и нано-армированию  
(масштаб от микрон до нанометров)



Для управления порядком появления схемы используй кнопку





## Уровни иерархической структуры конструкционных материалов

Уровень волокнистой структуры материала (масштаб миллиметров и сотен микрон) – слоистой, тканой, плетеной, вязаной

Более глубокие иерархические уровни структуры, уходящие вниз от нитей и слоев волокон к отдельным волокнам и нано-армированию (масштаб от микрон до нанометров)

Разработка структуры (возможно, изменяющейся внутри материала), которая оптимальна для его конкретного применения и соответствующих нагрузок

Конструирование материалов с принципиально новым уровнем и сочетанием механических свойств

## Направления развития конструкционных материалов



# Введение



Догадывался ли ты о том, что даже такие прочные композиционные материалы подвержены микрорастрескиванию?



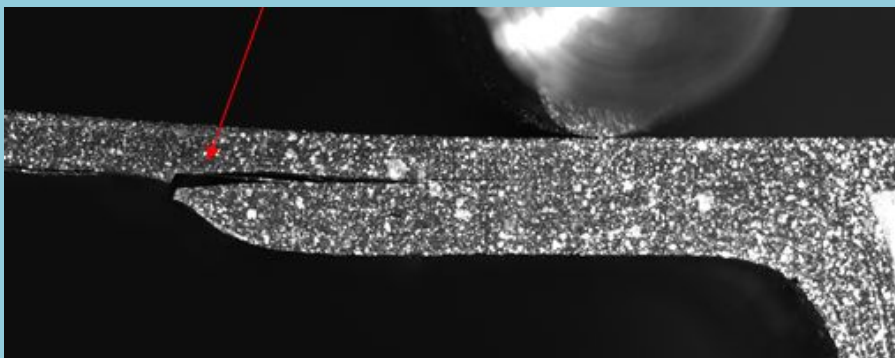
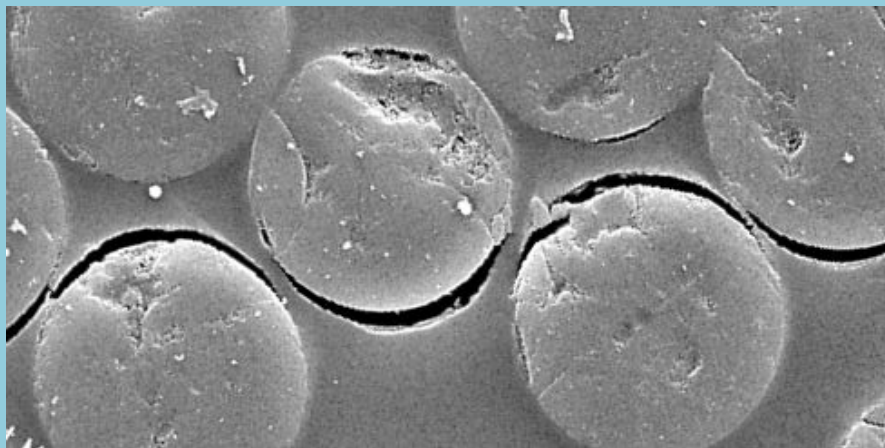
*Выбери один из вариантов ответа.*

Да

Нет

**Ты уже отлично начал разбираться в свойствах композиционных материалов!**

Слоистая природа большинства композиционных материалов  обуславливает опасность расслоения, которое, даже будучи невидимым при визуальном осмотре, может привести к катастрофическому разрушению материала.



Микро- и макро-трещины в композиционном материале

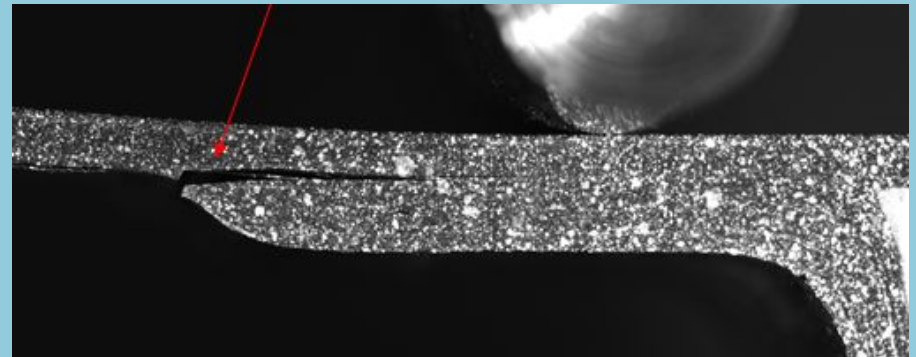
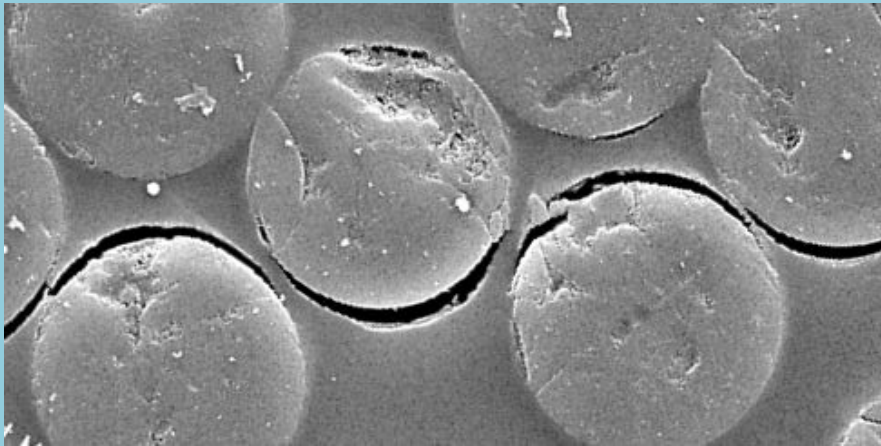




Например, трещиностойкость композита определяется прочностью связующего, ослабленного вследствие концентрации напряжений вблизи жестких армирующих волокон. Уровень приложенной к композиционному материалу деформации, приводящий к микрорастрескиванию связующего, составляет 0,3 ... 0,8 % (в зависимости от типа армирования), что в несколько раз меньше, чем предельная деформация углеволокна (1,5 ... 2,0 %). Соответственно коэффициент запаса (соотношение предельной и расчетной нагрузки) при проектировании детали из углепластика может достигать, а то и превосходить значение 5.

## **Неправильно! Прочные композиционные материалы подвержены микрорастрескиванию.**

Слоистая природа большинства композиционных материалов  обуславливает опасность расслоения, которое, даже будучи невидимым при визуальном осмотре, может привести к катастрофическому разрушению материала.



Микро- и макро-трещины в композиционном материале





Например, трещиностойкость композита определяется прочностью связующего, ослабленного вследствие концентрации напряжений вблизи жестких армирующих волокон. Уровень приложенной к композиционному материалу деформации, приводящий к микрорастрескиванию связующего, составляет 0,3 ... 0,8 % (в зависимости от типа армирования), что в несколько раз меньше, чем предельная деформация углеволокна (1,5 ... 2,0 %). Соответственно коэффициент запаса (соотношение предельной и расчетной нагрузки) при проектировании детали из углепластика может достигать, а то и превосходить значение 5.

# Введение



Оцени приведенные природные материалы с точки зрения прочности и трещиностойкости.



Выбери ответ для каждого параметра.

|                  | Кость<br> | Перламутр<br> | Шелковая нить<br> | Паутина<br> |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Прочность        | ▲ ▼                                                                                        | ▲ ▼                                                                                             | ▲ ▼                                                                                                  | ▲ ▼                                                                                            |
| Трещиностойкость | ▲ ▼                                                                                        | ▲ ▼                                                                                             | ▲ ▼                                                                                                  | ▲ ▼                                                                                            |

Ответить

## Абсолютно верно!

Такие материалы, как кость, перламутр, шелковая нить или паутина демонстрируют сочетание жесткости, прочности, деформируемости и трещиностойкости, парадоксальное для обычных конструкционных материалов. Это сочетание достигается в природе с помощью сложной структурной иерархической организации материала.

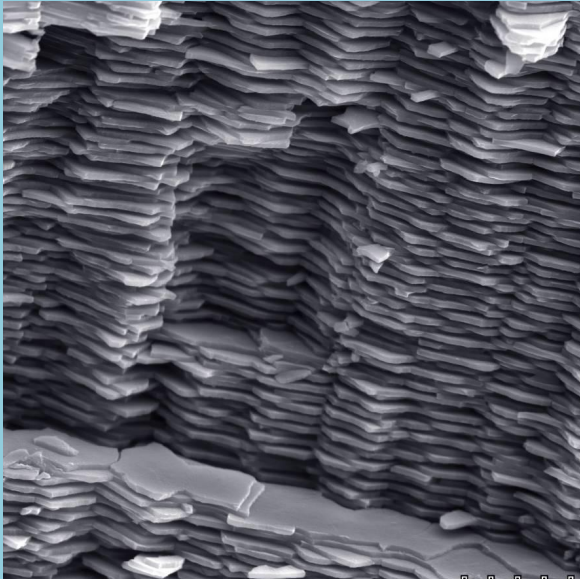


*Посмотреть пример сложной структурной иерархической организации перламутра.*

|                  | Кость                                                                             | Перламутр                                                                          | Шелковая нить                                                                       | Паутина                                                                             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |  |  |  |  |
| Прочность        | ▲ ▼                                                                               | ▲ ▼                                                                                | ▲ ▼                                                                                 | ▲ ▼                                                                                 |
| Трещиностойкость | ▲ ▼                                                                               | ▲ ▼                                                                                | ▲ ▼                                                                                 | ▲ ▼                                                                                 |







Микроструктура  
перламутра



Новое поколение композиционных материалов должно открыть путь материалам, сочетающим высокую прочность с высокой трещиностойкостью. Использование иерархического конструирования материала на глубоких структурных уровнях делает это возможным, как это демонстрирует природа.

## Неправильно!

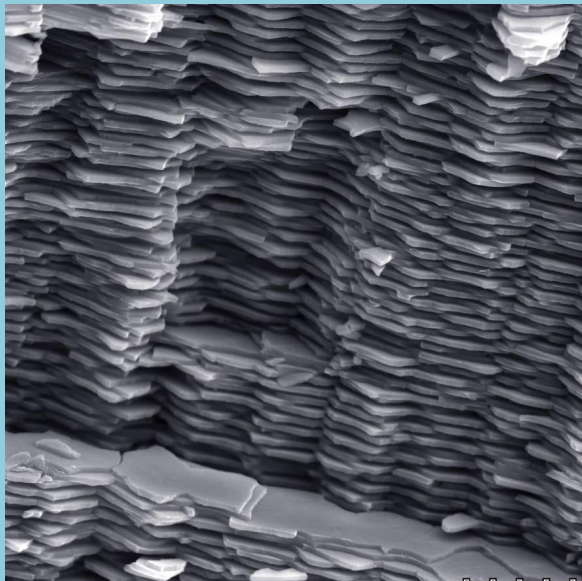
Такие материалы, как кость, перламутр, шелковая нить или паутина демонстрируют сочетание жесткости, прочности, деформируемости и трещиностойкости, парадоксальное для обычных конструкционных материалов. Это сочетание достигается в природе с помощью сложной структурной иерархической организации материала.



*Посмотреть пример сложной структурной иерархической организации перламутра.*

|                  | Кость                                                                             | Перламутр                                                                          | Шелковая нить                                                                       | Паутина                                                                             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |  |  |  |  |
| Прочность        | ▲ ▼                                                                               | ▲ ▼                                                                                | ▲ ▼                                                                                 | ▲ ▼                                                                                 |
| Трещиностойкость | ▲ ▼                                                                               | ▲ ▼                                                                                | ▲ ▼                                                                                 | ▲ ▼                                                                                 |





Микроструктура  
перламутра



Новое поколение композиционных материалов должно открыть путь материалам, сочетающим высокую прочность с высокой трещиностойкостью. Использование иерархического конструирования материала на глубоких структурных уровнях делает это возможным, как это демонстрирует природа.

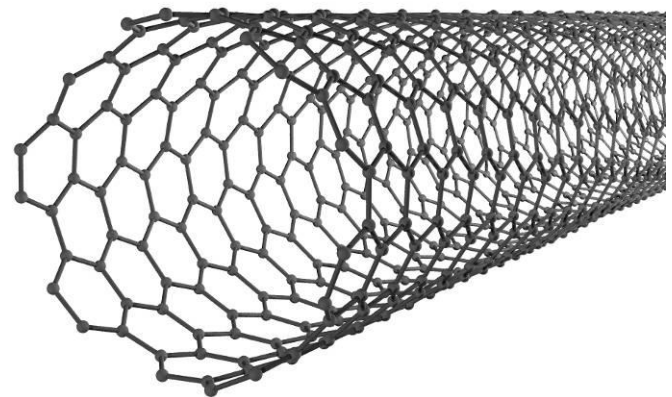
# Введение

Открытие наноматериалов, таких как углеродные **нанотрубки** или **графен**, предоставляет возможности для нового, нано-уровня армирования волокнистых композитов, добавляя иерархический уровень именно на том масштабе, на котором происходит зарождение и первоначальное развитие трещин – микронном и суб-микронном масштабе интерфейса между волокнами и связующим.

**Значимое  
открытие!**



Кроме этого, нано-модификация полимера и нано-армирование композита привносит новые свойства материала, например, его **электропроводность**.



# Введение



Каковы же требуемые показатели углеродных нанотрубок для получения высоких механических показателей армированных полимеров?

**Хочешь узнать, что это за показатели?**

**Хочу**

## Требуемые показатели углеродных нанотрубок (УНТ)

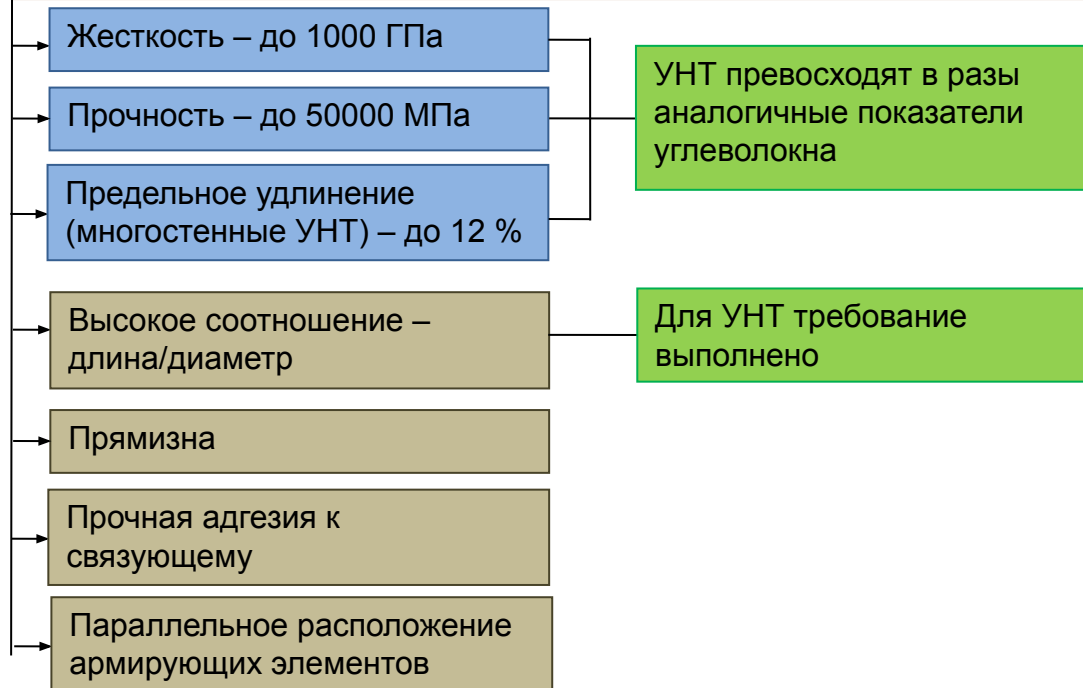
- Жесткость – до 1000 ГПа
- Прочность – до 50000 МПа
- Предельное удлинение (многостенные УНТ) – до 12 %
- Высокое соотношение – длина/диаметр
- Прямизна
- Прочная адгезия к связующему
- Параллельное расположение армирующих элементов



Для управления порядком появления схемы используй кнопку

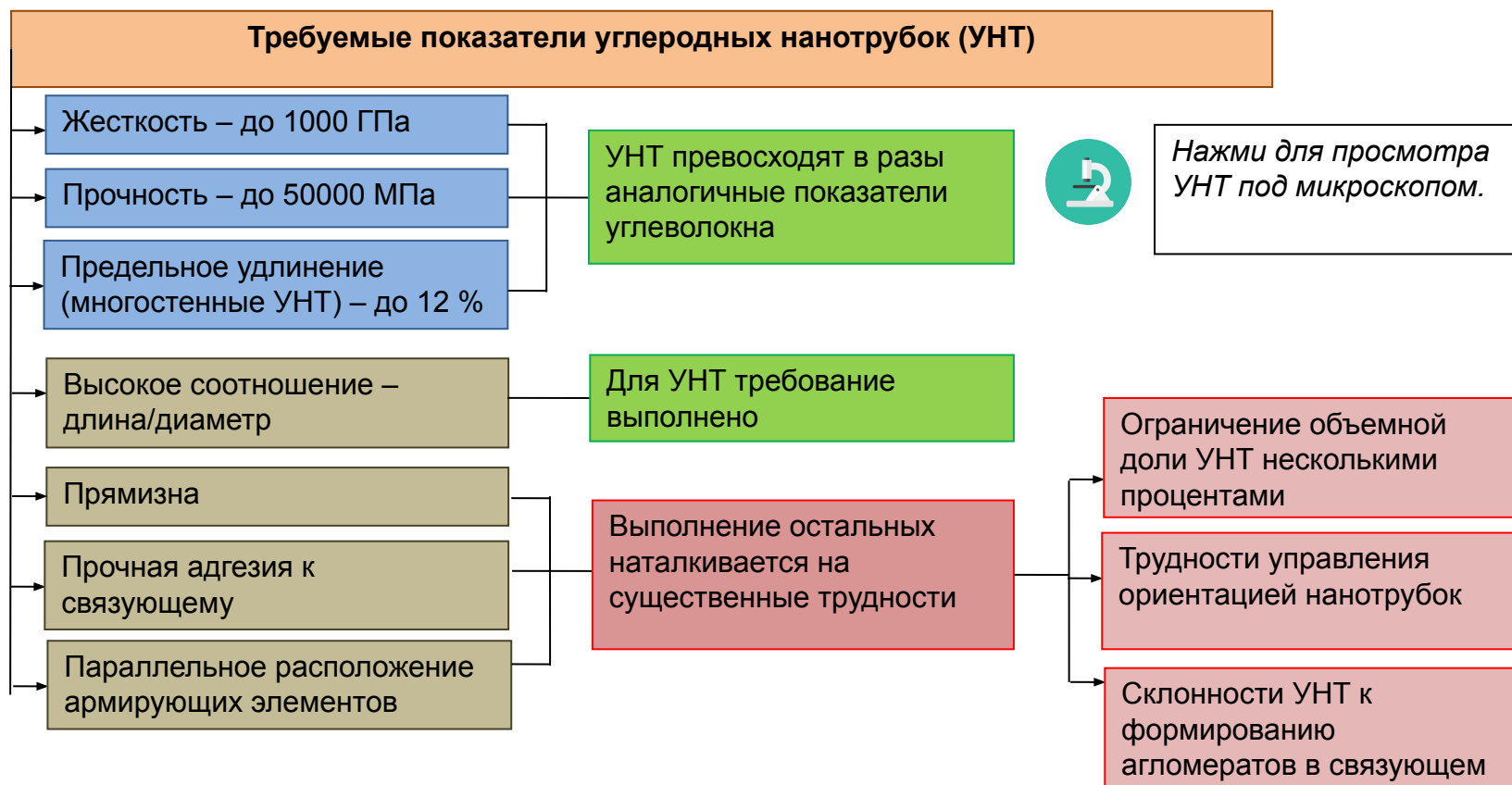


## Требуемые показатели углеродных нанотрубок (УНТ)



Для управления порядком появления схемы используй кнопку

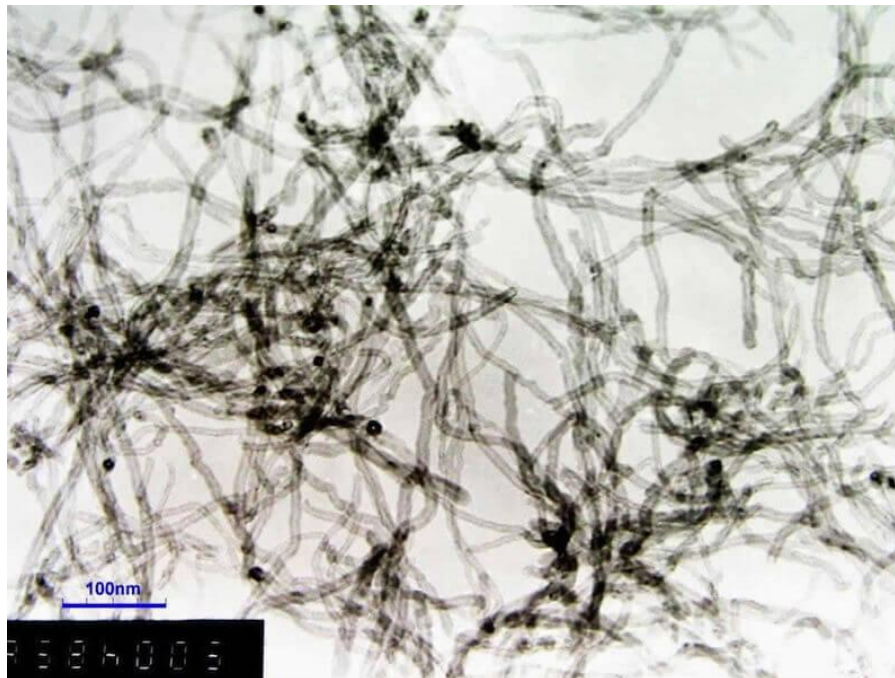
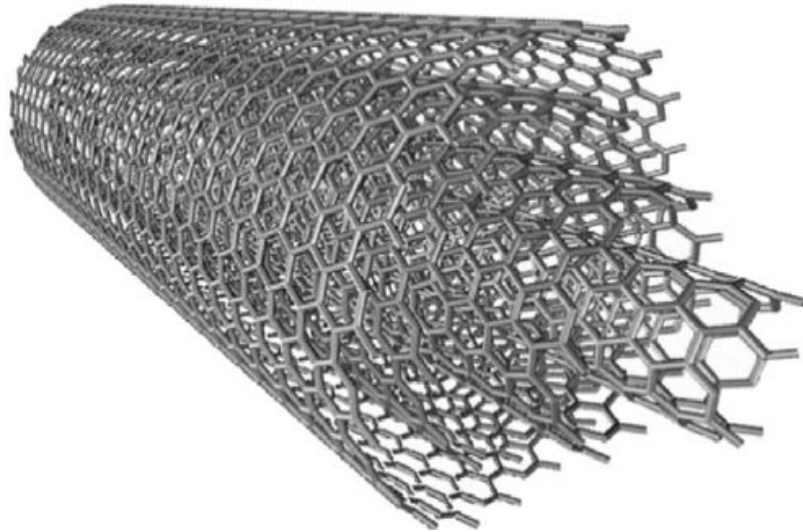




В результате четверти века исследований стало ясно, что УНТ не могут конкурировать с углеродными волокнами в получении высоких механических показателей армированных полимеров. Применение УНТ в основном мотивируется получением проводящих полимеров и, вследствие этого, возможностью создания разнообразных сенсоров. Определенное повышение механических свойств полимера становится вторичным, а не основным, решающим выигрышем.



# Многостенная УНТ и снимок многостенных УНТ под просвечивающим электронным микроскопом



# Введение



Давай вместе разберемся, что же такое нано-модификация волокнистых композитов.

[Отличие нано-модификации от простого нано-армирования](#)

[Суть процесса нано-модификации](#)

[Преимущества нано-модификации](#)



*Перейди на вкладку, чтобы ознакомиться с информацией.*

# Введение



Давай вместе разберемся, что же такое нано-модификация волокнистых композитов.

|                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Отличие нано-модификации от простого нано-армирования | В отличие от простого нано-армирования полимеров, нано-модификации волокнистых композитов, создание иерархических композитов, сочетающих микро (волокна) и нано (нанотрубки) армирующие элементы, позволяет получить существенное улучшение свойств, связанных с трещиностойкостью композита. |
| <u>Суть процесса нано-модификации</u>                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <u>Преимущества нано-модификации</u>                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



# Введение



Давай вместе разберемся, что же такое нано-модификация волокнистых композитов.

Отличие нано-модификации от простого нано-армирования

Суть процесса нано-модификации

Преимущества нано-модификации

Добавление нескольких процентов, а то и долей процента нанотрубок, позволяет бороться с пониженной прочностью волокнистых композитов при нагружении поперек волокон и связанной с этим пониженной трещиностойкостью и расслоением слоистых пластиков.



# Введение



Давай вместе разберемся, что же такое нано-модификация волокнистых композитов.

Отличие нано-модификации от простого нано-армирования

Суть процесса нано-модификации

Преимущества нано-модификации

Нанотрубки, распределенные в связующем между волокнами, могут понизить уровень напряжений на интерфейсе волокно-связующее за счет уменьшения соотношения жесткости волокна и связующего. Нанотрубки, расположенные на этом интерфейсе или между слоями ламината, могут препятствовать образованию и распространению микротрещин благодаря своей высокой жесткости и прочности.



# Контрольный вопрос



А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов.

Какие эксплуатационные характеристики самолета  могут повыситься при применении наномодифицированного композита и повышенной допустимой деформации?



Выбери ответ для каждой характеристики. У тебя есть две попытки.

|                                                         |                 |
|---------------------------------------------------------|-----------------|
| Масса самолета при сохранении размеров                  | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |
| Расход горючего при сохранении размеров                 | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |
| Давление воздуха в салоне самолета = комфорт пассажиров | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |
| Размер окон = комфорт пассажиров                        | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |

Ответить



Знаешь ли ты, что доля композитов в конструкции новейшего российского пассажирского самолета MC-21 – **свыше 30 %** – выводит русскую авиапромышленность на передовые позиции в мировом самолетостроении.

Конструкции самолета из композиционных материалов проектируются исходя из величины предельных деформаций материала – 0,3 %. Эта величина определяется пределом прочности после удара, пределом микрорастрескивания и пределом усталости. Благодаря применению нано-армирования связующего углепластиков удалось повысить предел трещиностойкости и увеличить предельно допустимую деформацию материала до 0,5 %.

Ты ошибся! Попробуй еще раз.

Какие эксплуатационные характеристики самолета  могут повыситься при применении наномодифицированного композита и повышенной допустимой деформации?



Выбери ответ для каждой характеристики. У тебя осталась одна попытка.

|                                                         |                 |
|---------------------------------------------------------|-----------------|
| Масса самолета при сохранении размеров                  | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |
| Расход горючего при сохранении размеров                 | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |
| Давление воздуха в салоне самолета = комфорт пассажиров | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |
| Размер окон = комфорт пассажиров                        | Да (уменьшится) |
|                                                         | Да (увеличится) |
|                                                         | Нет             |

Ответить



Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.

|                                                               |                 |                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Масса самолета при<br>сохранении размеров                     | Да (уменьшится) |    |
|                                                               | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                               | Нет             |                                                                                       |
| Расход горючего при<br>сохранении размеров                    | Да (уменьшится) |   |
|                                                               | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                               | Нет             |                                                                                       |
| Давление воздуха в салоне<br>самолета = комфорт<br>пассажиров | Да (уменьшится) |  |
|                                                               | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                               | Нет             |                                                                                       |
| Размер окон = комфорт<br>пассажиров                           | Да (уменьшится) |  |
|                                                               | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                               | Нет             |                                                                                       |





При тех же аэродинамических нагрузках можно допустить увеличение напряжений в деталях, поскольку предельная деформация увеличивается. Увеличение напряжения при постоянной нагрузке возможно при уменьшении сечения детали.



Расход горючего при сохранении размеров уменьшится, поскольку возможно уменьшение массы.



Повышенная допустимая деформация позволяет увеличить допустимые нагрузки, которые, в частности, связаны с внутренним давлением фюзеляжа.



Размер вырезов в фюзеляже определяет повышение напряжения около выреза.  
Поскольку предельные напряжения увеличились, окна можно сделать больше.

Ты ошибся! Ознакомься с правильным ответом.

|                                                              |                 |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Масса самолета при<br>сохранении размеров                    | Да (уменьшится) |    |
|                                                              | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                              | Нет             |                                                                                       |
| Расход горючего при<br>сохранении размеров                   | Да (уменьшится) |   |
|                                                              | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                              | Нет             |                                                                                       |
| Давление воздуха в салоне<br>самолета = комфорт<br>пассажира | Да (уменьшится) |  |
|                                                              | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                              | Нет             |                                                                                       |
| Размер окон = комфорт<br>пассажира                           | Да (уменьшится) |  |
|                                                              | Да (увеличится) |                                                                                       |
|                                                              | Нет             |                                                                                       |





При тех же аэродинамических нагрузках можно допустить увеличение напряжений в деталях, поскольку предельная деформация увеличивается. Увеличение напряжения при постоянной нагрузке возможно при уменьшении сечения детали.



Расход горючего при сохранении размеров уменьшится, поскольку возможно уменьшение массы.



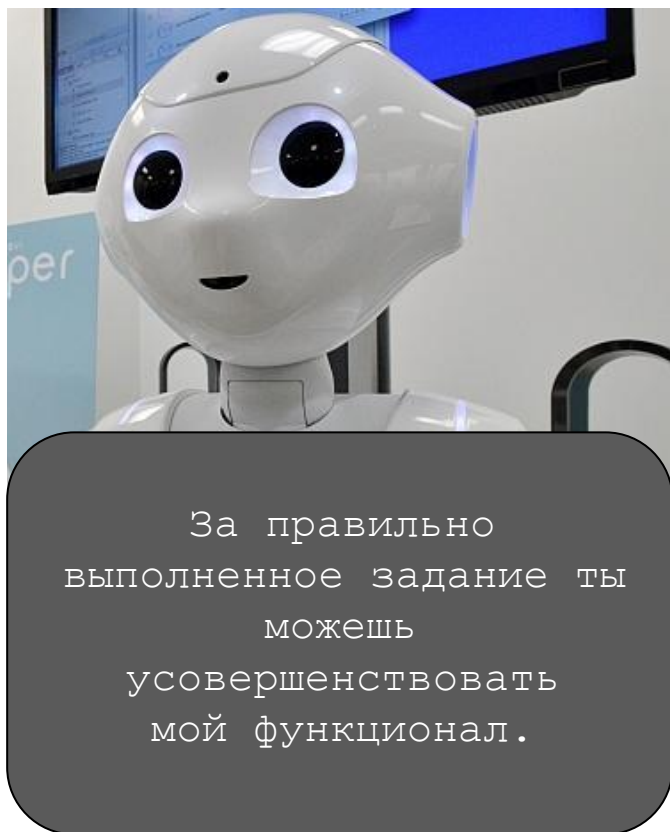


Повышенная допустимая деформация позволяет увеличить допустимые нагрузки, которые, в частности, связаны с внутренним давлением фюзеляжа.



Размер вырезов в фюзеляже определяет повышение напряжения около выреза.  
Поскольку предельные напряжения увеличились, окна можно сделать больше.

# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ  |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | <input type="checkbox"/> | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | <input type="checkbox"/> | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           | <input type="checkbox"/> | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            | <input type="checkbox"/> | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных | <input type="checkbox"/> | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



Выбери первую дополнительную опцию.

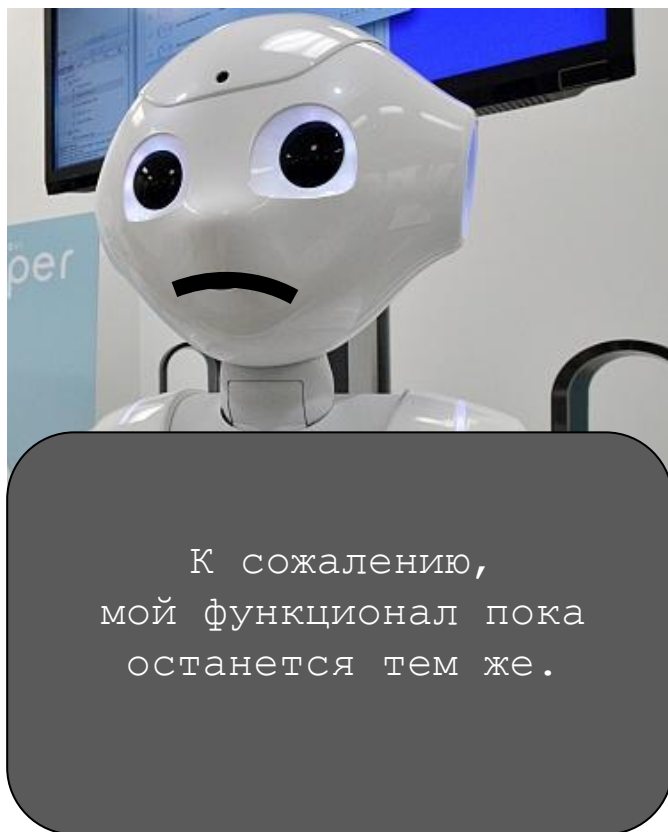
# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Твои результаты (вариант 2)

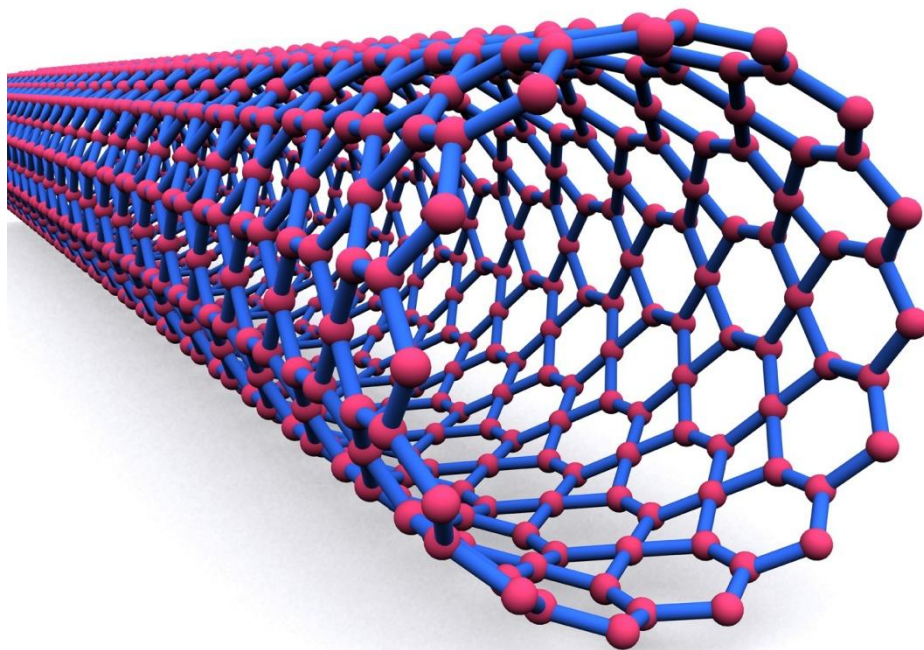


| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      |                         | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Раздел 1

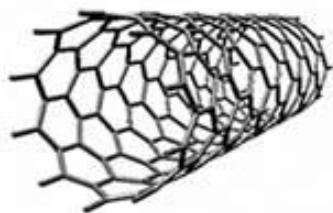
## Углеродные нанотрубки



# Что такое углеродные нанотрубки

**Углеродные нанотрубки (УНТ)** являются наиболее изученным типом нано-армирования. УНТ представляет собой свернутую в трубку графеновую плоскость (одностенные УНТ) или несколько таких трубок, вложенных одна в другую (многостенные УНТ).

Трубка, как правило, закрыта полусферической головкой («полуфуллерен»).



**Одностенные УНТ**



**Многостенные УНТ**





**Графеновая плоскость** – это поверхность из правильных шестиугольников, в вершинах которых расположены атомы углерода.



# История создания углеродных нанотрубок



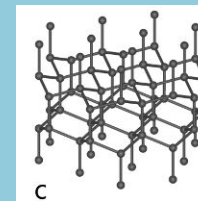
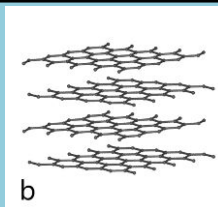
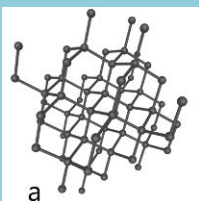
**Фуллерены** – молекулярное соединение, принадлежащее классу аллотропных форм углерода и представляющее собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода, например,  $C_{60}$ .



*Щелкни по значку на моем планшете, чтобы просмотреть иллюстрации разнообразных форм углерода.*



# Разнообразные формы (аллотропы) углерода



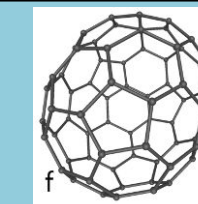
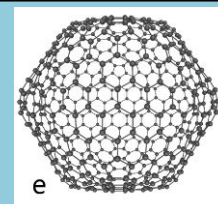
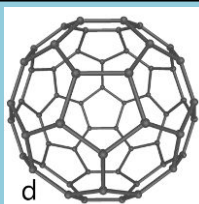
**Алмаз**



**Графит**



**Лонсдейлит**



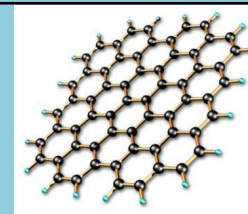
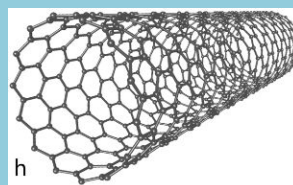
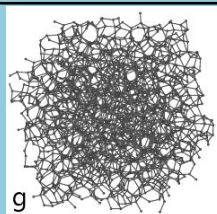
**Фуллерен**



**Фуллерен**



**Фуллерен**



**Аморфный углерод**



**УНТ**



**Графен**



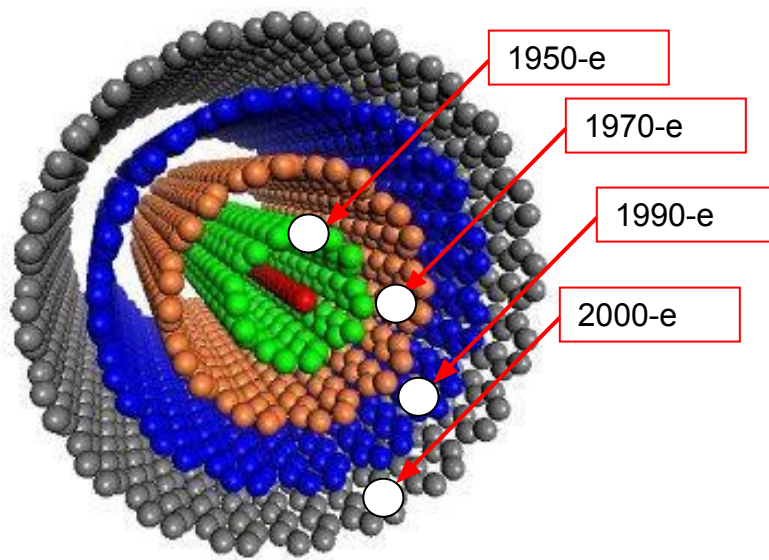
# История создания углеродных нанотрубок



Проследи историю изучения углеродных нанотрубок на нашей исторической нано-шкале.



*Нажимай на метки нано-шкалы.*





**Углеродные трубки** – «волокна», полученные при термическом разложении окиси углерода в присутствии железного катализатора наблюдались в 1952 г. Л. В. Радушкевичем и В. М. Лукьяновичем, и позже – другими учеными, однако эти наблюдения не были развиты.

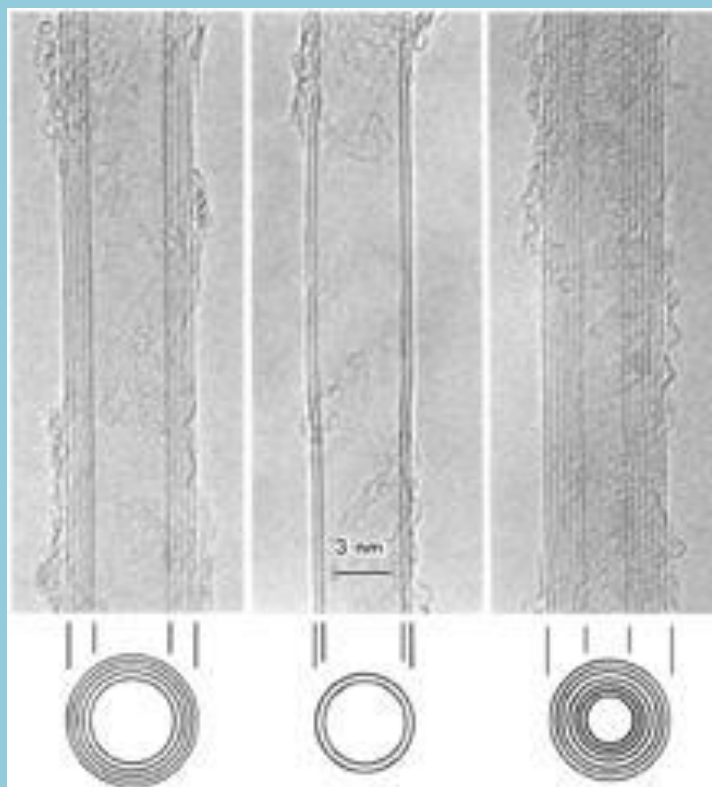


В 1970-х годах М. Эндо с сотрудниками описал получение углеродных трубок методом конденсации из пара.



Сумио Иидзима

Только после детального исследования структуры УНТ, проведенного С. Иидзимой в 1990-х годах, УНТ привлекли внимание материаловедов и стали объектом интенсивных фундаментальных и практических исследований.





Начиная с 1990-х годов, происходит экспоненциальный рост интенсивности исследований применения УНТ как армирования композитов, сначала как добавок в полимерные связующие, потом – как дополнительного нано-армирования волокнистых композитов. Количество статей в научных журналах (Web of Science), посвященных нано-армированию композитов, возросло с нескольких десятков в начале 1990-х годов до десятков тысяч в настоящее время; эти статьи составляют примерно 10 % всего массива статей, посвященных композиционным материалам.

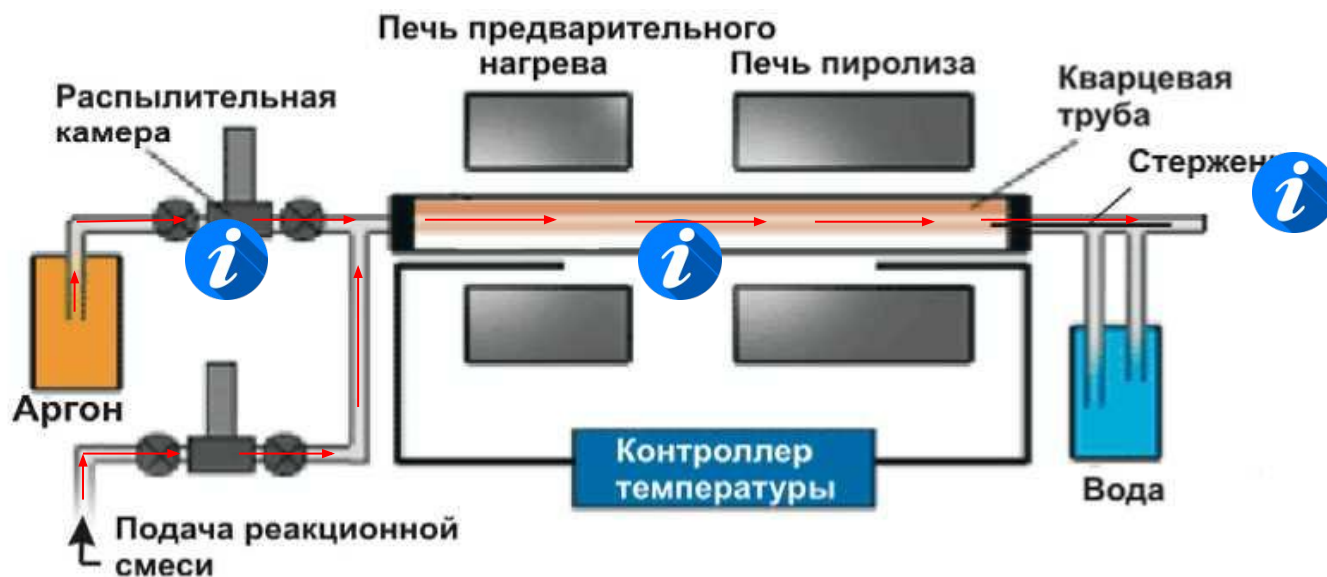
Общая сумма, потраченная в мире на исследования в области нано-технологий с начала XXI века, оценивается величиной в четверть триллиона долларов.

# Производство углеродных нанотрубок



Основным методом производства нанотрубок является **метод химического осаждения из газовой фазы** . Он позволяет контролировать местоположение роста и геометрические параметры углеродных трубок на различных видах подложек.

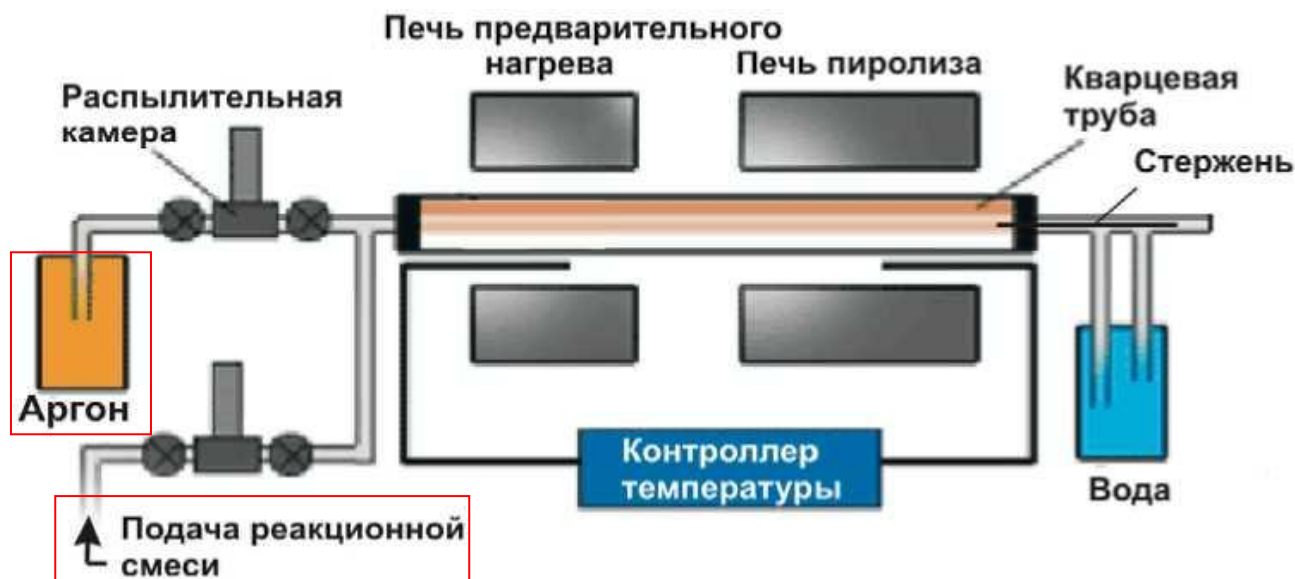
chemical vapor deposition, CVD



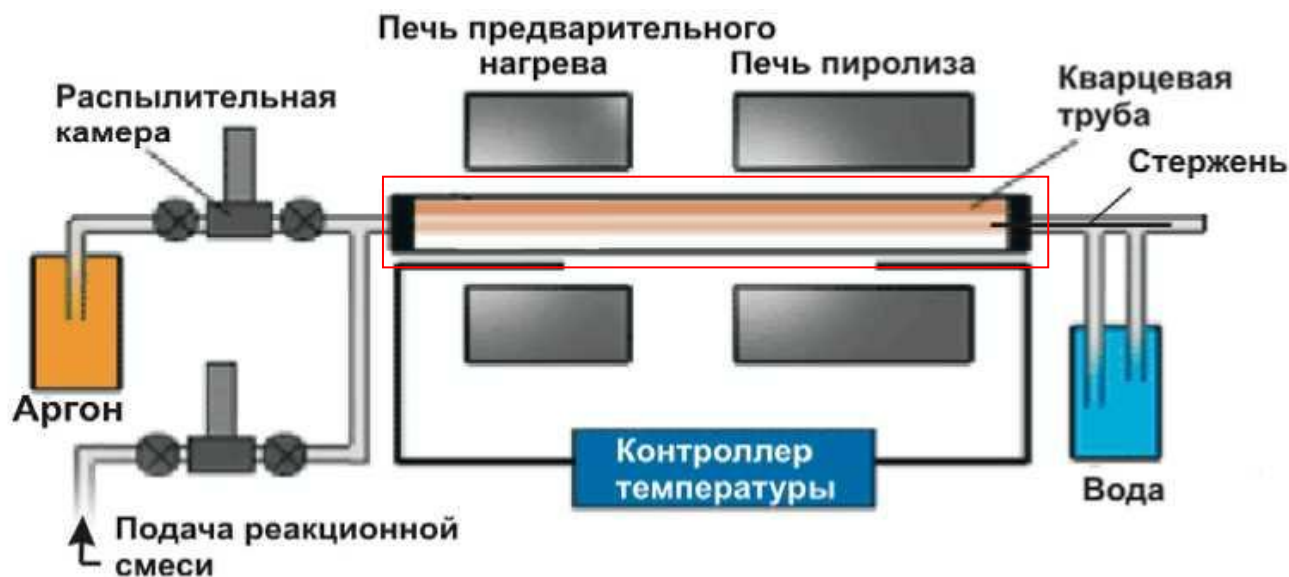


В реактор подается два газа:

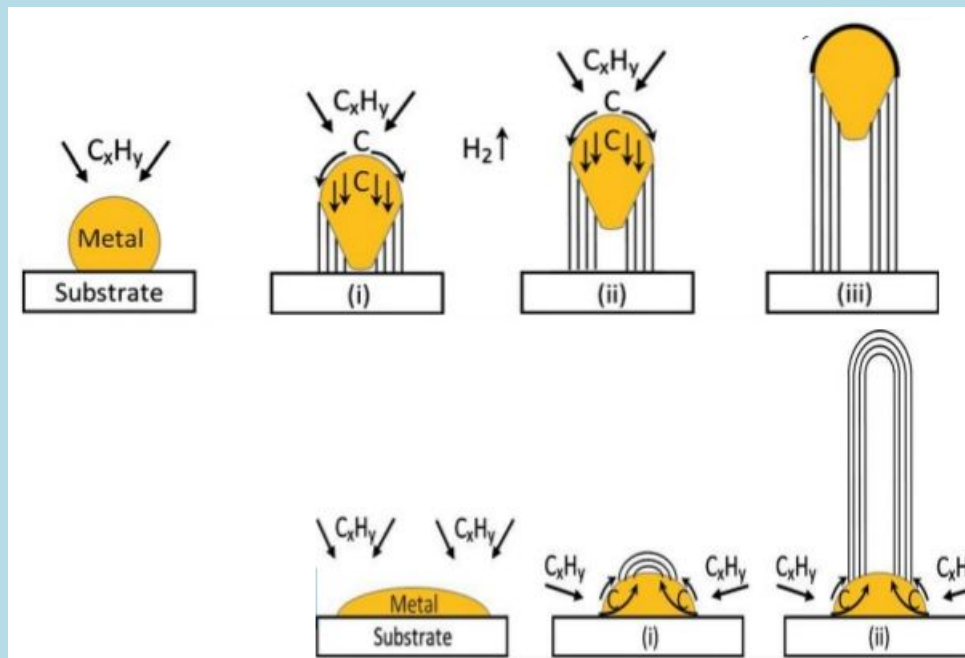
- несущий газ (например, аргон);
- углеродсодержащий газ (например, ацетилен, этилен, этанол или метан).



Разложившийся углерод продолжает поступать в частицу катализатора, и для сброса избытка его концентрации в расплаве нужно постоянно извлекать ее от него. При термическом разложении углеводорода, образующийся углерод оседает на поверхности катализатора. Подложка – металлический катализатор, в виде пластинки или частиц, расплавленная в ванночке, за счет металлической диффузии высокой температуры внедряется в частицу на одной из ее граней, образуя собой цилиндрический каркас нанотрубки. Частица катализатора может быть нанесена на подложку, или же нанотрубка может расти непосредственно на подложке, в зависимости от адгезии частицы к подложке.



Диаметр выращиваемой УНТ зависит от размера частицы катализатора.



При производстве УНТ методом осаждения из газовой фазы можно получать как УНТ «россыпью», как порошок, пригодный для смешения со связующим композита, так и выращивать «лес» УНТ на волокнах армирования, предварительно покрыв волокна частицами катализатора.

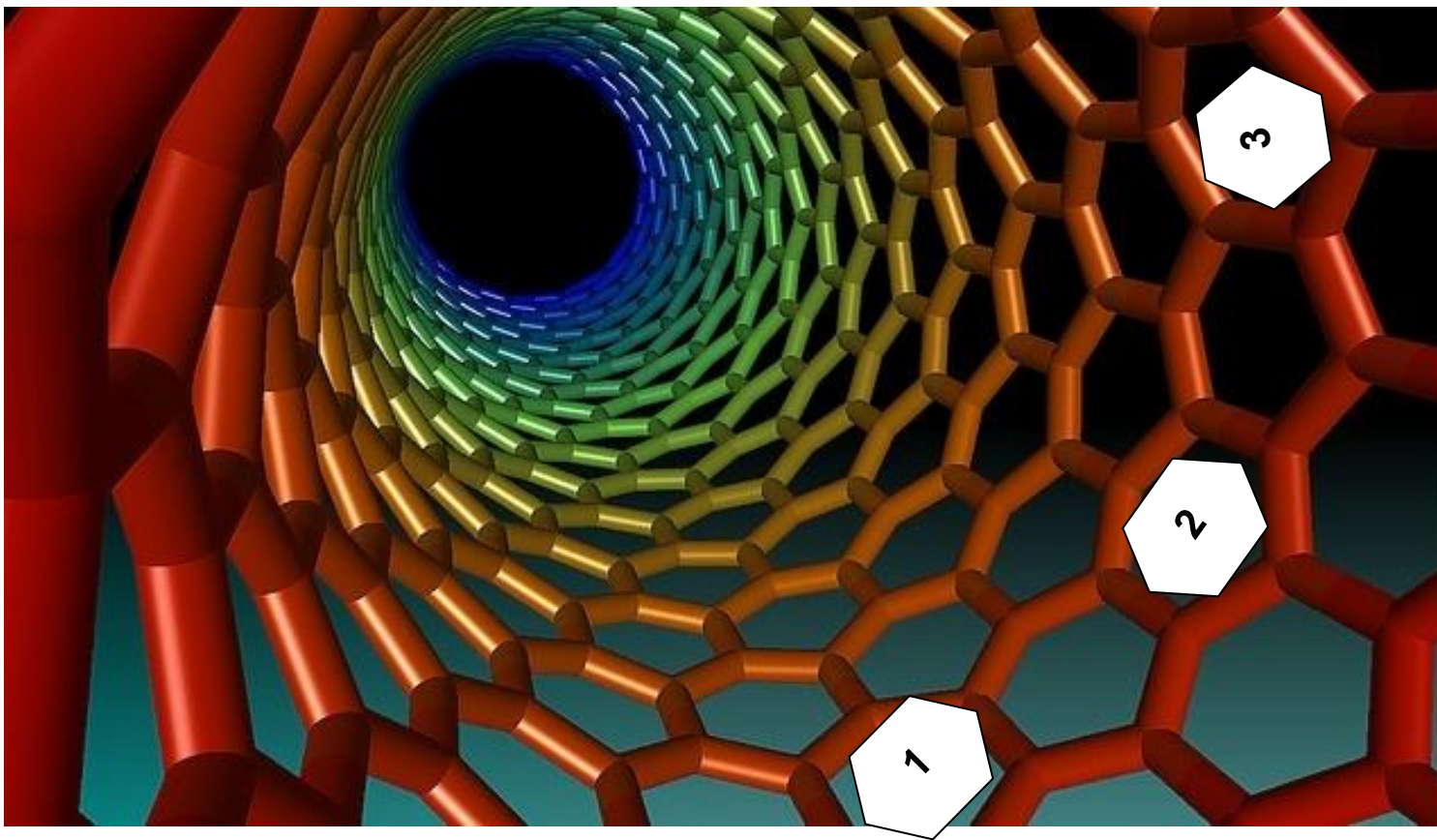
# Параметры и свойства нанотрубок, существенные для их использования в качестве армирования



При использовании УНТ в качестве армирования существенными являются их **геометрические параметры** и **механические свойства**.



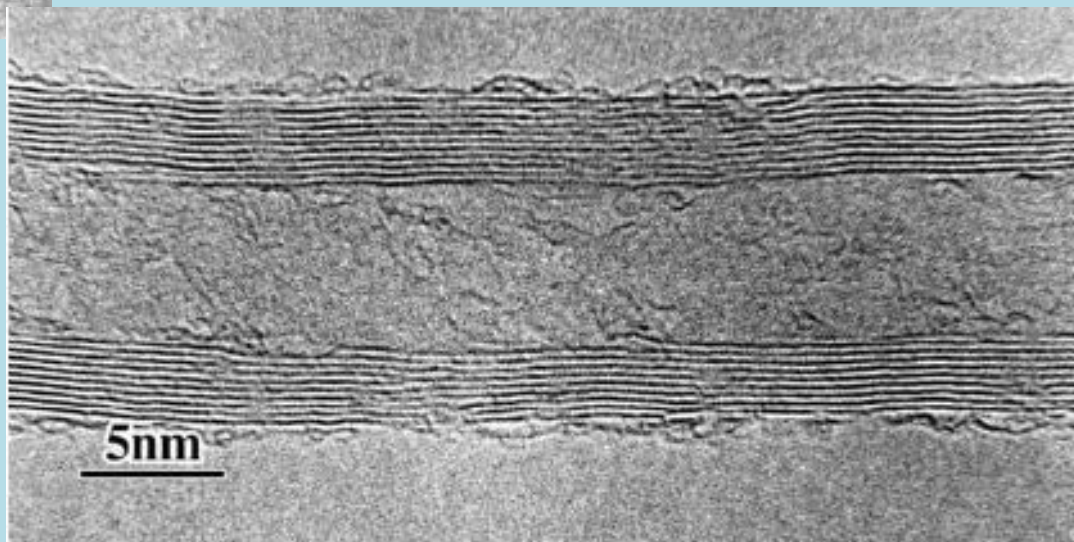
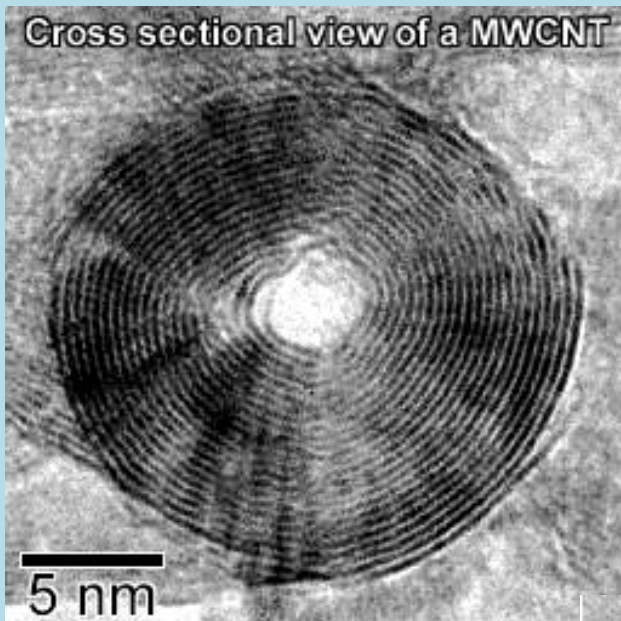
*Нажимай на выделенные элементы, чтобы ознакомиться со свойствами УНТ.*



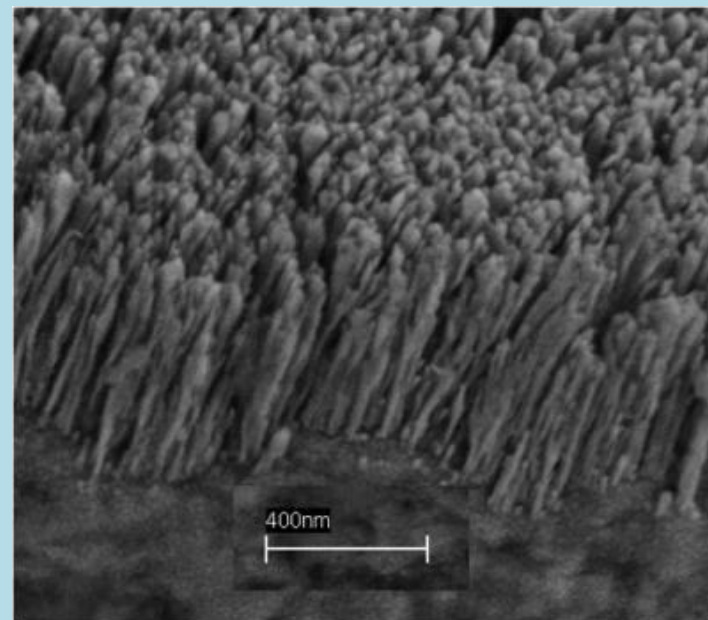
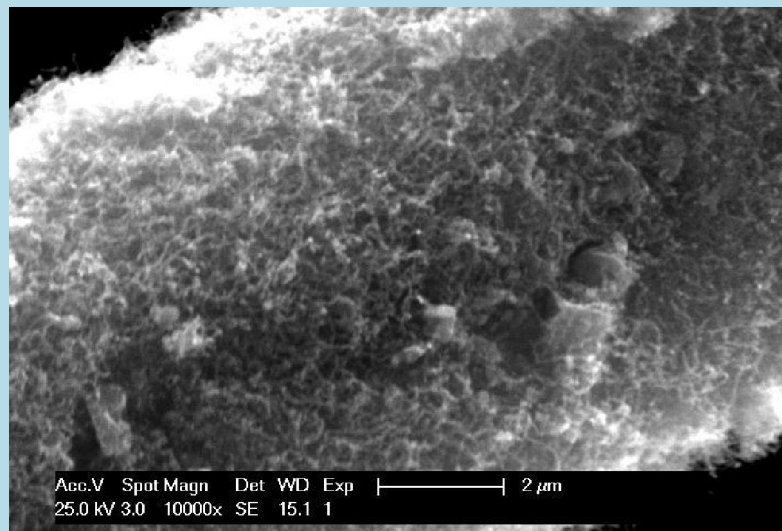
| Геометрия нанотрубки                                                                                                                                                                                        | <u>Удельная поверхность и расстояние между УНТ</u>                                                                                                            | <u>Механические свойства УНТ</u>                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| УНТ представляет из себя трубку (одностенная УНТ, ОСУНТ) или вложенные трубки (многостенная УНТ, МСУНТ), образованные цилиндрической поверхностью графена. МСУНТ могут обладать и более сложной структурой. |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                |
| <b>Толщина стенки</b>                                                                                                                                                                                       | Толщину стенки можно считать эквивалентной расстоянию между слоями графена в кристаллическом графите, равному 0,34 нм                                         |                                                                                                                                |
| <b>Количество стенок</b>                                                                                                                                                                                    | Количество стенок в МСУНТ может быть от двух до двадцати-тридцати                                                                                             |                                                                                                                                |
| <b>Диаметр</b>                                                                                                                                                                                              | Диаметр ОСУНТ составляет от 2...10 нм, МСУНТ – 10...30 нм                                                                                                     |  <a href="#">Посмотреть на микроскопе</a>   |
| <b>Длина</b>                                                                                                                                                                                                | Обычная длина УНТ составляет несколько микрометров, но могут быть выращены УНТ с длиной в несколько миллиметров                                               |                                                                                                                                |
| <b>Отношение длины к диаметру</b>                                                                                                                                                                           | Отношение длины к диаметру УНТ составляет несколько сот и больше. Нанотрубки можно представлять себе как волокна с диаметров в несколько нанометров           |                                                                                                                                |
| <b>Искривление</b>                                                                                                                                                                                          | УНТ «россыпью» или распределенные в полимере сильно искривлены. УНТ, выращенные на волокнах («лес») могут быть как искривленными, так и почти прямыми         |                                                                                                                                |
| <b>Плотность стенок</b>                                                                                                                                                                                     | Плотность стенок УНТ может быть принята равной 2,0 г/м <sup>3</sup> . Эта плотность соответствует массе графеновой стенки с толщиной, принятой равной 0,34 нм |  <a href="#">Посмотреть на микроскопе</a> |



## Структура стенок МВУНТ (снимок на просвечивающем электронном микроскопе)



## «Лес» УНТ на углеродном волокне и «ковер» параллельный УНТ



| <u>Геометрия нанотрубки</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>Удельная поверхность и расстояние между УНТ</b> | <u>Механические свойства УНТ</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|
| <p>Размеры ОСУНТ близки к размерам макромолекул полимера; из-за малых размеров УНТ обладают удельной поверхностью (отношение поверхности объекта к его объему) в 1000 раз большей, чем углеродные волокна.</p> <p>Это приводит к чрезвычайно малым, порядка нескольких нанометров, расстояниям между УНТ даже при небольшом их объемном содержании в несколько процентов и существенному взаимодействию между УНТ, образованию агломератов.</p> |                                                    |                                  |

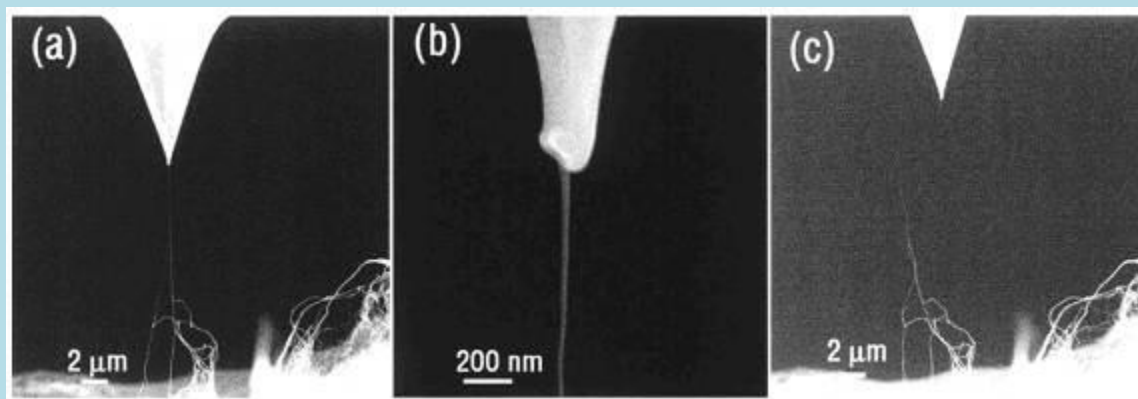




| <u>Геометрия нанотрубки</u>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <u>Удельная поверхность и расстояние между УНТ</u> | <b>Механические свойства УНТ</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|
| <p>Механические свойства УНТ определяются механическими свойствами графеновых стенок. Жесткость и прочность стенки УНТ выражаются в единицах напряжения, т. е. силы на единицу площади. При этом толщина стенки принимается равной <math>w = 0,34</math> нм, и усилие <math>F</math>, соответствующее напряжению <math>\sigma</math>, равно <math>F = \sigma \cdot nw \cdot \pi(D^2 - (D - nw)^2)</math>, где:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <math>n</math> – количество стенок МСУНТ;</li><li>• <math>D</math> – внешний диаметр УНТ.</li></ul> <p>Обычно принимаемое значение модуля Юнга стенки УНТ составляет 1000 ГПа .</p> <p>Теоретическое значение прочности стенок УНТ составляет порядка 100 ГПа; измеренные значения составляют несколько десятков гигапаскалей, с разбросом, определяемым наличием дефектов структуры УНТ .</p> <p>Соппротивление УНТ деформациям в поперечном направлении мало из-за слабой связи стенок МСУНТ. Эффективный модуль Юнга при нагружении в поперечном направлении нанотрубки, представленной как трансверсально изотропное волокно, составляет несколько гигапаскалей.</p> |                                                    |                                  |



Это значение соответствует среднему значению, получаемому как при теоретических атомистических расчетах, так и при прямых измерениях с ОСУНТ. При растяжении МСУНТ жесткость может быть значительно меньше вследствие телескопического эффекта (или эффекта «шпага в ножнах»): вложенные трубки могут проскальзывать между собой. Из-за этого эффективная жесткость при растяжении МСУНТ может соответствовать только жесткости одной трубки.



# Связь между массовой и объемной долями УНТ



Посмотри, как взаимосвязаны между собой массовая и объемная доли УНТ.

Если УНТ распределены в полимере, то эффективные свойства такого материала определяются объемной долей армирующих УНТ,  $V_{УНТ}$



Однако обычно известна массовая доля УНТ, смешиваемых со связующим полимером,  $m_{УНТ}$ . Эти две величины связаны соотношением, выражающим соотношение массы УНТ к массе смеси



$V_{УНТ} = \frac{m_{УНТ}/\rho_{УНТ}}{m_{УНТ}/\rho_{УНТ} + (1 - V_{УНТ})/\rho_m}$ , где:

- $\rho$  – плотность материала;
- индекс « $m$ » – связующее



$m_{УНТ} = \frac{\rho_{УНТ} V_{УНТ}}{\rho_{УНТ} V_{УНТ} + \rho_m (1 - V_{УНТ})}$ , где:

- $\rho$  – плотность материала;
- индекс « $m$ » – связующее



Важно понимать, что если принимается  $\rho_{УНТ} = 2.0 \text{ г/см}^3$ , то объем УНТ, входящий в эти формулы – это объем *стенок* УНТ, а не всей УНТ как цилиндрического объекта.



# Контрольный вопрос



А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь решить представленную задачу.

Рассчитай минимальное количество катализатора, необходимого для производства 1 г УНТ методом химического осаждения из газовой фазы.

Дано:

- Длина УНТ ( $L$ ) = 1  $\mu\text{м}$
- Диаметр ( $d$ ) = 10 нм
- Средняя плотность = 1,4 г/см<sup>3</sup>.
- Примем частицу **Fe** катализатора сферической с диаметром, равным диаметру УНТ.

Решение:

На 1 г УНТ потребуется  мг катализатора.



Впиши получившийся ответ в поле.  
У тебя есть две попытки.

Подсказка

Ответить

$\frac{\pi d^3}{6}$  – объем сферической частицы катализатора;

$L \frac{\pi d^2}{4}$  – объем цилиндрической УНТ.



Ты ошибся! Попробуй еще раз.

Рассчитай минимальное количество катализатора, необходимого для производства 1 г УНТ методом химического осаждения из газовой фазы.

Дано:

- Длина УНТ ( $L$ ) = 1  $\mu\text{м}$
- Диаметр ( $d$ ) = 10 нм
- Средняя плотность = 1,4 г/см<sup>3</sup>.
- Примем частицу **Fe** катализатора сферической с диаметром, равным диаметру УНТ.

Решение:

На 1 г УНТ потребуется  мг катализатора.



Впиши получившийся ответ в поле.  
У тебя есть осталась одна попытка.

Подсказка

Ответить

$\frac{\pi d^3}{6}$  – объем сферической частицы катализатора;

$L \frac{\pi d^2}{4}$  – объем цилиндрической УНТ.





Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.  
Ознакомься с решением.

**Дано:**

- Длина УНТ ( $L$ ) = 1  $\mu\text{м}$
- Диаметр ( $d$ ) = 10 нм
- Средняя плотность = 1,4 г/см<sup>3</sup>.
- Примем частицу **Fe** катализатора сферической с диаметром, равным диаметру УНТ.

**Решение:**

Минимально на одну УНТ необходима одна частица катализатора. Тогда соотношение массы катализатора и УНТ равно (плотность железа 7,8 г/см<sup>3</sup>):

$$\frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{УНТ}}} = \frac{\rho_{\text{к}} \frac{\pi d^3}{6}}{\rho_{\text{УНТ}} L \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{2\rho_{\text{к}} d}{3\rho_{\text{УНТ}} L} = 0.035$$

На 1 г УНТ потребуется 35 мг катализатора.



Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом и решением.

**Дано:**

- Длина УНТ ( $L$ ) = 1  $\mu\text{м}$
- Диаметр ( $d$ ) = 10 нм
- Средняя плотность = 1,4 г/см<sup>3</sup>.
- Примем частицу **Fe** катализатора сферической с диаметром равным диаметру УНТ.

**Решение:**

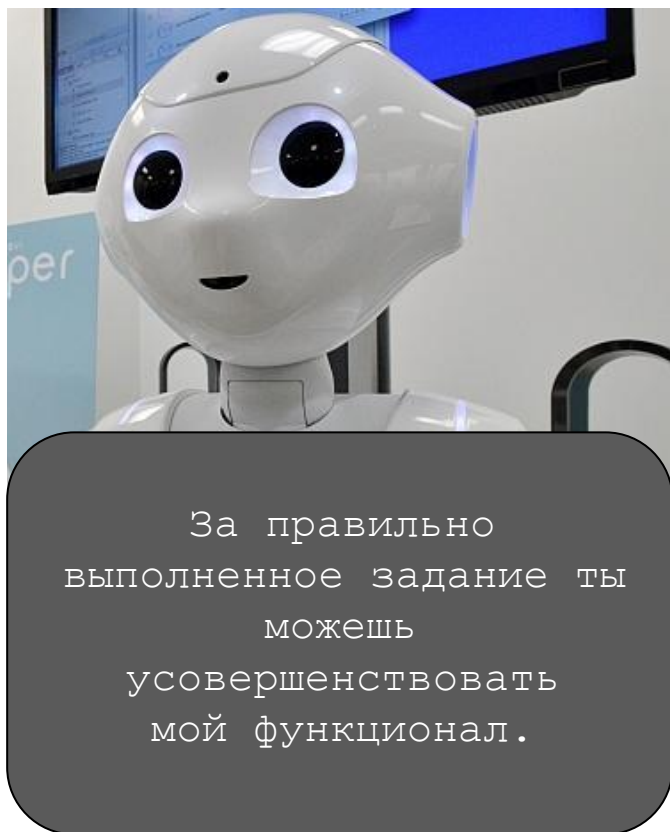
Минимально на одну УНТ необходима одна частица катализатора. Тогда соотношение массы катализатора и УНТ равно (плотность железа 7,8 г/см<sup>3</sup>):

$$\frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{УНТ}}} = \frac{\rho_{\text{к}} \frac{\pi d^3}{6}}{\rho_{\text{УНТ}} L \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{2\rho_{\text{к}} d}{3\rho_{\text{УНТ}} L} = 0.035$$

На 1 г УНТ потребуется 35 мг катализатора.



# Твои результаты (вариант 1)

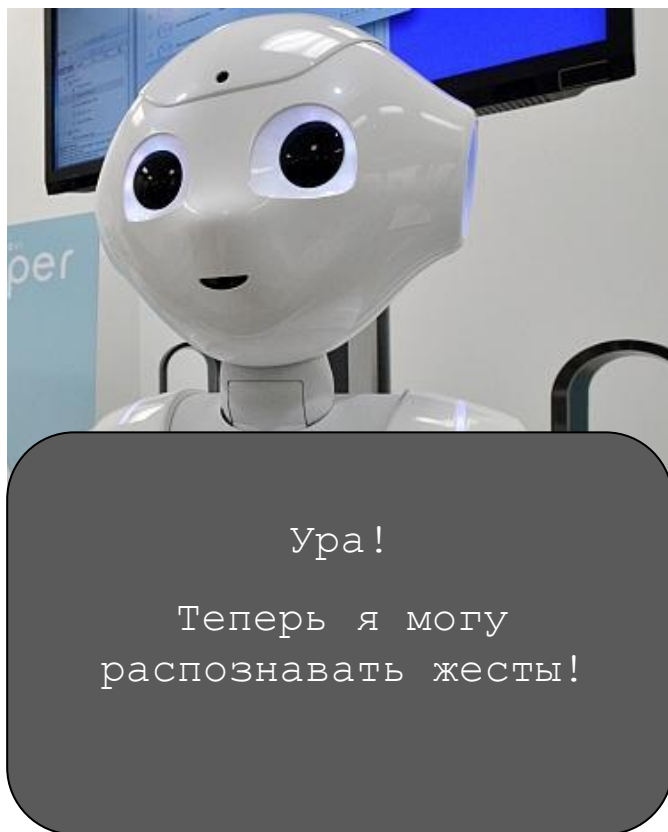


| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



Выбери вторую дополнительную опцию.

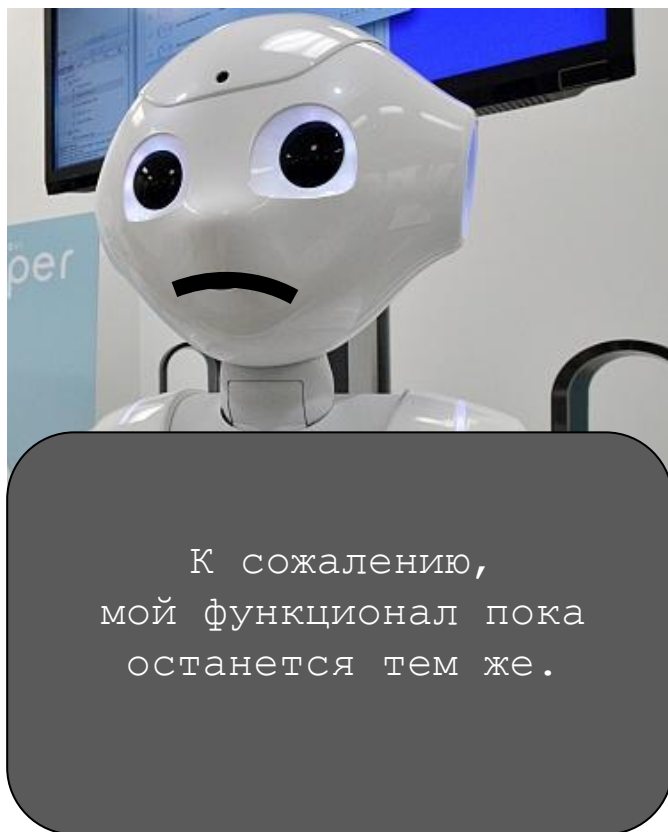
# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                       | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Твои результаты (вариант 2)

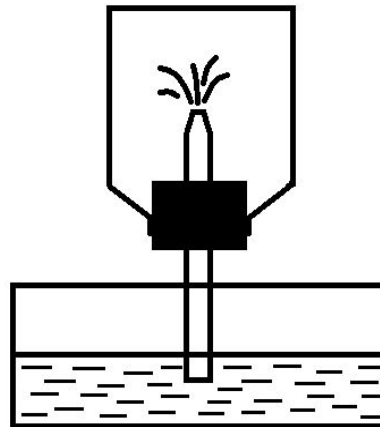
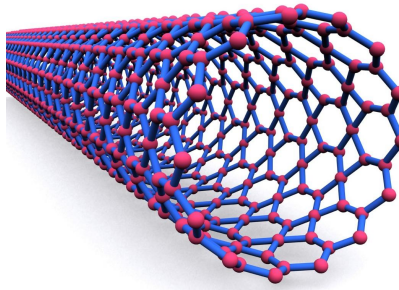


| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      |                         | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



## Раздел 2

# Полимеры, армированные нанотрубками



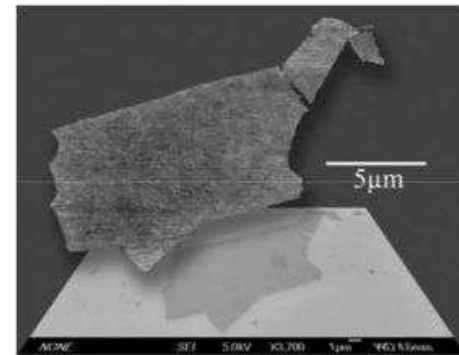
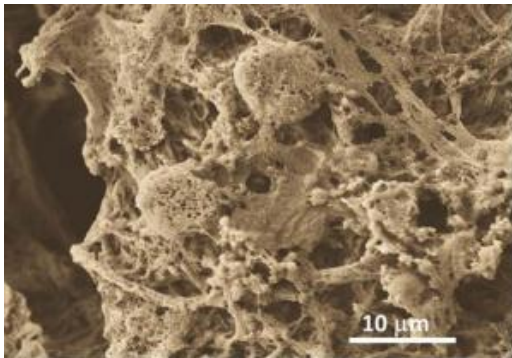
# Армирующие элементы



Простейший нано-композит представляет собой армированный на нано-масштабе полимер.

**Армирующими элементами** могут служить нанотрубки, нано-глины, чешуйки графена и др.

Армирование нанотрубками подобно армированию полимера волокнами конечной длины.



**Нано-глины**



**Чешуйки графена**



# Диспергированное УНТ-армирование



Хочешь узнать, какую роль в армировании играет диспергирование?



*Нажми на кнопку, чтобы узнать подробнее.*





# Диспергированное УНТ-армирование



Хочешь узнать, какую роль в армировании играет диспергирование?



*Нажми на кнопку, чтобы узнать подробнее.*



Достижение равномерного распределения (диспергирования) УНТ в полимере является необходимым условием эффективного армирования.



# Диспергированное УНТ-армирование



Хочешь узнать, какую роль в армировании играет диспергирование?



*Нажми на кнопку, чтобы узнать подробнее.*



Неравномерное распределение УНТ, а особенно образование агломератов, ведет к появлению концентраторов напряжений при нагружении материала, а, следовательно, снижает его прочность и трещиностойкость.

# Диспергированное УНТ-армирование



**Хочешь узнать, какую роль в армировании играет диспергирование?**



Достижение равномерного распределения (диспергирования) УНТ в полимере является необходимым условием эффективного армирования.



Неравномерное распределение УНТ, а особенно образование агломератов, ведет к появлению концентраторов напряжений при нагружении материала, а, следовательно, снижает его прочность и трещиностойкость.



# Диспергированное УНТ-армирование



Нанотрубки «россыпью» спутываются вследствие высокой удельной поверхности УНТ и их взаимодействия, обусловленного **силами Ван-дер-Ваальса** . Простое размешивание смеси УНТ и жидкого полимера не создает сил сдвига, достаточных для разделения агломератов УНТ.

## Методы, применяемые для обеспечения равномерного распределения УНТ в полимере

Методы, основанные на увеличении подвижности УНТ в полимере с помощью воздействия ультразвука 

sonication

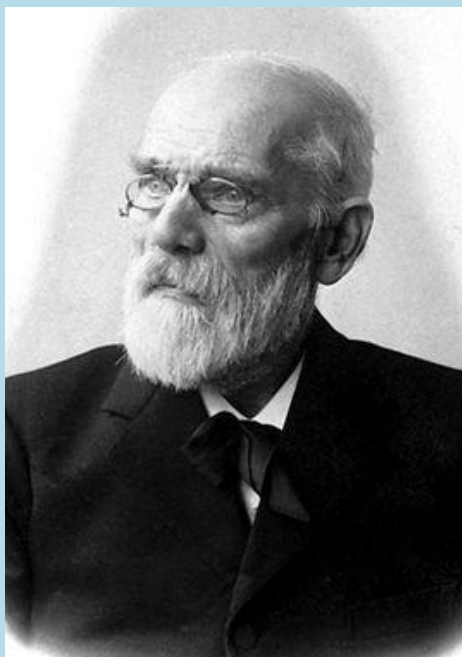
Методы, основанные на приложении к смеси УНТ и полимера больших сдвиговых и растягивающих усилий с помощью **трехвалковой мельницы** 

Методы, основанные на сочетании способов



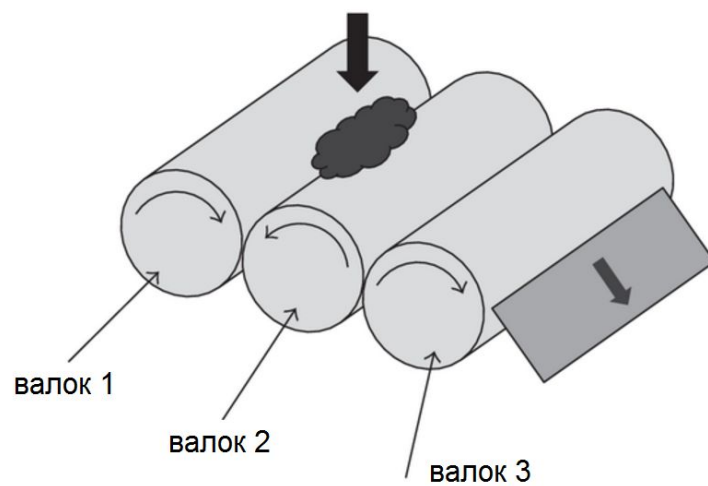
Для управления порядком появления схемы используй кнопку





Й. Д. Ван дер Ваальс

**Силы Ван-дер-Ваальса** – силы межмолекулярного (и межатомного) взаимодействия с энергией 10–20 кДж/моль. Открыты голландским физиком Й. Д. Ван дер Ваальсом в 1869 году.



# Диспергированное УНТ-армирование



Нанотрубки «россыпью» спутываются вследствие высокой удельной поверхности УНТ и их взаимодействия, обусловленного силами **Ван-дер-Ваальса** . Простое размешивание смеси УНТ и жидкого полимера не создает сил сдвига, достаточных для разделения агломератов УНТ.

## Методы, применяемые для обеспечения равномерного распределения УНТ в полимере



# Диспергированное УНТ-армирование



В результате диспергирования УНТ в полимере создается **суперконцентрат** (маточная смесь ) – смесь хорошо диспергированных УНТ с полимером в концентрации до 20 % УНТ по массе.

masterbatch

## Типы суперконцентратов УНТ, выпускаемых промышленностью

Суперконцентраты в  
термореактивных (эпоксидных)   
связующих

Суперконцентраты в  
термопластических связующих 



Для управления порядком появления схемы используй кнопку







**Термореактивные связующие – эпоксидные связующие.**



**Термопластические связующие** – полиамиды, полипропилен, полиэфиркетон, поликарбонат и др.

# Диспергированное УНТ-армирование



В результате диспергирования УНТ в полимере создается **суперконцентрат** (маточная смесь ) – смесь хорошо диспергированных УНТ с полимером в концентрации до 20 % УНТ по массе.

masterbatch

## Типы суперконцентратов УНТ, выпускаемых промышленностью

Суперконцентраты в  
термореактивных (эпоксидных)   
связующих

Жидкие

Суперконцентраты в  
термопластических связующих 

Твердые, в виде пленок, гранул или  
волокон



# Диспергированное УНТ-армирование



Кроме технологических преимуществ, применение суперконцентрата позволяет избежать работы с **сухими нанотрубками** у конечного потребителя.

Сухие нанотрубки, подобно **асбестовым волокнам**, являются канцерогеном и работа с ними требует применения сложных мер защиты. Когда нанотрубки связаны, в готовом композите или в суперконцентрате, работа требует только обычных мер предосторожности при работе с полимерными смолами.

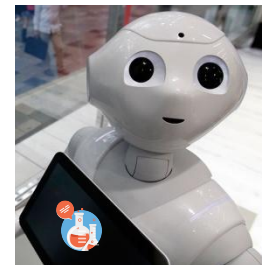


Асбестовое волокно

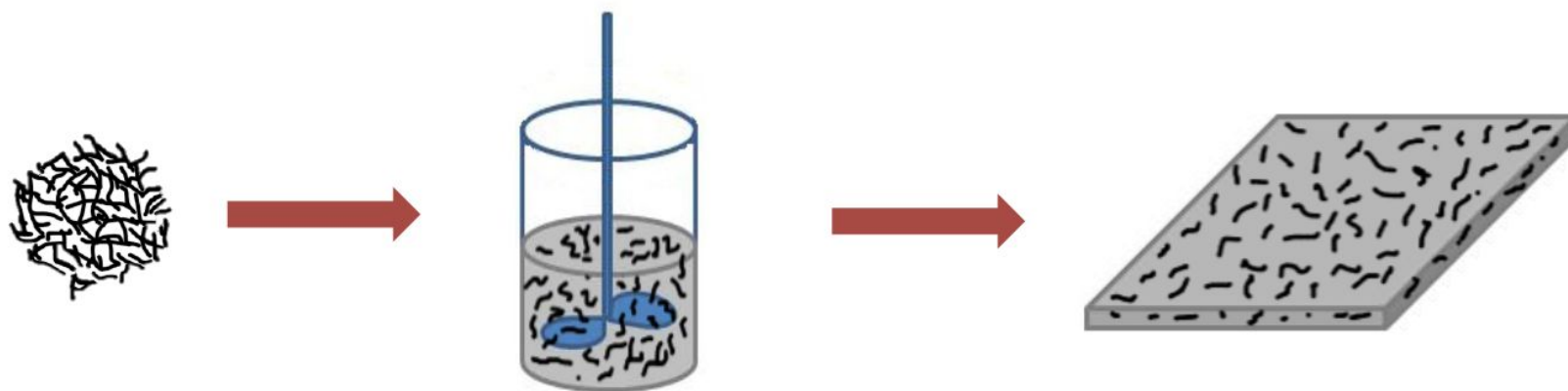


# Диспергированное УНТ-армирование

Процедура получения детали из nano-армированного полимера с использованием суперконцентраата включает три стадии.



*Нажми кнопку на моем планшете, чтобы запустить процесс.*



# Диспергированное УНТ-армирование

Процедура получения детали из nano-армированного полимера с использованием суперконцентраата очень интересная и включает три стадии.



*Поочередно нажимай кнопки, чтобы ознакомиться со стадиями процесса.*

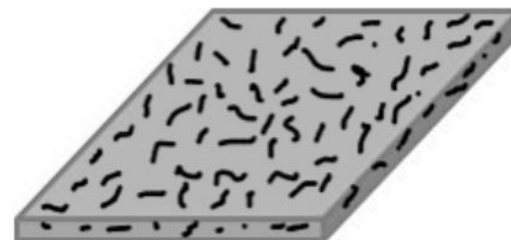
1



2



3



## Стадия 1



|                                        |                                                                                                            |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Термореактивные<br/>связующие</b>   | Разведение суперконцентрата УНТ до требуемой концентрации, добавление отвердителя и перемешивание          |
| <b>Термопластические<br/>связующие</b> | Нагрев суперконцентрата УНТ до температуры плавления, разведение до требуемой концентрации и перемешивание |

## Стадия 2



|                                        |                  |
|----------------------------------------|------------------|
| <b>Термореактивные<br/>связующие</b>   | Заполнение формы |
| <b>Термопластические<br/>связующие</b> | Заполнение формы |



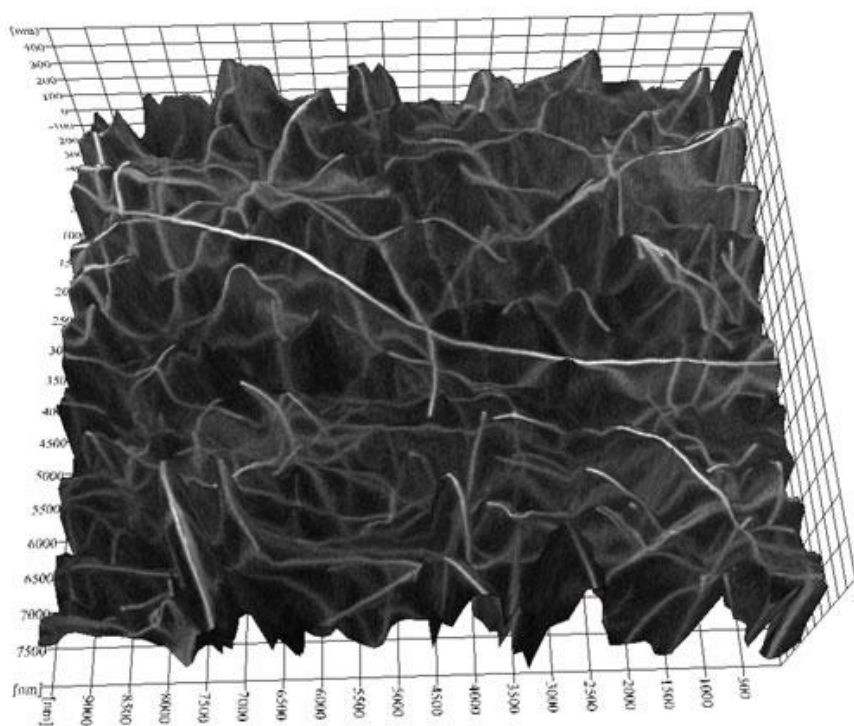
## Стадия 3



|                                        |                             |
|----------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Термореактивные<br/>связующие</b>   | Полимеризация (отверждение) |
| <b>Термопластические<br/>связующие</b> | Охлаждение и отверждение    |

# Диспергированное УНТ-армирование

Маточная смесь разводится до концентрации УНТ от 0,1 % до 1...2 %. При такой концентрации можно добиться равномерного распределения УНТ после отверждения связующего.



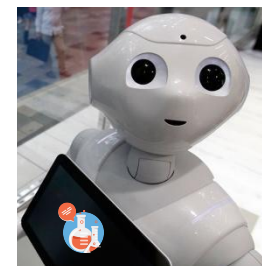
УНТ, распределенные в полиимидной пленке

Более высокая концентрация УНТ в полимере приводит к образованию агломератов и пониженной прочности и трещиностойкости, охрупчиванию полимера.

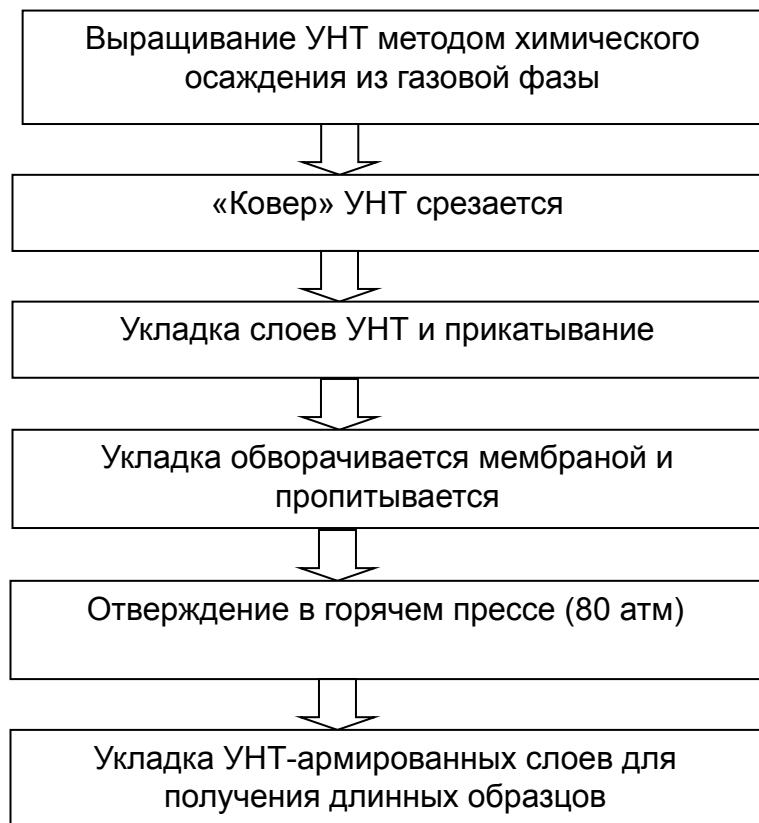


# Однонаправленное УНТ-армирование

Однонаправленное УНТ-армирование не менее увлекательный процесс.



*Нажми кнопку на моем планшете, чтобы запустить процесс.*



# Однонаправленное УНТ-армирование

Однонаправленное УНТ-армирование не менее увлекательный процесс.



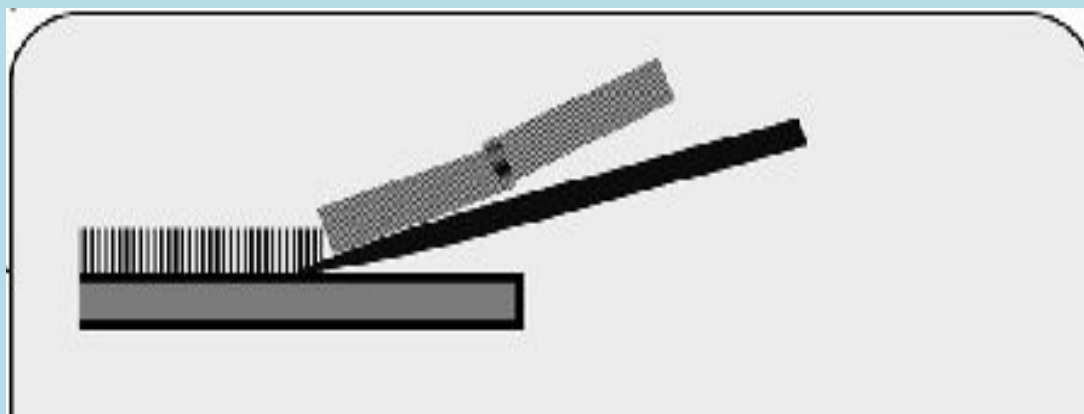
*Поочередно нажимай кнопки, чтобы ознакомиться со стадиями процесса.*



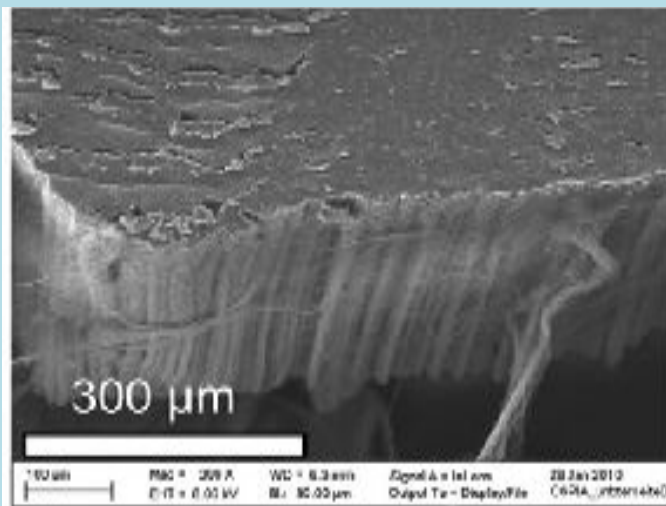
## Стадия 1



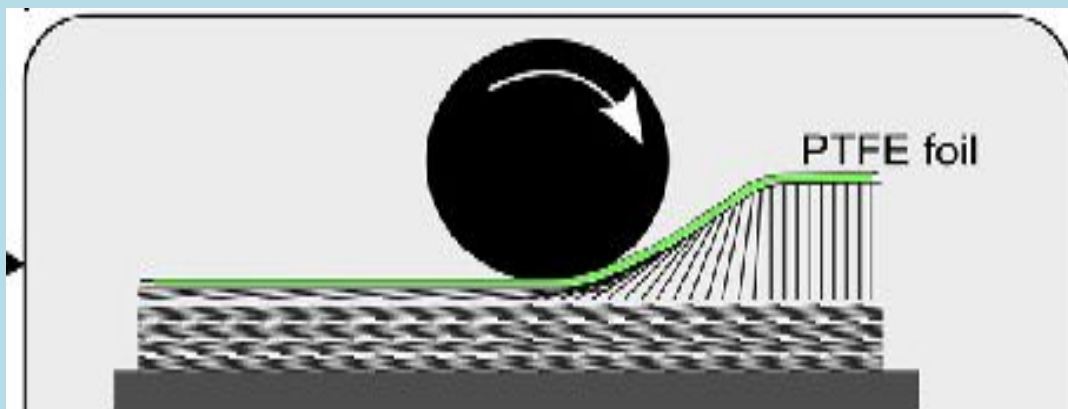
## Стадия 2



«Ковёр» УНТ срезается



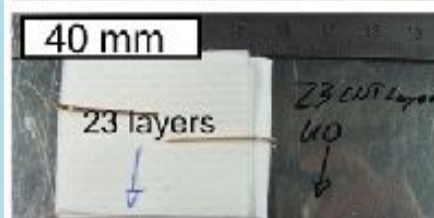
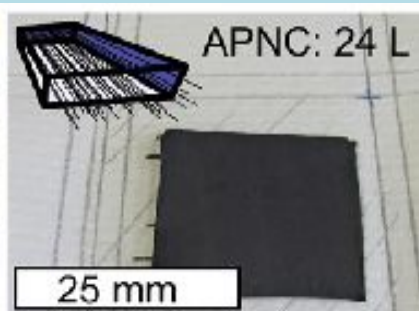
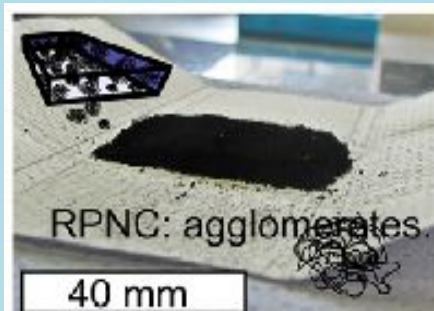
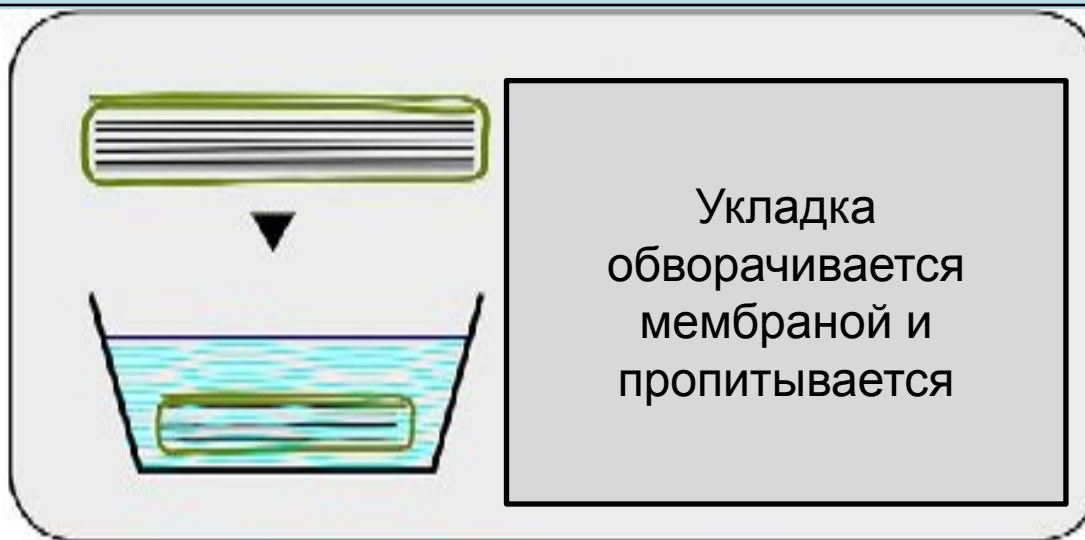
## Стадия 3



Укладка слоев УНТ и прикатывание

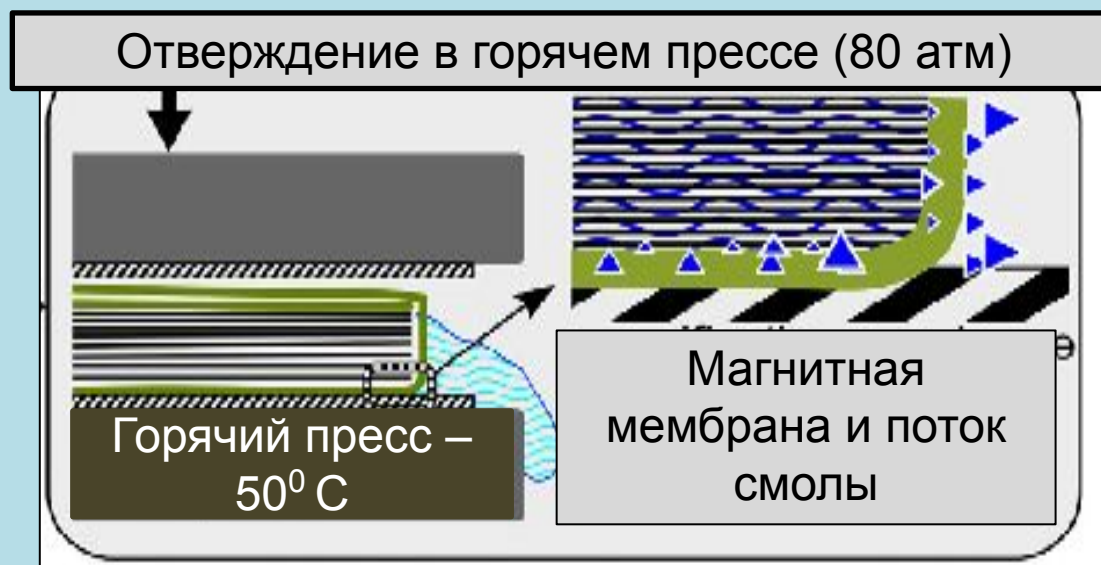


## Стадия 4

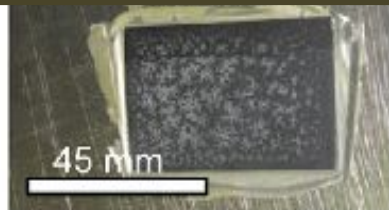




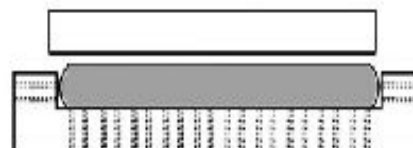
## Стадия 5



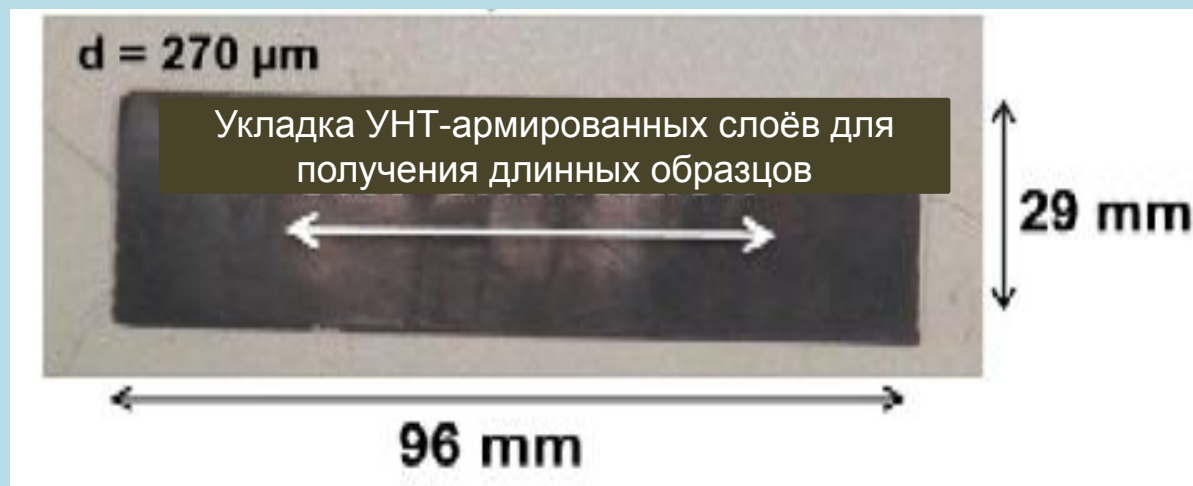
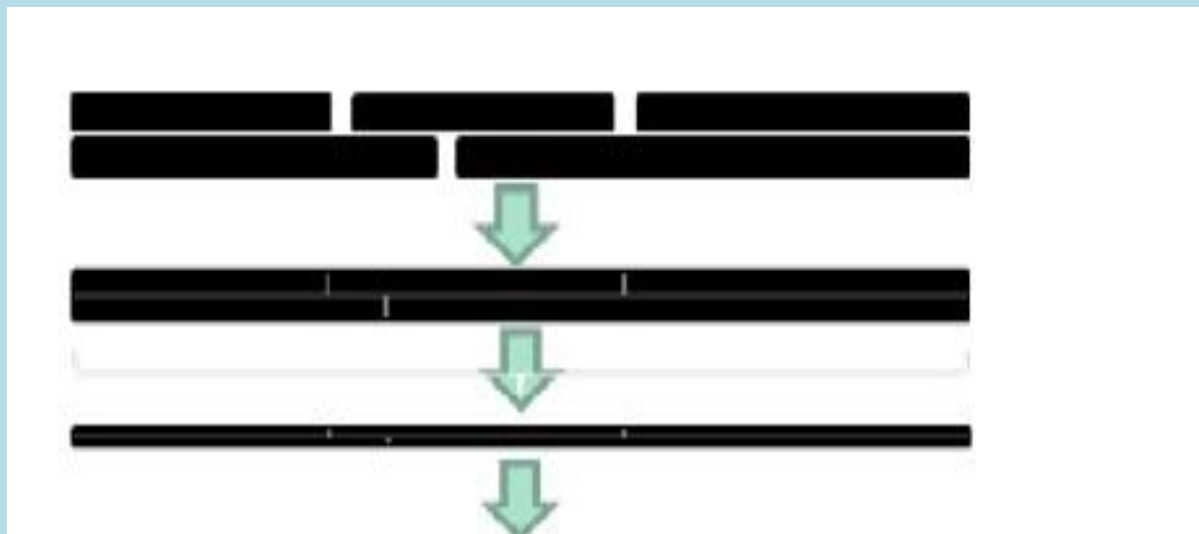
Спрессованные и отвержденные  
слои УНТ с мембраной



Спрессованные и отвержденные  
слои УНТ без мембраны



## Стадия 6



# Механические свойства УНТ-армированных полимеров: исходные данные для оценки



Для оценок свойств УНТ-армированных полимеров  
примем следующие свойства УНТ и связующего:

|                  |                                                                                                                                                                                                              |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>УНТ</b>       | модуль Юнга стенок УНТ в продольном $E_{УНТ, L} = 1000$ ГПа (теоретическое значение без учета дефектов),<br>эффективный модуль Юнга УНТ в поперечном направлении $E_{УНТ, T} = 10$ ГПа (оценка по максимуму) |
| <b>Связующее</b> | модуль Юнга = 3 ГПа (характерное значение для эпоксидных связующих)                                                                                                                                          |

Примем для оценок массовую концентрацию УНТ 1%. Тогда, при плотности связующего  $1,2 \text{ г/см}^3$ , объемная концентрация стенок УНТ в полимере будет равна (2.2) 0,6 %.



# Жесткость



Жесткость (модуль Юнга) композита с однонаправленным армированием может быть оценена с помощью **правила смесей**:

$$E_{c,L} = V_{\text{УНТ}} E_{\text{УНТ},L} + (1 - V_{\text{УНТ}}) E_m$$

$$\frac{1}{E_{c,T}} = \frac{V_{\text{УНТ}}}{E_{\text{УНТ},T}} + \frac{(1 - V_{\text{УНТ}})}{E_m}$$



Сохранить формулы



Сохрани формулы. Они понадобятся тебе в дальнейшем при решении задачи.

где:

- индекс «с» – «композит»;
- « $m$ » – связующее (матрицу);
- $L$  – свойства в продольном направлении (параллельно УНТ);
- $T$  – свойства в поперечном направлении;
- $E$  – модули Юнга

**Вычислить**



Нажми кнопку, чтобы вычислить модули Юнга по приведенным формулам.



| Массовая<br>концентрация УНТ                                                                                         | $E_{c,L}$ | $E_{c,T}$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| 1 %                                                                                                                  | 8.98 ГПа  | 3.01 ГПа  |
| 70 % (как у квази-<br>однонаправленного<br>нано-армированного<br>полимера),<br>соответствующей<br>объемной доле 58 % | 580 ГПа   | 5,05 ГПа  |





Таким образом, добавление всего 1 % УНТ по массе может дать трехкратное увеличение модуля Юнга полимера в направлении однонаправленного нано-армирования.



Однако реально достижимые значения  $E_{c,L}$  составляют 30 ... 35 ГПа. Это объясняется непрямоугольной УНТ и их неидеальной параллельностью.

# Жесткость



Для случайно-ориентированного армирования (индекс «R») оценка модуля Юнга дается формулой:

$$E_{c,R} = \frac{1}{5} E_{c,L} + \frac{4}{5} E_{c,T}$$



*Сохранить формулу*



*Сохрани формулу. Она понадобится тебе в дальнейшем при решении задачи.*

Эта формула получена осреднением правила смесей по всем возможным направлениям ориентации УНТ.



*Нажми кнопку, чтобы вычислить модули Юнга по приведенной формуле.*

**Вычислить**







| Массовая концентрация<br>УНТ | $E_{c,R}$ |
|------------------------------|-----------|
| 1 %                          | 4.2 ГПа   |





Увеличение модуля Юнга по сравнению с неармированным полимером составляет 40 %. Этот порядок значений модуля

Юнга УНТ-армированных полимеров подтверждается экспериментом. При увеличении концентрации УНТ модуль Юнга композита должен расти, однако в реальности при достижении концентрации УНТ около 1% по массе начинается образование агломератов, и жесткость композита падает.

# Прочность и трещиностойкость



Трещиностойкость армированного полимера  $G_c$  характеризуется энергией  $W$ , расходуемой на образование единицы поверхности макро-трещины  $S$ :

$$G_c = \frac{W}{S}$$

Выразим энергию  $W$  как сумму энергии, потраченной на образование новых свободных поверхностей полимера, и дополнительной энергии, потраченной на разрушение связей армирующих элементов:

$$W = G_p S_p + W_{\text{УНТ}}$$

Тогда:

$$G_c = G_p \frac{S_p}{S} + \frac{W_{\text{УНТ}}}{S}$$

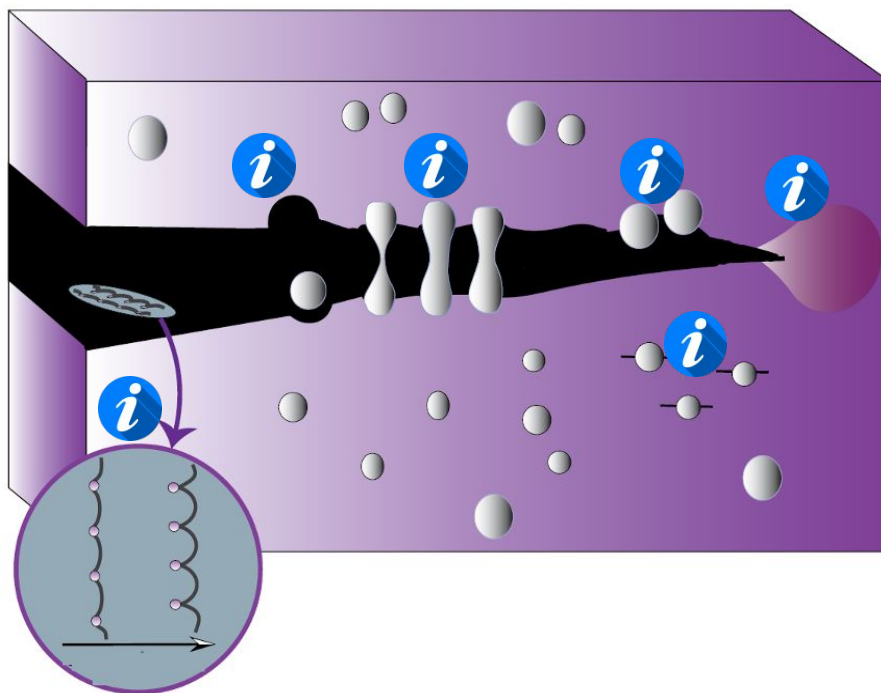


# Прочность и трещиностойкость

Трещиностойкость хрупких полимеров в присутствии армирующих нано-элементов повышается по сравнению с  $G_p$  в основном вследствие действия разнообразных механизмов.



*Нажимай кнопки, чтобы ознакомиться с этими механизмами.*



*Нажми кнопку, чтобы проанализировать механизмы, определить общие факторы их действия.*

**Проанализировать**



Увеличение фронта трещины



Отклонение трещины при встрече с жесткими нано-элементами



Деформация, вытягивание и разрыв нано-армирования



Разрыв связи связующего с нано-элементами





Пластическая деформация на кончике трещины



Нано-повреждаемость



Работу механизмов можно суммировать в виде двух факторов, влияющих на  $G_p$ :

1. Увеличение образованной свободной поверхности полимера  $S_p$  при отклонении траектории трещины при встрече с жесткими элементами.
2. Появление дополнительной энергии  $W_{УНТ}$ , затрачиваемой на разрушение армирующих элементов или их связи с полимером.

Разумеется, все эти механизмы «включаются», только если УНТ хорошо диспергированы в полимере и трещина наверняка встретит их на своем пути.

# Сравнение с композитами, армированными углеродными волокнами

Сравни армирование композитов УНТ и армирование композитов углеродными волокнами.



|                                        | Армирование УНТ                                                                     | Армирование углеродными волокнами                                                     |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Жесткость                              |    |    |
| Прочность при нагружении вдоль волокна |   |   |
| Размер                                 |  |  |





УНТ превосходят в разы углеродные волокна по жесткости.



УНТ превосходят в разы углеродные волокна по прочности при  
нагрузении вдоль волокна.



«Изъян» УНТ по  
сравнению с  
углеродными  
волокнами

Показатели  
жесткости и  
прочности УНТ-  
армированных  
композитов

Показатель  
прочность  
однонаправленног  
о слоя при  
нагружении  
поперек волокон

Значение  
увеличения  
жесткости,  
прочности и  
трещиностойкости  
связующего



*Для получения информации последовательно перемещайся по вкладкам.*



| «Изъян» УНТ по сравнению с углеродными волокнами | <u>Показатели жесткости и прочности УНТ-армированных композитов</u> | <u>Показатель прочность однонаправленного слоя при нагружении поперек волокон</u> | <u>Значение увеличения жесткости, прочности и трещиностойкости связующего</u> |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|

УНТ имеют фундаментальный, неустранимый «изъян» по сравнению с углеродными волокнами: размер. Различие диаметра УНТ и углеродных волокон в несколько сот раз приводит к такому же превышению удельной поверхности УНТ и расстояния между диспергированными УНТ, создавая Ван-дер-Ваальсовы силы взаимодействия между ними, которое приводит к образованию агломератов. Ограничение концентрации диспергированных УНТ величиной около 1 % по массе имеет, таким образом, неустранимый характер. Те же самые силы взаимодействия УНТ в из квази-однонаправленных конфигурациях приводят к искривлению УНТ и, следовательно, снижению жесткости и прочности по сравнению с теоретически рассчитанными для однонаправленного армирования значениями.





| <u>«Изъян» УНТ по сравнению с углеродными волокнами</u> | Показатели жесткости и прочности УНТ-армированных композитов | <u>Показатель прочность однонаправленного слоя при нагружении поперек волокон</u> | <u>Значение увеличения жесткости, прочности и трещиностойкости связующего</u> |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|

В результате показатели жесткости и прочности УНТ-армированных композитов не достигают значений, обычных для армирования углеродными волокнами с их почти идеальной направленностью и прямизной. УНТ не могут заменить углеродные волокна в качестве армирования конструкционных материалов.



| <u>«Изъян» УНТ по сравнению с углеродными волокнами</u> | <u>Показатели жесткости и прочности УНТ-армированных композитов</u> | Показатель прочности однонаправленного слоя при нагружении поперек волокон | <u>Значение увеличения жесткости, прочности и трещиностойкости связующего</u> |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|

Однако следует вспомнить, что не все механические свойства углепластиков определяются свойствами волокнистого армирования. Такие показатели, как, например, прочность однонаправленного слоя при нагружении поперек волокон, связанный с ней порог образования микротрещин связующего в углепластиках, стойкость к расслаиванию определяется свойствами связующего полимера. Эти показатели являются определяющими, если речь идет о проектировании материала, сочетающего малые деформации и высокую прочность с высокой трещиностойкостью и, следовательно, надежностью при ударных и длительных нагрузках.



|                                                         |                                                                     |                                                                                   |                                                                               |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <u>«Изъян» УНТ по сравнению с углеродными волокнами</u> | <u>Показатели жесткости и прочности УНТ-армированных композитов</u> | <u>Показатель прочности однонаправленного слоя при нагружении поперек волокон</u> | <b>Значение увеличения жесткости, прочности и трещиностойкости связующего</b> |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|

Мы видели, что жесткость, прочность и трещиностойкость связующего может быть увеличена на десятки, а то и на сотни процентов вследствие его УНТ-армирования. Таким образом, можно надеяться, что сочетание нано- и микро-армирования позволит создать «невозможный» жесткий и в то же время трещиностойкий материал.

# Контрольный вопрос



А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь ответить на вопросы.

**Массовая доля УНТ в УНТ-армированный полимерах ограничена величиной около 1%. Почему?**

УНТ очень дорогие, и использовать больше УНТ будет экономически невыгодно

Если положить слишком много УНТ, то материал будет слишком жесткий и хрупкий

При большей концентрации УНТ будут образовывать агломераты, и упрочнения полимера не получится



*Выбери один из вариантов ответа.  
У тебя есть две попытки.*

**Ответить**

**Ты ошибся! Попробуй еще раз.**

**Массовая доля УНТ в УНТ-армированных полимерах ограничена величиной около 1%. Почему?**

УНТ очень дорогие, и использовать больше УНТ будет экономически невыгодно

Если положить слишком много УНТ, то материал будет слишком жесткий и хрупкий

При большей концентрации УНТ будут образовываться агломераты, и упрочнения полимера не получится



*Выбери один из вариантов ответа.  
У тебя есть осталась одна попытка.*

**Ответить**

**Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.**

УНТ очень дорогие, и использовать больше УНТ будет экономически невыгодно

Если положить слишком много УНТ, то материал будет слишком жесткий и хрупкий

При большей концентрации УНТ будут образовывать агломераты, и упрочнения полимера не получится



**Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом.**

УНТ очень дорогие, и использовать больше УНТ будет экономически невыгодно

Если положить слишком много УНТ, то материал будет слишком жесткий и хрупкий

При большей концентрации УНТ будут образовывать агломераты, и упрочнения полимера не получится



# Контрольный вопрос



А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь ответить на вопросы.

Сравни жесткость УНТ-армированного полимера со случайной ориентацией УНТ и с параллельными УНТ. Каково (примерно) их соотношение?

1:100

1:5

1:2

Примерно одинаково



$$E_{c,L} = V_{\text{УНТ}} E_{\text{УНТ},L} + (1 - V_{\text{УНТ}}) E_m$$

$$\frac{1}{E_{c,T}} = \frac{V_{\text{УНТ}}}{E_{\text{УНТ},T}} + \frac{(1 - V_{\text{УНТ}})}{E_m}$$

$$E_{c,R} = \frac{1}{5} E_{c,L} + \frac{4}{5} E_{c,T}$$



Выбери один из вариантов ответа.  
У тебя есть две попытки.

Ответить



Ты ошибся! Попробуй еще раз.

Сравни жесткость УНТ-армированного полимера со случайной ориентацией УНТ и с параллельными УНТ. Каково (примерно) их соотношение?

1:100

1:5

1:2

Примерно одинаково



Открыть сохраненные формулы

$$\frac{1}{E_{c,T}} = \frac{V_{\text{УНТ}}}{E_{\text{УНТ},T}} + \frac{(1-V_{\text{УНТ}})}{E_m}$$

$$E_{c,R} = \frac{1}{5} E_{c,L} + \frac{4}{5} E_{c,T}$$



Выбери один из вариантов ответа.  
У тебя осталась одна попытка.

Ответить

**Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.**

|                    |
|--------------------|
| 1:100              |
| 1:5                |
| 1:2                |
| Примерно одинаково |



**Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом.**

1:100

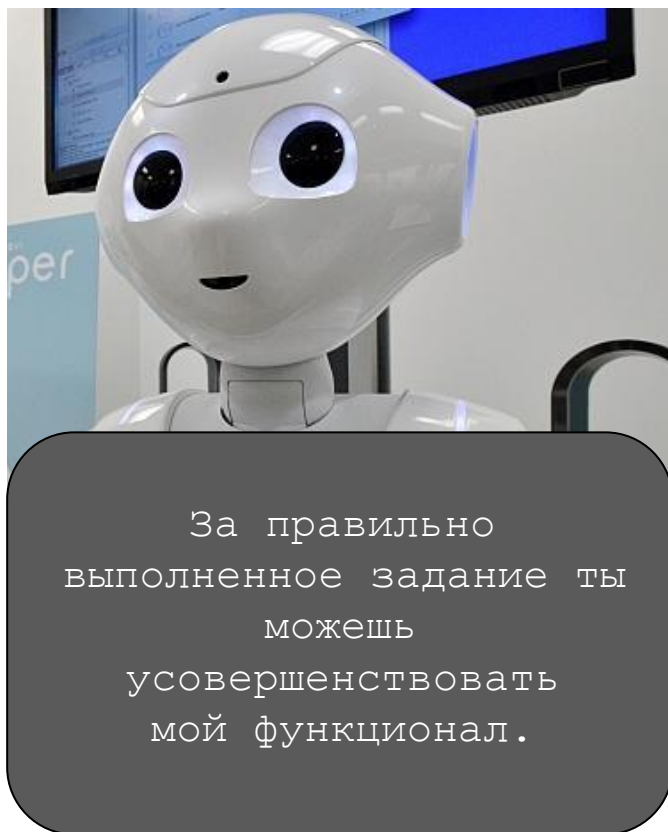
1:5

1:2

Примерно одинаково



# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ  |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                        | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                        | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           | <input type="checkbox"/> | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            | <input type="checkbox"/> | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных | <input type="checkbox"/> | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



Выбери третью дополнительную опцию.

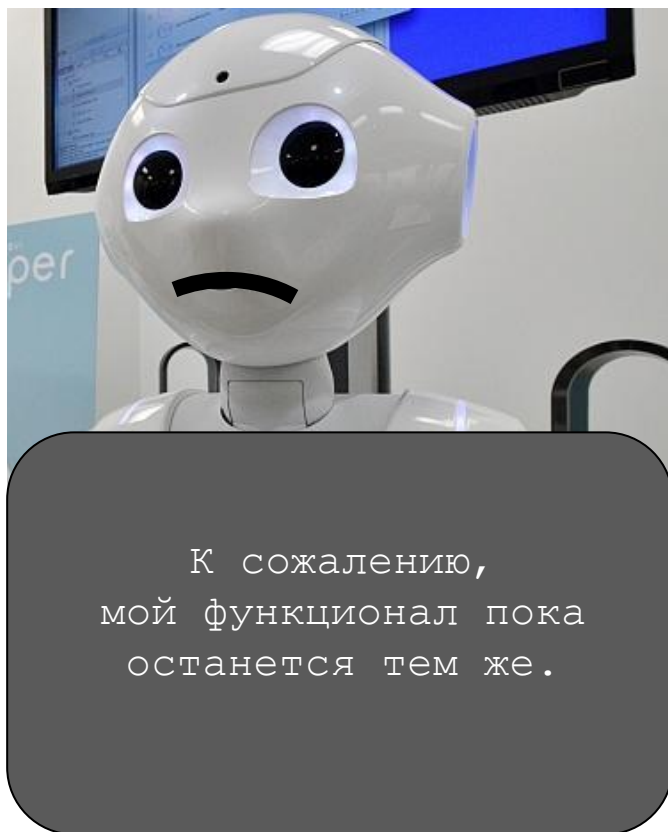
# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                       | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           | ✓                       | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Твои результаты (вариант 2)

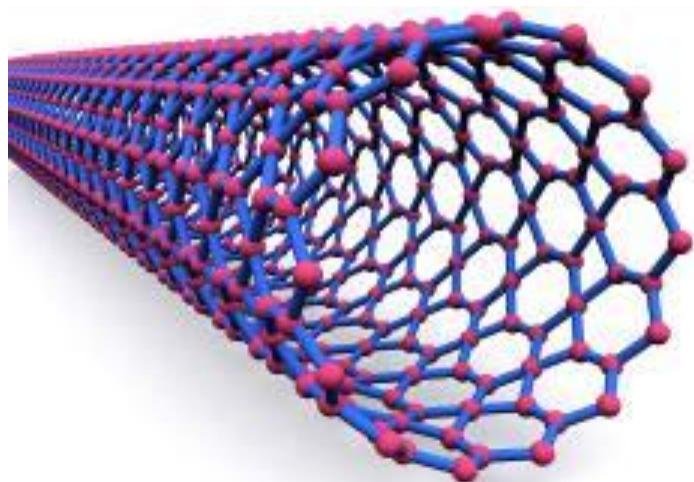


| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      |                         | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



## Раздел 3

# Методы нано-армирования ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ



# Возможные пути сочетания нано- и микро- (волокнистого) армирования



**Какие же методы нано-армирования волокнистых композитов используются?**

**Возможны следующие пути сочетания нано- и микро- (волокнистого) армирования:**

Диспергирование УНТ в связующем

Нано-модификация интерфейсов  
между слоями ламината или между  
волокном и связующим

Использование армирования из нано-  
волокон, состоящих из УНТ



*Для управления порядком появления схемы используй кнопку*





# Возможные пути сочетания нано- и микро- (волокнуистого) армирования



**Какие же методы нано-армирования волокнуистых композитов используются?**

**Возможны следующие пути сочетания нано- и микро- (волокнуистого) армирования:**

Диспергирование УНТ в связующем

Нано-модификация интерфейсов между слоями ламината или между волокнуом и связующим

Использование армирования из нано-волокнуов, состоящих из УНТ

Выращивание УНТ на армирующих волокнуах или тканях

Добавление УНТ в аппрет, наносимый на волокнуа с целью улучшения их адгезии к связующему

Создание прослойки из УНТ между слоями ламината



# Связующие с диспергированными УНТ



Образуй логическую цепочку преимуществ использования УНТ-армированных связующих, в которой каждый последующий процесс является следствием предыдущего.

Диспергирование УНТ в связующем



Повышение жесткости, прочности и трещиностойкости связующего



Прочность композитов с более прочным и трещиностойким связующим к расслоению



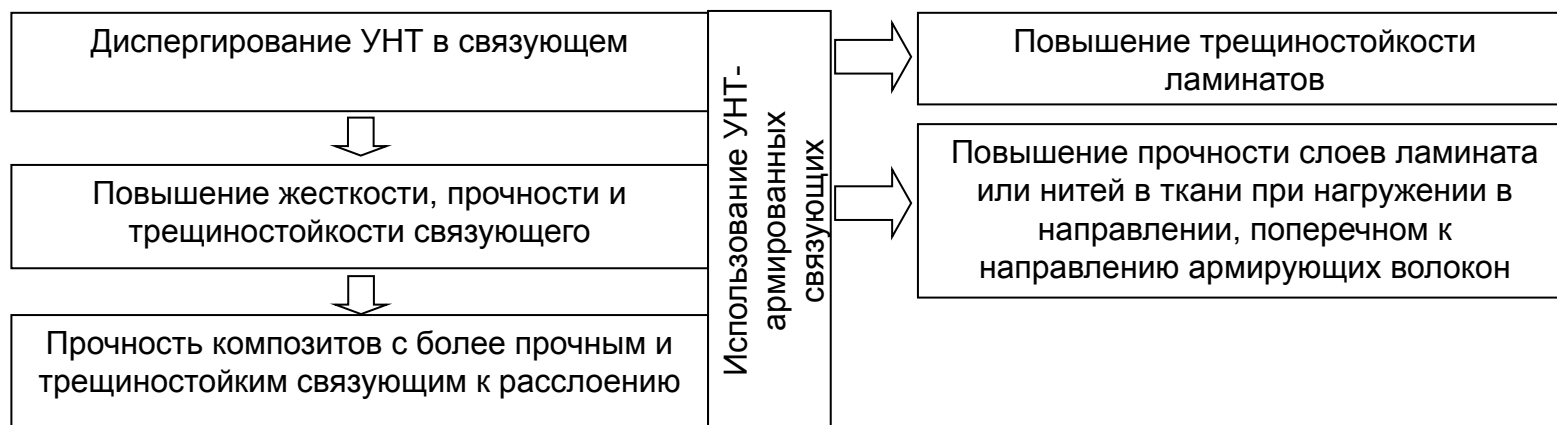
Для управления порядком появления схемы используй кнопку



# Связующие с диспергированными УНТ



Образуй логическую цепочку преимуществ использования УНТ-армированных связующих, в которой каждый последующий процесс является следствием предыдущего.



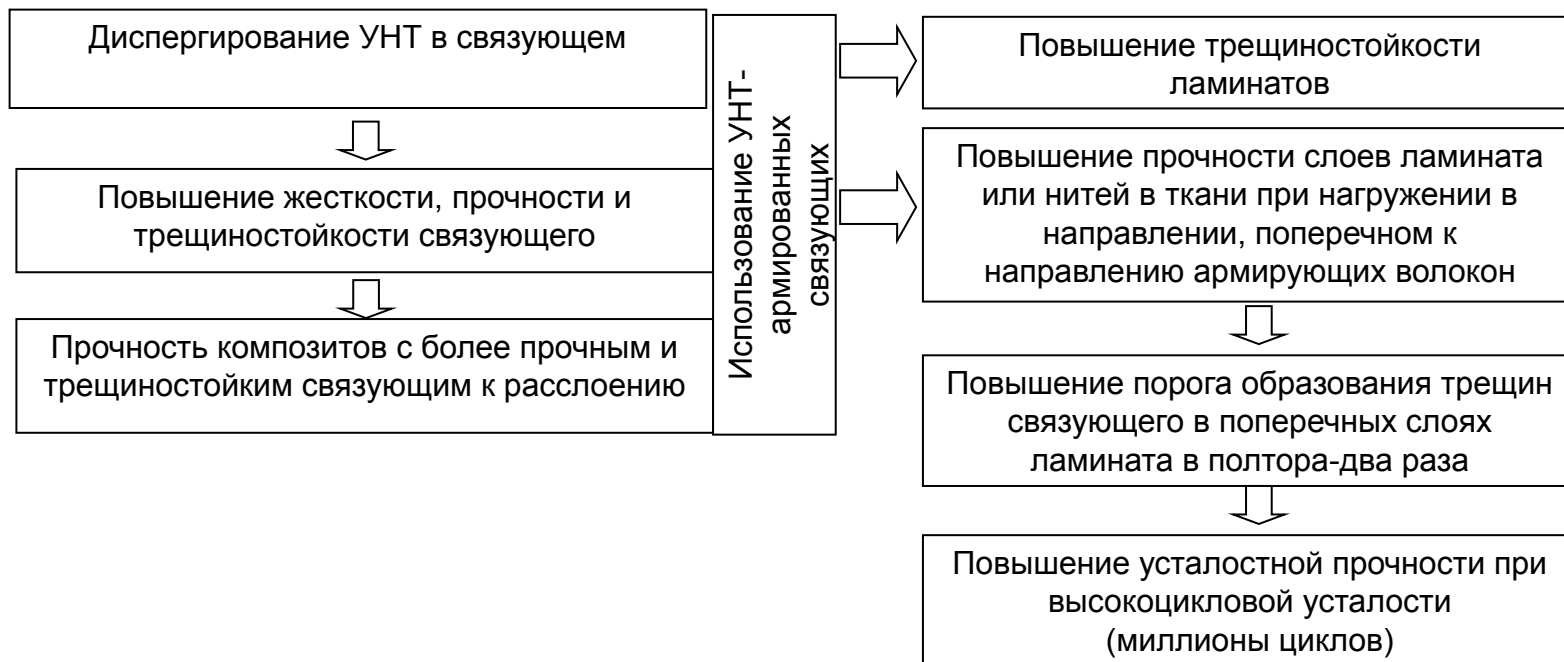
Для управления порядком появления схемы используй кнопку



# Связующие с диспергированными УНТ



Образуй логическую цепочку преимуществ использования УНТ-армированных связующих, в которой каждый последующий процесс является следствием предыдущего.



# Связующие с диспергированными УНТ



Образуй логическую цепочку трудностей при создании волокнистых композитов с УНТ-армированным связующим и их последствий.

Трудности при создании волокнистых композитов с УНТ-армированным связующим

Образование агломератов УНТ

Фильтрация УНТ на волокнах армирования



Для управления порядком появления схемы используй кнопку



# Связующие с диспергированными УНТ



Образуй логическую цепочку трудностей при создании волокнистых композитов с УНТ-армированным связующим и их последствий.

## Трудности при создании волокнистых композитов с УНТ-армированным связующим

### Образование агломератов УНТ

→ При длине УНТ в несколько микрон размер агломератов может составлять десятки микрон, что больше характерного расстояния между армирующими углеродными волокнами

→ Агломераты могут образовываться и между волокнами после пропитки

### Фильтрация УНТ на волокнах армирования



Для управления порядком появления схемы используй кнопку



# Связующие с диспергированными УНТ



Образуй логическую цепочку трудностей при создании волокнистых композитов с УНТ-армированным связующим и их последствий.

## Трудности при создании волокнистых композитов с УНТ-армированным связующим

### Образование агломератов УНТ

→ При длине УНТ в несколько микрон размер агломератов может составлять десятки микрон, что больше характерного расстояния между армирующими углеродными волокнами

→ Агломераты могут образовываться и между волокнами после пропитки

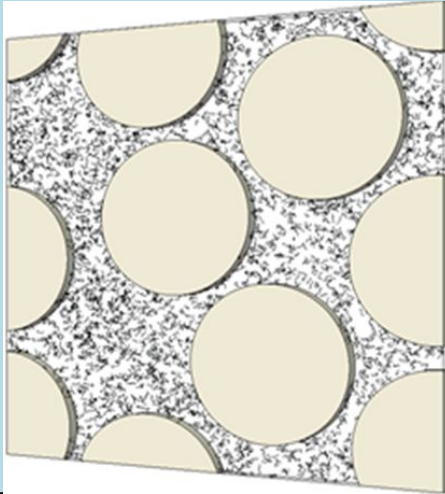
### Фильтрация УНТ на волокнах армирования

В результате качество диспергирования УНТ в связующем после его полимеризации и отверждения может быть значительно хуже, чем после разведения маточной смеси до нужной концентрации перед пропиткой

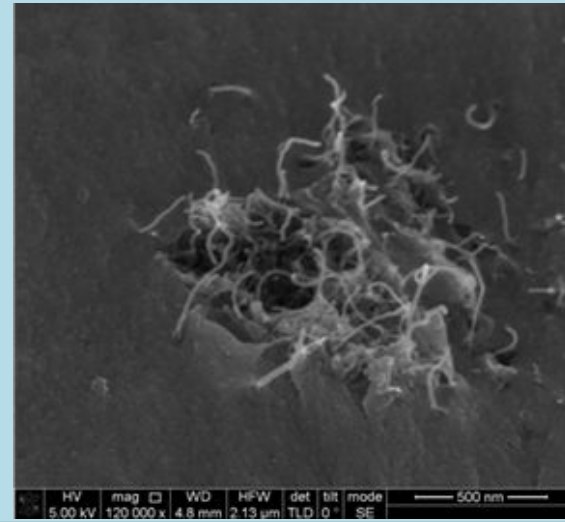
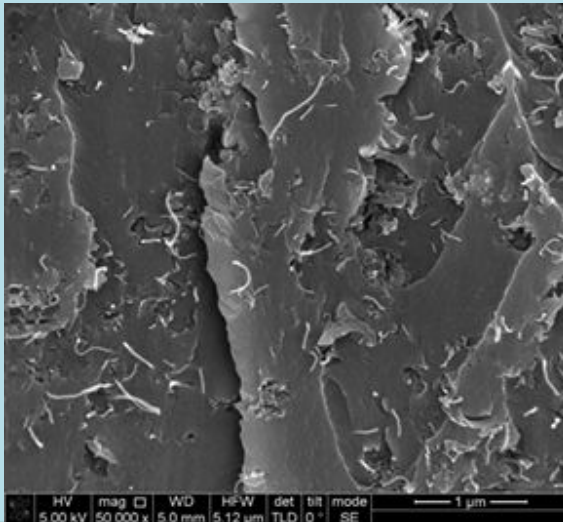
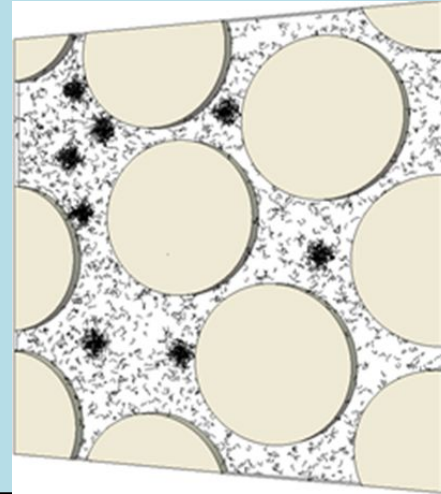


## Диспергирование УНТ в связующем (схемы и изображения под сканирующим электронным микроскопом)

Равномерное распределение УНТ



Агломерат УНТ





# Связующие с диспергированными УНТ



Отнюдь не все существенные для конструкционного материала механические свойства повышаются при использовании УНТ-армированного связующего.

**Прочность на сжатие после удара** является важнейшим показателем качества авиационных материалов, однако введение УНТ в связующее не улучшает этот показатель.

**Почему?**



*Для получения дополнительной информации нажми кнопку.*



Метод испытания AITM Airbus для определения прочности сжатия после удара

Это связано с тем, что при сжатии после удара трещинообразование происходит в основном по второму, сдвиговому типу, который не чувствителен к присутствию в связующем УНТ.



# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



**Вспомни, как называется метод, используемый для выращивания УНТ на поверхности армирующих волокон?**



*Выбери один из вариантов ответа.*

|                                             |
|---------------------------------------------|
| Метод химического осаждения из газовой фазы |
| Метод дугового разряда                      |
| Метод лазерной абляции                      |

**Ответить**

**Совершенно верно! Ты отлично запомнил пройденный материал!**

|                                             |
|---------------------------------------------|
| Метод химического осаждения из газовой фазы |
| Метод дугового разряда                      |
| Метод лазерной абляции                      |

Как мы знаем, для применения метода химического осаждения из газовой фазы нужно сначала нанести на субстрат (носитель), которым являются волокна, нано-частица металлического катализатора. Это можно сделать, погружая волокнистое армирование, например, жгуты волокон или ткань, в суспензию каталитических частиц, и потом высушив волокна.



**К сожалению, ты ошибся! Ознакомься с правильным ответом.**

Метод химического осаждения из газовой фазы

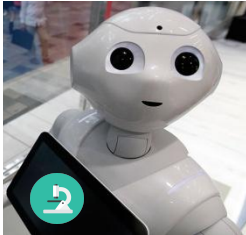
Метод дугового разряда

Метод лазерной абляции

Как мы знаем, для применения метода химического осаждения из газовой фазы нужно сначала нанести на субстрат (носитель), которым являются волокна, нано-частица металлического катализатора. Это можно сделать, погружая волокнистое армирование, например, жгуты волокон или ткань, в суспензию каталитических частиц, и потом высушив волокна.



# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



Как ты думаешь, могут ли волокна с выращенными УНТ называться «волосатыми» или «пушистыми», а УНТ, выращенные на волокне – «лесом»?



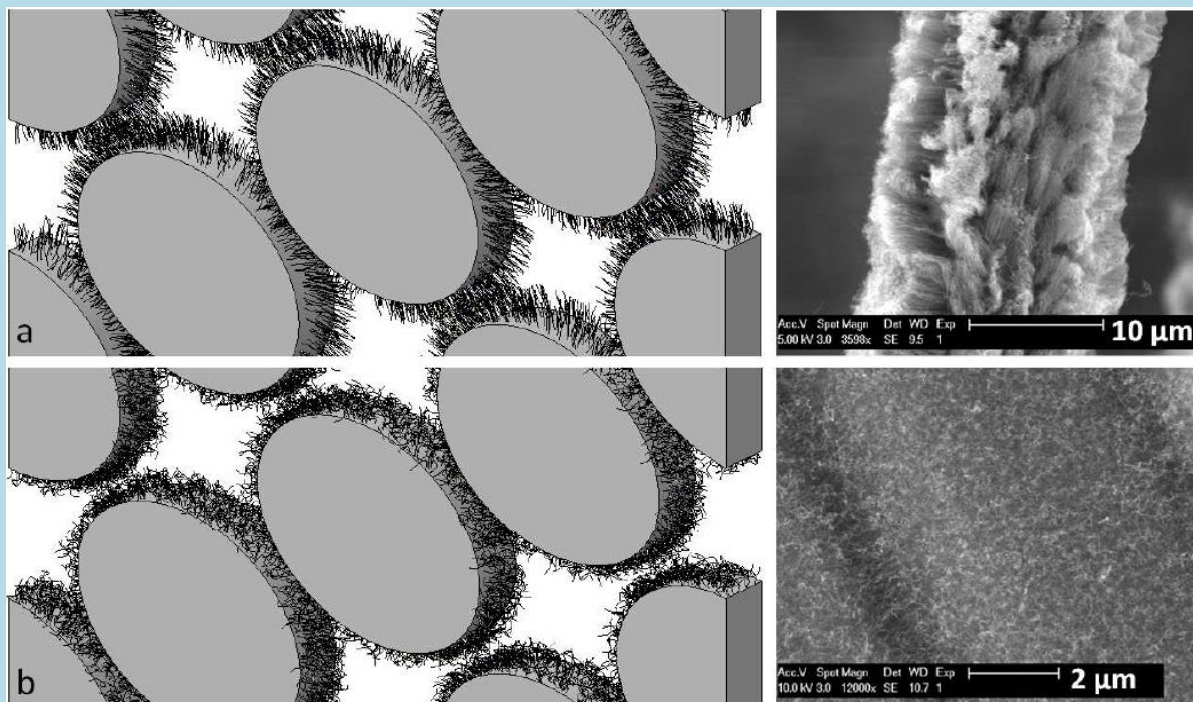
*Нажми кнопку на моем планшете, чтобы посмотреть схемы и изображения волокон под сканирующим электронным микроскопом.*

Да, судя по снимкам, это возможно

Мне кажется, это неправда



*Выбери один из вариантов ответа.*



hairy

fuzzy

**Да, действительно,** волокна с выращенными УНТ часто называются «волосатыми»  или «пушистыми» , а УНТ, выращенные на волокне – «лесом».

При этом можно достигнуть высокой концентрации УНТ вблизи волокна (как в рассмотренных ранее «коврах» из УНТ). Исключаются проблемы, связанные с агломерациями УНТ и их фильтрацией, характерные для диспергирования УНТ в связующем. Можно получить лес параллельных УНТ, радиально ориентированных по отношению к волокну-носителю, армируя связующее вблизи волокна по направлению, противостоящему радиальным напряжениям, отслаивающим связующее от волокна.





hairy

fuzzy

**Как ни удивительно**, но волокна с выращенными УНТ называются «волосатыми»  или «пушистыми» , а УНТ, выращенные на волокне – «лесом».

При этом можно достигнуть высокой концентрации УНТ вблизи волокна (как в рассмотренных ранее «коврах» из УНТ). Исключаются проблемы, связанные с агломерациями УНТ и их фильтрацией, характерные для диспергирования УНТ в связующем. Можно получить лес параллельных УНТ, радиально ориентированных по отношению к волокну-носителю, армируя связующее вблизи волокна по направлению, противостоящему радиальным напряжениям, отслаивающим связующее от волокна.



# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества |  | Недостатки |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                   |              |                                                                                    |            |
|                                                                                   |              |                                                                                    |            |

# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                                                                 |  | Недостатки |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, улучшают передачу напряжений от связующего на волокно |                                                                                    |            |
|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |            |

# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества |  | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   |              |                                                                                    | Возможная химическая реакция металлических каталитических частиц с углеродом волокон при высокой температуре в CVD-реакторе. Поверхность волокна «разъедается», и волокно теряет до 50% прочности  |
|                                                                                   |              |                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |



Разработаны низкотемпературные варианты метода химического осаждения, с температурой в реакторе около 500 °С, которые снижают интенсивность реакции металлов с углеродом и позволяют получать «пушистые» волокна без потери их прочности.

# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                                                                 |  | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, улучшают передачу напряжений от связующего на волокно |                                                                                    | Возможная химическая реакция металлических каталитических частиц с углеродом волокон при высокой температуре в CVD-реакторе. Поверхность волокна «разъедается», и волокно теряет до 50% прочности  |
|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |



Разработаны низкотемпературные варианты метода химического осаждения, с температурой в реакторе около 500 °С, которые снижают интенсивность реакции металлов с углеродом и позволяют получать «пушистые» волокна без потери их прочности.

# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



## Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками «пушистых» волокон.



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                                                                 |  | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, улучшают передачу напряжений от связующего на волокно |                                                                                    | Возможная химическая реакция металлических каталитических частиц с углеродом волокон при высокой температуре в CVD-реакторе. Поверхность волокна «разъедается», и волокно теряет до 50% прочности  |
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, снижают концентрацию напряжений на жестком волокне    |                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |



# Нано-модификация поверхности волокон. Выращивание УНТ на поверхности волокон



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                                                                 |  | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, улучшают передачу напряжений от связующего на волокно |                                                                                    | Возможная химическая реакция металлических каталитических частиц с углеродом волокон при высокой температуре в CVD-реакторе. Поверхность волокна «разъедается», и волокно теряет до 50% прочности                              |
|                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                    | Высокое сопротивление ткани и ламинатов из «пушистых» волокон сжатию.  Сжатие волокнистого армирования необходимо для достижения высокой объемной доли волокон в композите, обеспечивающей его высокие механические свойства |



Несмотря на высокую гибкость отдельных УНТ, их «лес», вследствие большого количества контактов между УНТ, сильно сопротивляется сжатию.

# Нано-модификация поверхности волокон.

## Выращивание УНТ на поверхности волокон

В результате можно получить повышение прочности отслоения на 150...200 %, что дает существенное, на десятки процентов, повышение трещиностойкости композита

В результате вакуумная инфузия, распространенный и дешевый метод пропитки и отверждения композитов, может быть неэффективной для «пушистого» армирования из-за малости давления сжатия, приложенного к армированию

|  | Преимущества                                                                                                                 |  | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, улучшают передачу напряжений от связующего на волокно |                                                                                    | Возможная химическая реакция металлических каталитических частиц с углеродом волокон при высокой температуре в CVD-реакторе. Поверхность волокна «разъедается», и волокно теряет до 50% прочности                              |
|                                                                                   | Благодаря локальному повышению жесткости УНТ-армированного связующего, снижают концентрацию напряжений на жестком волокне    |                                                                                    | Высокое сопротивление ткани и ламинатов из «пушистых» волокон сжатию.  Сжатие волокнистого армирования необходимо для достижения высокой объемной доли волокон в композите, обеспечивающей его высокие механические свойства |





Несмотря на высокую гибкость отдельных УНТ, их «лес», вследствие большого количества контактов между УНТ, сильно сопротивляется сжатию.

# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



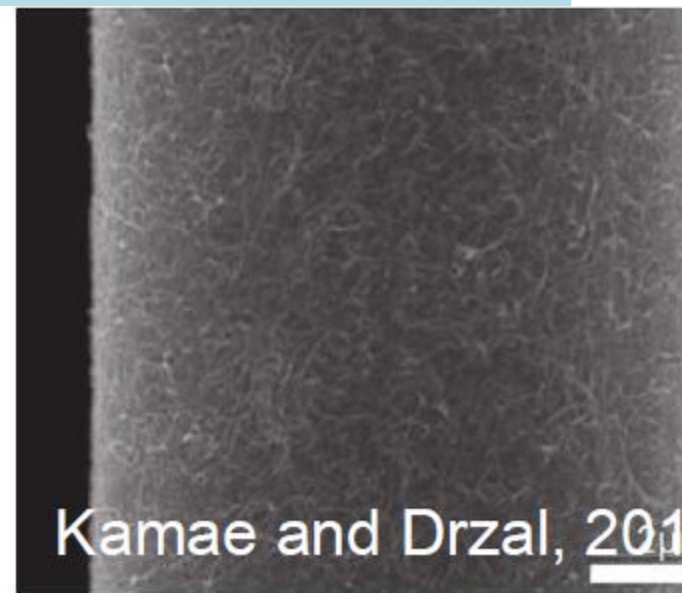
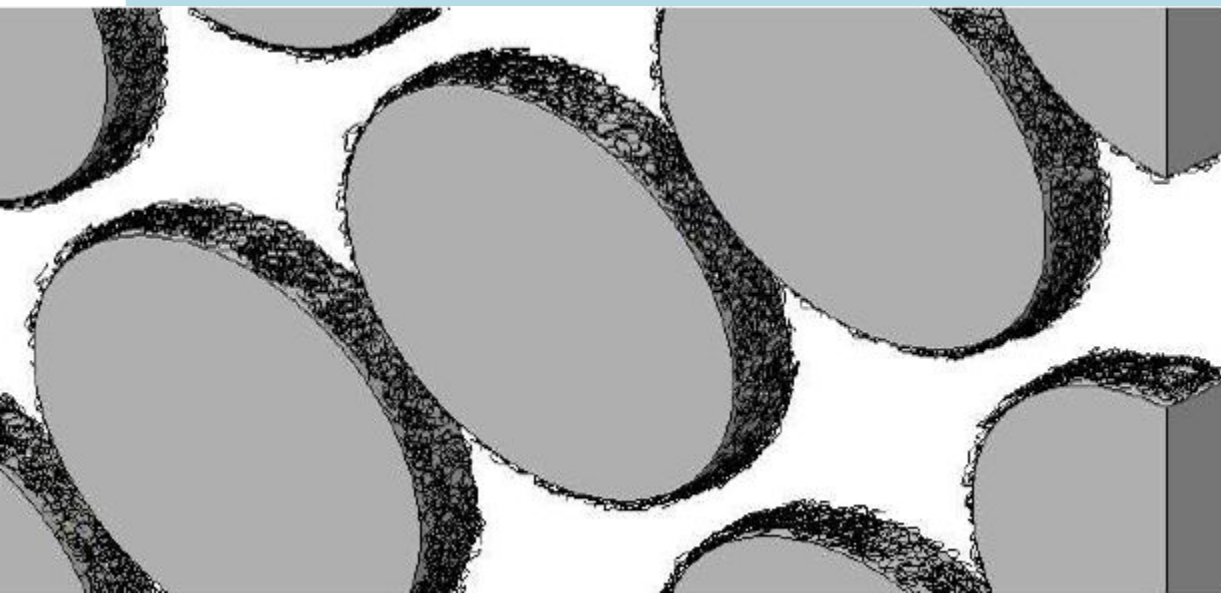
sizing

Практически любые армирующие волокна обработаны аппретом  – на них нанесен тонкий, толщиной несколько десятков нанометров, слой полимера, который обеспечивает химическую адгезию связующего к волокну. Аппрет является возможным средством «доставки» УНТ к поверхности волокна – достаточно диспергировать УНТ в аппрете, чтобы получить их слой на интерфейсе волокно – связующее.



*Нажми кнопку на моем планшете, чтобы посмотреть схему и изображение волокон под сканирующим электронным микроскопом.*





Kamae and Drzal, 201

# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



**Ознакомься с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества |  | Недостатки |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                   |              |                                                                                    |            |
|                                                                                   |              |                                                                                    |            |
|                                                                                   |              |                                                                                    |            |

# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



**Ознакомься с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                 |  | Недостатки |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                                                                   | Нет ни опасности снижения прочности волокна, ни трудности сжатия армирования |                                                                                    |            |
|                                                                                   |                                                                              |                                                                                    |            |
|                                                                                   |                                                                              |                                                                                    |            |



# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества |  | Недостатки                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   |              |                                                                                    | УНТ в аппрете расположены приблизительно параллельно поверхности волокна. Такая геометрия нано-армирования менее эффективна для противодействия нормальным отслаивающим напряжениям |
|                                                                                   |              |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                   |              |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |

# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                 |  | Недостатки                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Нет ни опасности снижения прочности волокна, ни трудности сжатия армирования |                                                                                    | УНТ в аппрете расположены приблизительно параллельно поверхности волокна. Такая геометрия нано-армирования менее эффективна для противодействия нормальным отслаивающим напряжениям |
|                                                                                   |                                                                              |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                   |                                                                              |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |

# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



**Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками  
«пушистых» волокон.**



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                  |  | Недостатки                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Нет ни опасности снижения прочности волокна, ни трудности сжатия армирования  |                                                                                    | УНТ в аппрете расположены приблизительно параллельно поверхности волокна. Такая геометрия нано-армирования менее эффективна для противодействия нормальным отслаивающим напряжениям |
|                                                                                   | Возможность «залечить» поверхностные дефекты волокон, увеличивая их прочность |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                   |                                                                               |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |

# Нано-модификация поверхности волокон. УНТ в аппрете



## Ознакомьтесь с преимуществами и недостатками «пушистых» волокон.



*Поочередно нажимай на кнопки, чтобы  
ознакомиться с преимуществами и недостатками.*

|  | Преимущества                                                                                                                                                   |  | Недостатки                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                   | Нет ни опасности снижения прочности волокна, ни трудности сжатия армирования                                                                                   |                                                                                    | УНТ в аппрете расположены приблизительно параллельно поверхности волокна. Такая геометрия нано-армирования менее эффективна для противодействия нормальным отслаивающим напряжениям |
|                                                                                   | Возможность «залечить» поверхностные дефекты волокон, увеличивая их прочность                                                                                  |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                   | УНТ в аппрете расположены приблизительно параллельно поверхности волокна. Такая геометрия нано-армирования лучше противостоит сдвиговому разрушению интерфейса |                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |



# Прослойки из УНТ между слоями ламината



Расслоение ламината приводит к катастрофической потере несущей способности детали, поэтому межслойная прочность ламинатов является критическим параметром при проектировании деталей из композиционных материалов.

Хочешь узнать, как можно решить данную проблему?

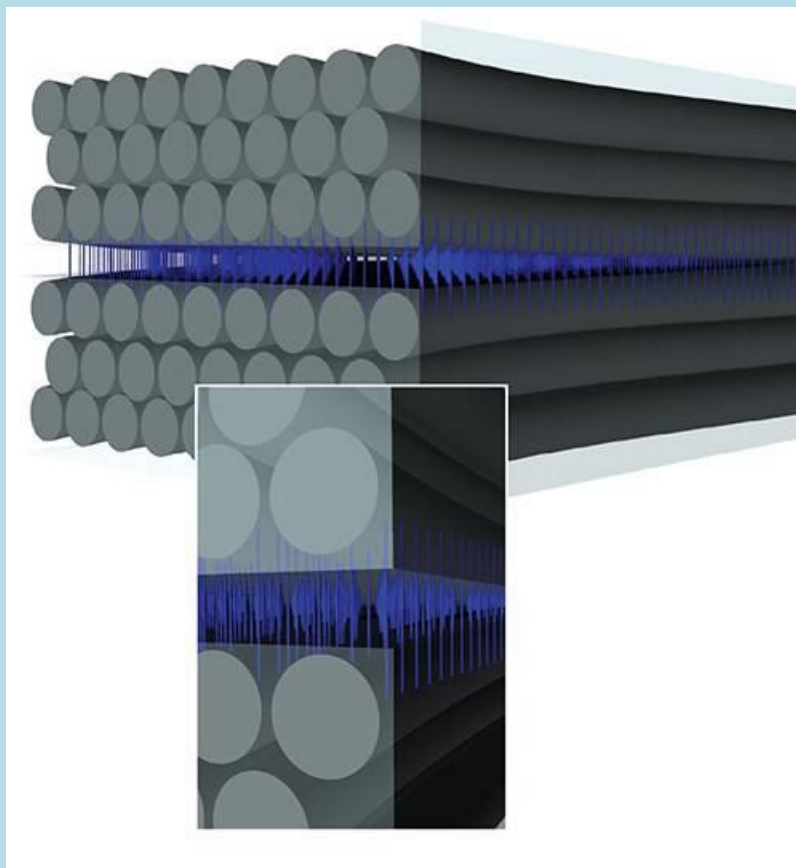
Хочу





Располагая прослойку УНТ между слоями  , можно радикально повысить сопротивление расслоению, в первую очередь сопротивление выдергиванию. Однако в случае прослойки толщиной в несколько микрон снимается ограничение на объемную долю УНТ, связанное с образованием агломератов УНТ в жидком связующем.

Можно, например, создать «вуаль» из УНТ – слой случайно ориентированных в плоскости УНТ, подобный волокнистой мембране, который будет помещен между слоями ламината и пропитан вместе с ними, или вырастить «лес» УНТ на слое ламината. Создавая прослойки из УНТ, можно добиться увеличения межслойной трещиностойкости в разы, а также существенно, на десятки процентов увеличить прочность на сжатие после удара.



Прослойка из УНТ между слоями ламината

# Нано-волокна и нано-текстиль



В последние годы рос интерес к формированию волокон из УНТ. УНТ, подобно волокнам в обычной пряденой текстильной нити, скручиваются, образуя волокно с диаметром в несколько микрон. После пропитки полимерами из такого УНТ-волокна можно получить нанокомпозит с высокими свойствами.



*Нажми кнопку на моем планшете, чтобы посмотреть вид волокон под микроскопом.*

## Способы производства УНТ-волокон

Прядение из суспензии УНТ или из УНТ-«ковра»

Скручивание однонаправленных слоев УНТ

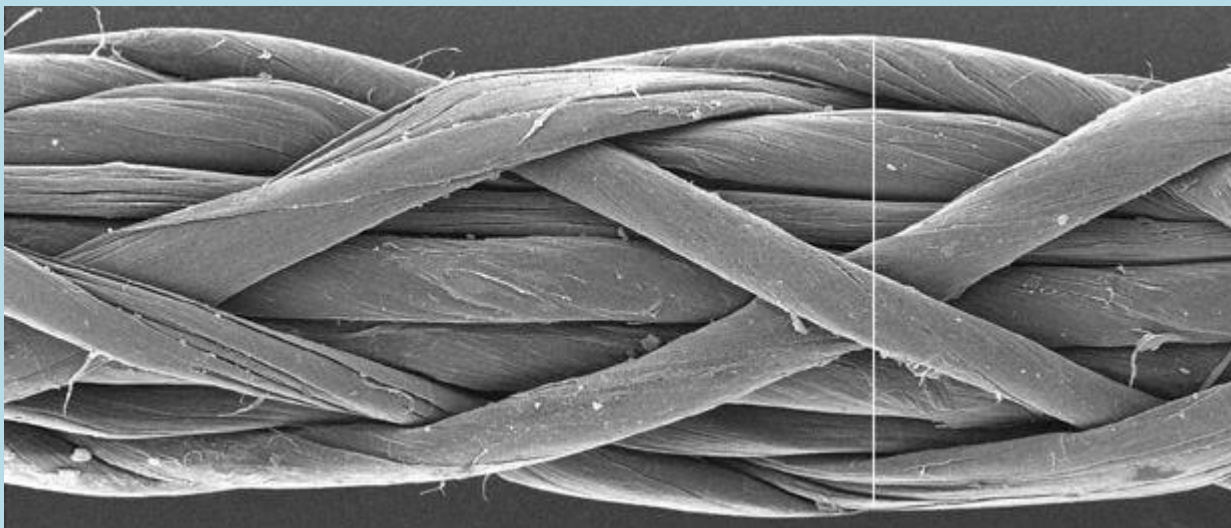
УНТ-волокна могут быть скручены или спрядены в нано-нити, пригодные для текстильной переработки с помощью вязания, плетения или ткачества.







УНТ-волокна обладают высокой предельной деформацией, что позволяет надеяться, что с их помощью можно получать композиты с пониженной хрупкостью, следовательно, с повышенной трещиностойкостью.



# Контрольный вопрос



**А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь ответить на вопросы.**

**При каких методах nano-армирования волокнистых композитов УНТ размещаются на поверхности волокон?**

|                                        |
|----------------------------------------|
| Диспергирование УНТ в связующем        |
| Выращивание УНТ на волокнах            |
| Насыщение аппрета УНТ                  |
| Прослойки из УНТ между слоями ламината |
| Применение волокон, спряденных из УНТ  |



*Выбери все верные варианты.  
У тебя есть две попытки.*

**Ответить**

**Ты ошибся! Попробуй еще раз.**

**При каких методах nano-армирования волокнистых композитов УНТ размещаются на поверхности волокон?**

Диспергирование УНТ в связующем

Выращивание УНТ на волокнах

Насыщение аппрета УНТ

Прослойки из УНТ между слоями ламината

Применение волокон, спряденных из УНТ



*Выбери все верные варианты.  
У тебя осталась одна попытка.*

**Ответить**

**Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.**

|                                        |
|----------------------------------------|
| Диспергирование УНТ в связующем        |
| Выращивание УНТ на волокнах            |
| Насыщение аппрета УНТ                  |
| Прослойки из УНТ между слоями ламината |
| Применение волокон, спряденных из УНТ  |



**Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом.**

|                                        |
|----------------------------------------|
| Диспергирование УНТ в связующем        |
| Выращивание УНТ на волокнах            |
| Насыщение аппрета УНТ                  |
| Прослойки из УНТ между слоями ламината |
| Применение волокон, спряденных из УНТ  |



# Контрольный вопрос



**А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь ответить на вопросы.**

**Какой метод введения УНТ в слоистые пластики наиболее эффективен для противодействия расслоению пластика?**

Диспергирование УНТ в связующем

Выращивание УНТ на волокнах

Насыщение аппрета УНТ

Прослойки из УНТ между слоями ламината

Применение волокон, спряденных из УНТ



*Выбери верный вариант.  
У тебя есть две попытки.*

**Ответить**

**Ты ошибся! Попробуй еще раз.**

**Какой метод введения УНТ в слоистые пластики наиболее эффективен для противодействия расслоению пластика?**

Диспергирование УНТ в связующем

Выращивание УНТ на волокнах

Насыщение аппрета УНТ

Прослойки из УНТ между слоями ламината

Применение волокон, спряденных из УНТ



*Выбери верный вариант.  
У тебя осталась одна попытка.*

**Ответить**

**Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.**

|                                               |
|-----------------------------------------------|
| Диспергирование УНТ в связующем               |
| Выращивание УНТ на волокнах                   |
| Насыщение аппрета УНТ                         |
| <b>Прослойки из УНТ между слоями ламината</b> |
| Применение волокон, спряденных из УНТ         |



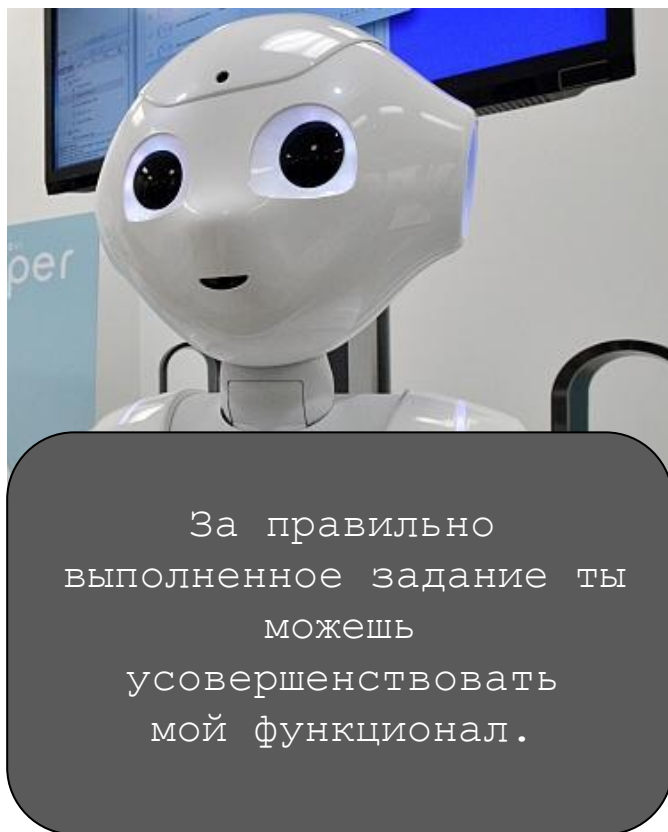


**Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом.**

|                                               |
|-----------------------------------------------|
| Диспергирование УНТ в связующем               |
| Выращивание УНТ на волокнах                   |
| Насыщение аппрета УНТ                         |
| <b>Прослойки из УНТ между слоями ламината</b> |
| Применение волокон, спряденных из УНТ         |



# Твои результаты (вариант 1)

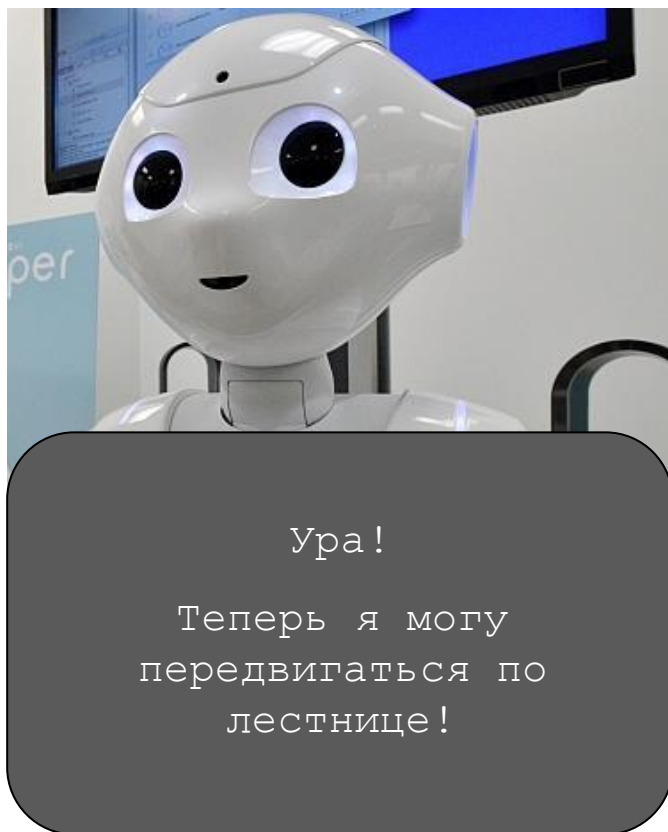


| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                       | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



Выбери четвертую дополнительную опцию.

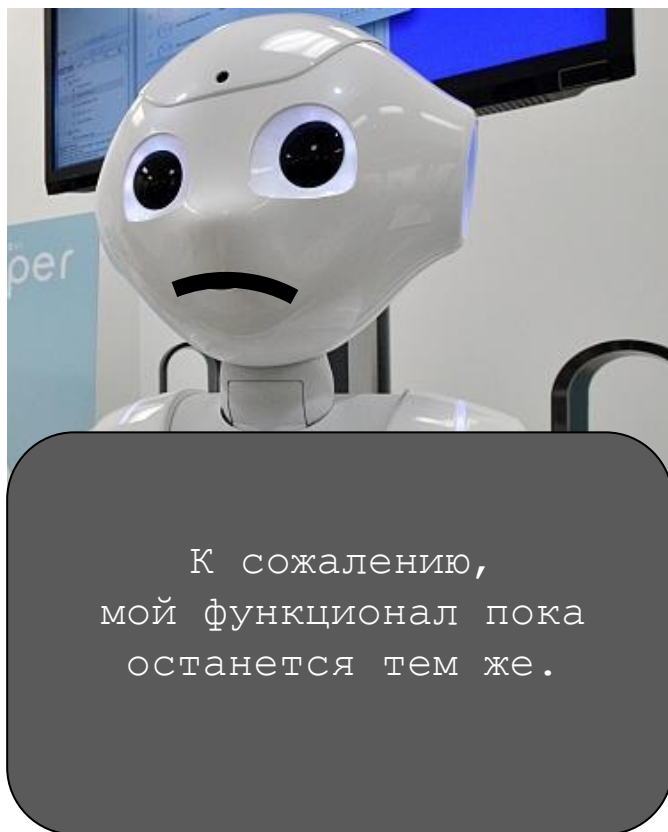
# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                       | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           | ✓                       | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            | ✓                       | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Твои результаты (вариант 2)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      |                         | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



## Раздел 4

# Приложения nano-армированных полимеров и волокнистых композитов



# Применение УНТ-армированных связующих



На рынке полимерных связующих имеется большое количество готовых сверхконцентратов (маточных смесей) УНТ с различными термореактивными и термопластичными связующими: *EPOCYL, PLASTISYL* (*Nanocyl, Бельгия*), *FIBRIL* (*Hyperion Catalysis, США*), *TUBALL\_COMP\_E* (*OCSiAl, Люксембург – США – Россия*).

УНТ-армированные связующие применяются в изделиях из композитов, армированных углеволокном, для которых необходимы повышенная трещиностойкость и энергоемкость.

Бамперы автомобилей



Корпуса судов и мачты яхт



Лопасты ветрогенераторов и вентиляторов



Спортивный инвентарь













# Применение УНТ-армированных связующих



Важная область применения УНТ-армированных полимеров – **защита от электромагнитного излучения**. Полимер с диспергированными нанотрубками становится проводящим, и может эффективно экранировать электромагнитные волны, одновременно обеспечивая повышенную прочность и ударостойкость корпусу изделия.

Кроме обычных способов производства композитов, такие корпуса могут быть получены с помощью трехмерной печати, используя термопластические полимеры (например, поликарбонат) с диспергированными УНТ.

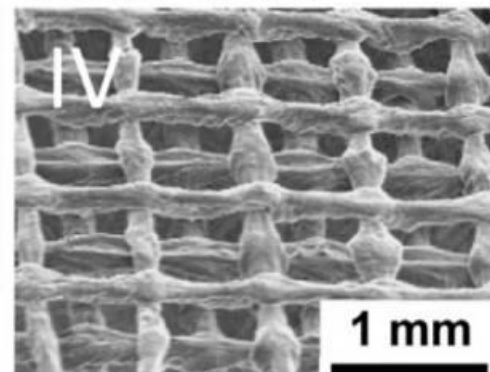
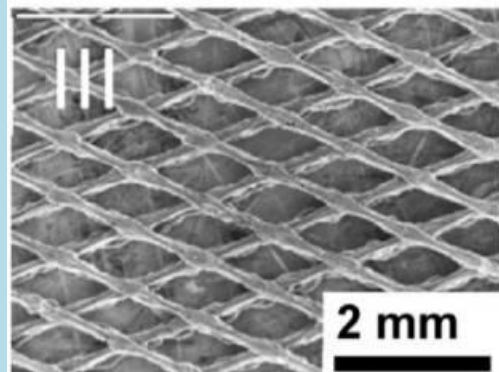
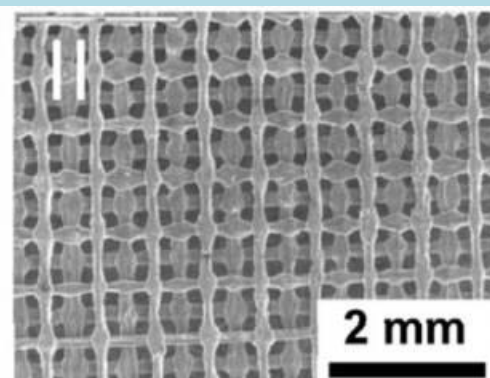
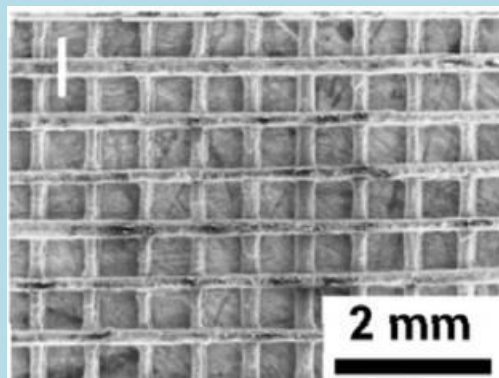
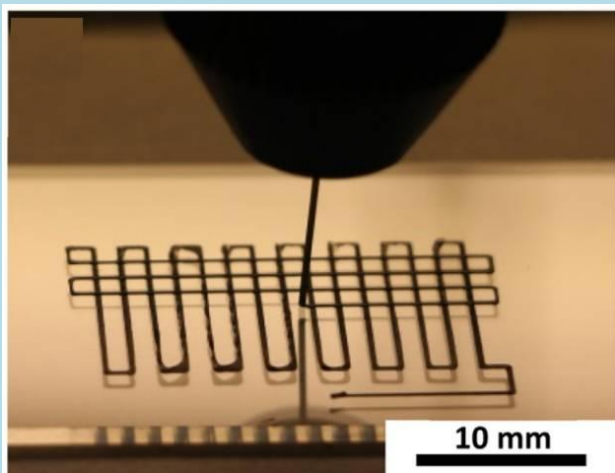


*Нажми кнопку на моем планшете, чтобы увидеть фото процесса трехмерной печати панели электромагнитной защиты и примеры панелей.*





## Трехмерная печать панели электромагнитной защиты и примеры панелей



# Применение «пушистых» волокон и УНТ-прослоек



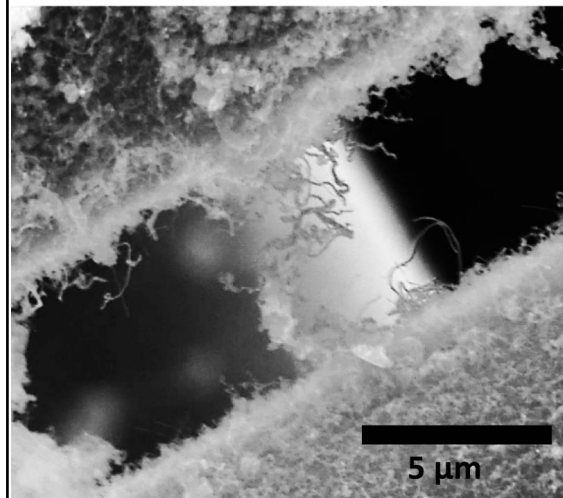
«Пушистые волокна» могут производиться в настоящее время только в ограниченных количествах, поэтому их применение ограничено приложениями, в которых эксплуатационные показатели изделия важнее его стоимости.



Керамические волокна с выращенным «лесом» УНТ используются в качестве промежуточной стадии для композиционных высокотемпературных керамических деталей для ракетных двигателей (Университет Райс – НАСА).



«Пушистые» волокна из карбида кремния, полученные методом химического осаждения из газовой фазы, погружаются в нанопорошок кремния и нагреваются до высокой температуры. УНТ «сгорают», превращаясь в «лес» трубок из карбида кремния. В результате волокнистый материал приобретает свойства «липучки», Велкро, и используется для армирования высокотемпературных керамических композитов. По своей природе хрупкие, керамические композиты, армированные такими волокнами (например, в виде ткани), благодаря механическому зацеплению и податливости «Велкро»-соединения, приобретают трещиностойкость и долговечность.



Прослойки из УНТ – либо «лес» параллельных УНТ, либо вуали – могут производиться в количествах, которые позволяют вести лабораторные разработки углепластиков с межслойным нано-армированием авиационным компаниям (Боинг, Сааб, Аэробус, Локхид и др.).



Даже при высокой стоимости собственно прослойки ее доля в массе ламината составляет доли процента и практически не удорожает его







УНТ, выращенные на стеклянных волокнах, превращают их в датчики деформации и разрушения композита, поскольку такие волокна приобретают, благодаря наличию нано-«леса», электрическую проводимость. При деформации волокна структура контактов между УНТ в «лесе» меняется, и сопротивление датчика изменяется. Такие волокна внутри композиционной детали, используются для постоянного мониторинга состояния материала и обнаружения микро-трещин.



# Контрольный вопрос



**А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь ответить на вопросы.**

**Почему связующее с диспергированными УНТ нашло применение именно в бампере автомобиля?**

Композит с УНТ в связующем обладает высокой жесткостью

При разрушении бампера композит с УНТ будет поглощать больше энергии столкновения

Композит с УНТ становится токопроводящим и можно превратить бампер в датчик касания (например, при парковке)



*Выбери верный вариант ответа.  
У тебя есть две попытки.*

**Ответить**

**Ты ошибся! Попробуй еще раз.**

**Почему связующее с диспергированными УНТ нашло применение именно в бампере автомобиля?**

Композит с УНТ в связующем обладает высокой жесткостью

При разрушении бампера композит с УНТ будет поглощать больше энергии столкновения

Композит с УНТ становится токопроводящим и можно превратить бампер в датчик касания (например, при парковке)



*Выбери верный вариант ответа.  
У тебя осталась одна попытка.*

**Ответить**

**Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.**

Композит с УНТ в связующем обладает высокой жесткостью

При разрушении бампера композит с УНТ будет поглощать больше энергии столкновения

Композит с УНТ становится токопроводящим и можно превратить бампер в датчик касания (например, при парковке)



**Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом.**

Композит с УНТ в связующем обладает высокой жесткостью

При разрушении бампера композит с УНТ будет поглощать больше энергии столкновения

Композит с УНТ становится токопроводящим и можно превратить бампер в датчик касания (например, при парковке)



# Контрольный вопрос



**А теперь проверим, насколько внимателен ты был при изучении материалов, и сможешь ответить на вопросы.**

**Зачем углепластики с межслойным нано-армированием применяются в несущих деталях корпуса самолета?**

Для молниезащиты, поскольку углепластик с УНТ становится токопроводящим

Для снижения деформаций детали при заданных нагрузках, поскольку УНТ обладают экстремально большой жесткостью

Для повышения сопротивляемости углепластика расслоению



*Выбери верный вариант.  
У тебя есть две попытки.*

**Ответить**

**Ты ошибся! Попробуй еще раз.**

**Зачем углепластики с межслойным нано-армированием применяются в несущих деталях корпуса самолета?**

Для молниезащиты, поскольку углепластик с УНТ становится токопроводящим

Для снижения деформаций детали при заданных нагрузках, поскольку УНТ обладают экстремально большой жесткостью

Для повышения сопротивляемости углепластика расслоению



*Выбери верный вариант.  
У тебя осталась одна попытка.*

**Ответить**

**Поздравляю! Ты отлично справился с заданием.  
Ознакомься с пояснениями.**

Для молниезащиты, поскольку углепластик с УНТ становится токопроводящим

Для снижения деформаций детали при заданных нагрузках, поскольку УНТ обладают экстремально большой жесткостью

Для повышения сопротивляемости углепластика расслоению





Проводимость такого углепластика недостаточна для защиты от удара молнии.





Увеличение жесткости углепластика при введении небольшой доли УНТ невелико.

**Ты вновь ответил неверно.  
Ознакомься с правильным ответом.**

Для молниезащиты, поскольку углепластик с УНТ становится токопроводящим

Для снижения деформаций детали при заданных нагрузках, поскольку УНТ обладают экстремально большой жесткостью

Для повышения сопротивляемости углепластика расслоению



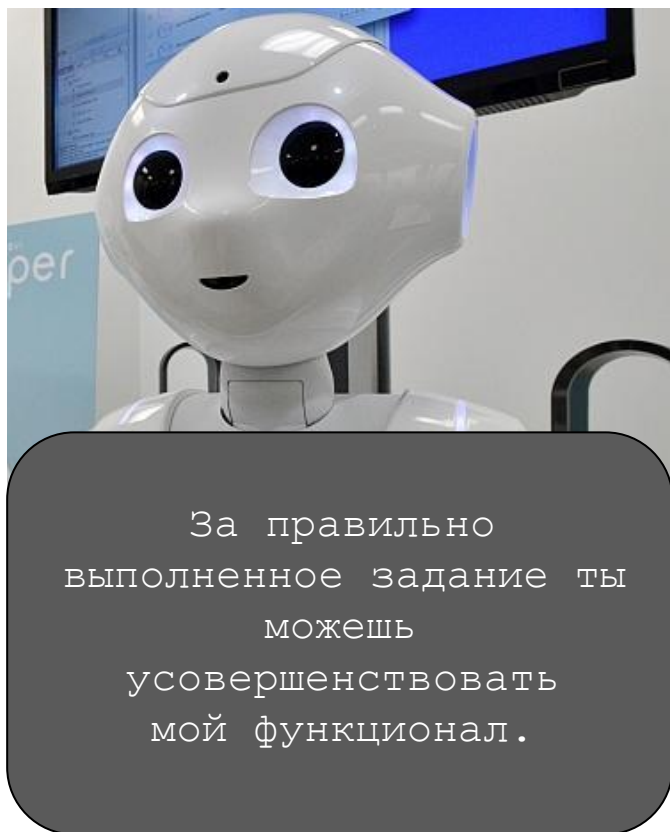


Проводимость такого углепластика недостаточна для защиты от удара молнии.



Увеличение жесткости углепластика при введении небольшой доли УНТ невелико.

# Твои результаты (вариант 1)

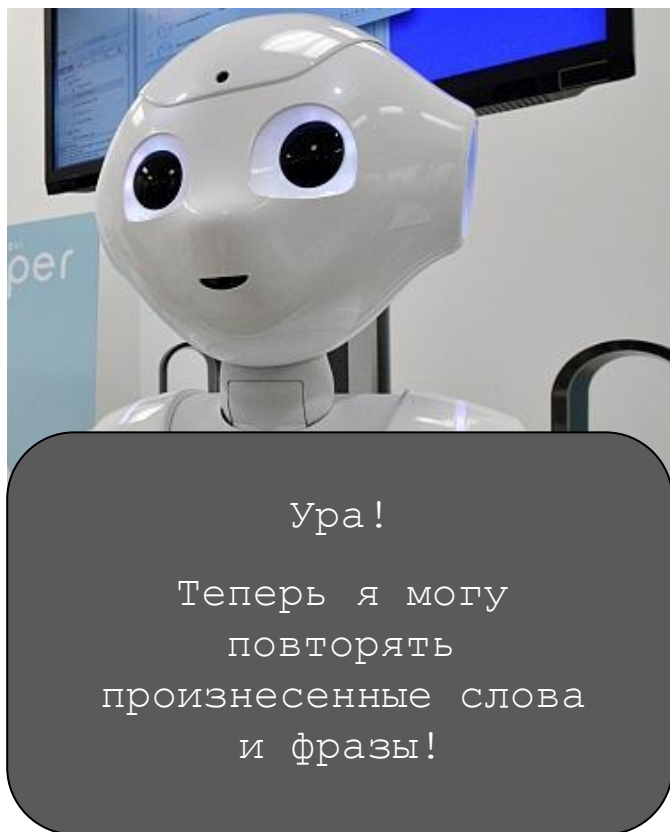


| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                       | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           | ✓                       | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            | ✓                       | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



Выбери пятую дополнительную опцию.

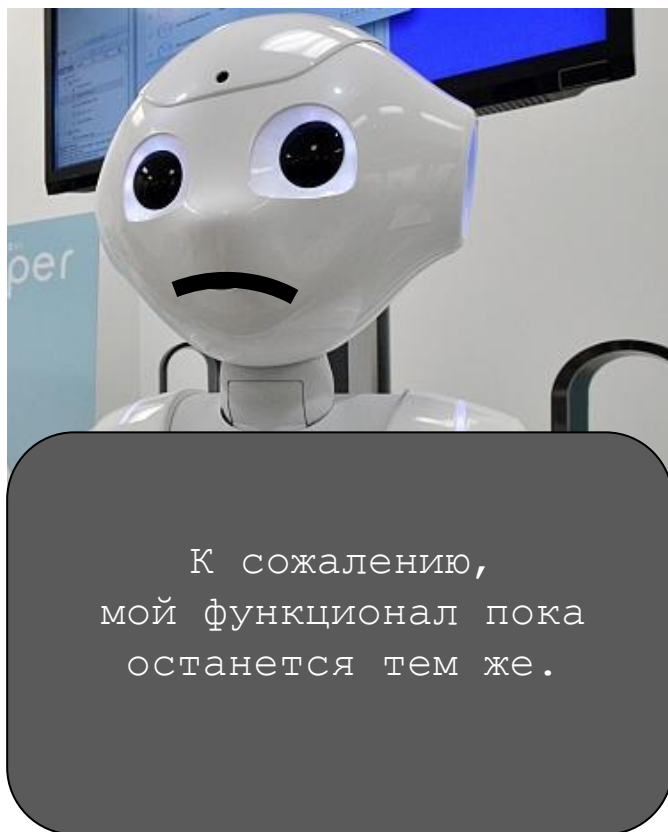
# Твои результаты (вариант 1)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      | ✓                       | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    | ✓                       | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           | ✓                       | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            | ✓                       | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных | ✓                       | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



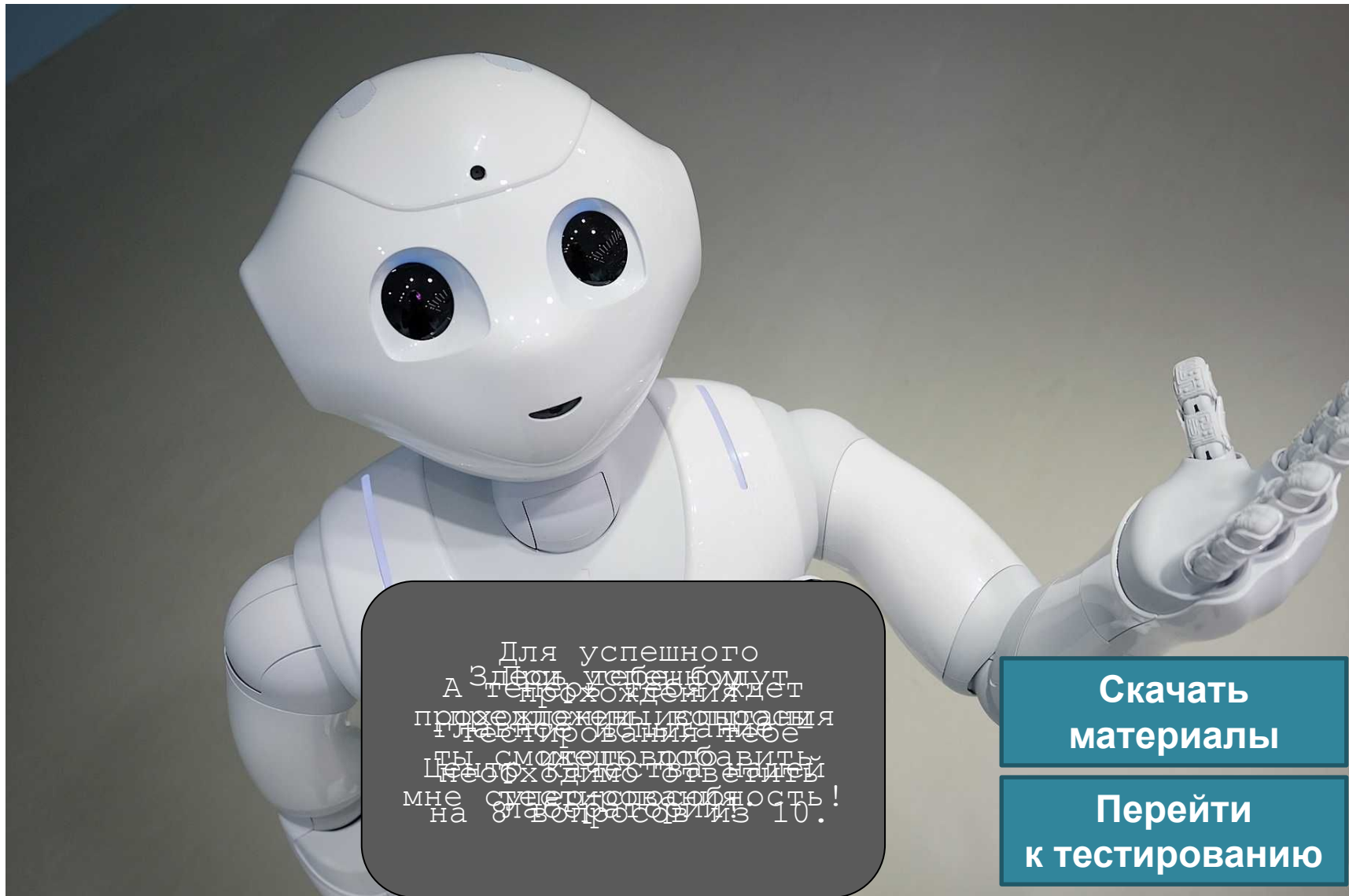
# Твои результаты (вариант 2)



| ОСНОВНОЙ<br>ФУНКЦИОНАЛ |                                                  | ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ<br>ОПЦИИ |                                                   |
|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| ✓                      | Передвигается по помещениям                      |                         | Способность узнавать лица                         |
| ✓                      | Выдает информацию по запросу из сети Интернет    |                         | Способность распознавать жесты                    |
| ✓                      | Воспроизводит звук с внешних устройств           |                         | Способность различать звуки                       |
| ✓                      | Записывает видео на встроенную камеру            |                         | Способность передвигаться по лестнице             |
| ✓                      | Хранит в памяти на жестком диске до 10 ТБ данных |                         | Способность повторять произнесенные слова и фразы |



# Итоговое тестирование



Для успешного  
Здесь тебе помогут  
А теперь пожелайдет  
прохождение и варианты  
тестирования тебе  
ты сможешь проверить  
необходимо ответить  
мне сможешь ответить  
на вопросы из 10.

**Скачать  
материалы**

**Перейти  
к тестированию**



# Вопрос 1.

## Пределы трещиностойкости композита



Композиционный материал – эпоксидная смола, армированная углеродными волокнами в двух перпендикулярных направлениях (например, тканью из углеродных волокон), испытывает растяжение по одному из направлений, в которых расположены волокна. Предельная деформация углеродных волокон – 1,5 %.

**Какие из следующих утверждений верны, а какие – нет?**

|                                                                                                                    |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Предельная деформация такого композита приблизительно совпадает с предельной деформацией волокон                   | Верно/Неверно |
| Трещины в связующем такого композита образуются только при уровне нагрузки, близком к предельной деформации        | Верно/Неверно |
| Трещины в связующем такого композита образуются при уровне нагрузки, в несколько раз меньшем предельной деформации | Верно/Неверно |
| При расчете детали из такого композита принимается расчетный уровень деформации около 1,2 %                        | Верно/Неверно |
| При расчете детали из такого композита принимается расчетный уровень деформации около 0,3 %                        | Верно/Неверно |



Оцени корректность каждого утверждения.  
У тебя всего одна попытка.

**Ответить**

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

|                                                                                                                    |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Предельная деформация такого композита приблизительно совпадает с предельной деформацией волокон                   | Верно   |
| Трещины в связующем такого композита образуются только при уровне нагрузки, близком к предельной деформации        | Неверно |
| Трещины в связующем такого композита образуются при уровне нагрузки, в несколько раз меньшем предельной деформации | Верно   |
| При расчете детали из такого композита принимается расчетный уровень деформации около 1,2 %                        | Неверно |
| При расчете детали из такого композита принимается расчетный уровень деформации около 0,3 %                        | Верно   |



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

|                                                                                                                    |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Предельная деформация такого композита приблизительно совпадает с предельной деформацией волокон                   | Верно/Неверно |
| Трещины в связующем такого композита образуются только при уровне нагрузки, близком к предельной деформации        | Верно/Неверно |
| Трещины в связующем такого композита образуются при уровне нагрузки, в несколько раз меньшем предельной деформации | Верно/Неверно |
| При расчете детали из такого композита принимается расчетный уровень деформации около 1,2 %                        | Верно/Неверно |
| При расчете детали из такого композита принимается расчетный уровень деформации около 0,3 %                        | Верно/Неверно |



## Вопрос 2.

### Метод химического осаждения из газовой фазы



УНТ состоят из углерода.

**Откуда берется углерод при производстве УНТ методом химического осаждения из газовой фазы?**

Из смеси частиц катализатора и сажи – чистого углерода

В результате высокотемпературного разложения углеродсодержащего газа

Выделяется из частиц катализатора



*Выбери один из вариантов.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

Из смеси частиц катализатора и сажи – чистого углерода

В результате высокотемпературного разложения углеродсодержащего газа

Выделяется из частиц катализатора



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

Из смеси частиц катализатора и сажи – чистого углерода

В результате высокотемпературного разложения углеродсодержащего газа

Выделяется из частиц катализатора



## Вопрос 3.

### Геометрия нанотрубок и агломерирование



Рассмотрим композит , армированный углеродными волокнами с объёмной долей 60 %, в связующем которого диспергированы нанотрубки с объёмной долей 1 %. Диаметр углеродных волокон – 7  $\mu\text{м}$ , волокна однонаправленные, длинные. Диаметр нанотрубок – 10 нм, длина – 1  $\mu\text{м}$ , нанотрубки ориентированы хаотично.

**Вычислите** и сравните суммарную поверхность волокон и нанотрубок в 1  $\text{см}^3$  композита. Какой компонент армирования – микро (волокна) или нано (УНТ) – будет подвержен поверхностному взаимодействию, которое приводит к агломерированию?

Суммарная площадь нанотрубок больше суммарной площади волокон в пять раз, несмотря на то, что они занимают объем в 150 раз меньший, чем волокна. Нанотрубки сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

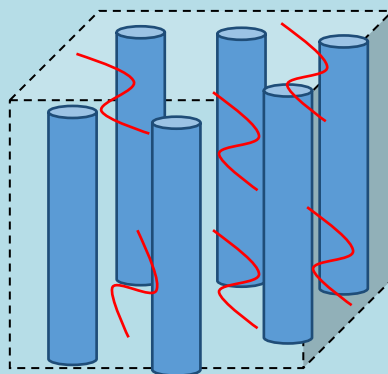
Суммарная площадь нанотрубок меньше суммарной площади волокон в пять раз. Волокна сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

Суммарная площадь нанотрубок и суммарная площадь волокон примерно одинаковы, несмотря на то, что нанотрубки занимают объем в 150 раз меньший, чем волокна. Нанотрубки, как и волокна, сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты



*Выбери один из вариантов.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**



1 мм<sup>3</sup> КОМПОЗИТА





Для вычислений используйте следующие формулы:

1. Объём одного волокна вычисляется по формуле:  $V_f = \frac{\pi d^2}{4} L_f$
2. Поверхность одного волокна вычисляется по формуле:  $S_f = \pi d L_f$
3. Суммарная поверхность всех волокон вычисляется по формуле:  
$$S_{fs} = [\text{суммарный объём волокон}] \frac{S_f}{V_f}$$
4. Объём одной УНТ вычисляется по формуле:  $V_n = \frac{\pi d^2}{4} L_n$
5. Поверхность одной УНТ вычисляется по формуле:  $S_n = \pi d L_n$
6. Суммарная поверхность всех УНТ вычисляется по формуле:  
$$S_{ns} = [\text{суммарный объём УНТ}] \frac{S_n}{V_n}$$

**Молодец!**  
**Это правильный ответ. Ознакомьтесь с расчетом по задаче.**

Суммарная площадь нанотрубок больше суммарной площади волокон в пять раз, несмотря на то, что они занимают объем в 150 раз меньший, чем волокна. Нанотрубки сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

Суммарная площадь нанотрубок меньше суммарной площади волокон в пять раз. Волокна сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

Суммарная площадь нанотрубок и суммарная площадь волокон примерно одинаковы, несмотря на то, что нанотрубки занимают объем в 150 раз меньший, чем волокна. Нанотрубки, как и волокна, сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

**Расчет**





## Решение:

Волокна занимают 60 % объёма, т. е.  $0,6 \text{ мм}^3$ , связующее –  $0,4 \text{ мм}^3$ .

Исходя из приведенных ранее формул, суммарная поверхность всех волокон составит  **$340 \text{ мм}^2$** :

$$S_{fs} = [\text{суммарный объём волокон}] \frac{S_f}{V_f} = [\text{суммарный объём волокон}] \frac{4}{d_f} = 0,6 \cdot 10^9 \mu\text{м}^3 \cdot \frac{4}{7 \mu\text{м}} = 0,34 \cdot 10^9 \mu\text{м}^2 = 340 \text{ мм}^2$$

УНТ занимают 1 % объёма связующего, т. е.  $0,004 \mu\text{м}^3$ .

Исходя из приведенных ранее формул, суммарная поверхность всех волокон составит  **$1600 \text{ мм}^2$** :

$$S_{ns} = [\text{суммарный объём УНТ}] \frac{S_f}{V_f} = [\text{суммарный объём УНТ}] \frac{4}{d_n} = 0,004 \cdot 10^9 \mu\text{м}^3 \cdot \frac{4}{0,01 \mu\text{м}} = 1,6 \cdot 10^9 \mu\text{м}^2 = 1600 \text{ мм}^2$$

**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

Суммарная площадь нанотрубок больше суммарной площади волокон в пять раз, несмотря на то, что они занимают объем в 150 раз меньший, чем волокна. Нанотрубки сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

Суммарная площадь нанотрубок меньше суммарной площади волокон в пять раз. Волокна сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты

Суммарная площадь нанотрубок и суммарная площадь волокон примерно одинаковы, несмотря на то, что нанотрубки занимают объем в 150 раз меньший, чем волокна. Нанотрубки, как и волокна, сильно взаимодействуют и стремятся образовывать агломераты



## Вопрос 4.

### Что такое трещиностойкость?



Выберите верную размерность и физический смысл величины трещиностойкости  $G$ .

Напряжение сопротивления образованию трещины ( $\text{Па} = \text{Н/м}^2$ )

Сила сопротивления образованию трещины ( $\text{Н}$ )

Энергия, необходимая для образования трещины ( $\text{Дж}$ )

Энергия, высвобождаемая при образовании единицы поверхности трещины ( $\text{Дж/м}^2 = \text{Па} \cdot \text{м}$ )



Выбери один из вариантов.  
У тебя всего одна попытка.

Ответить

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

Напряжение сопротивления образованию трещины ( $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ )

Сила сопротивления образованию трещины ( $\text{Н}$ )

Энергия, необходимая для образования трещины ( $\text{Дж}$ )

Энергия, высвобождаемая при образовании единицы поверхности трещины ( $\text{Дж}/\text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{м}$ )



Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.

Напряжение сопротивления образованию трещины ( $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ )

Сила сопротивления образованию трещины ( $\text{Н}$ )

Энергия, необходимая для образования трещины ( $\text{Дж}$ )

Энергия, высвобождаемая при образовании единицы поверхности трещины ( $\text{Дж}/\text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{м}$ )



## Вопрос 5.

### Маточные смеси



**Почему применение маточных смесей (суперконцентратов) для получения УНТ-армированных связующих предпочтительнее прямого перемешивания сухих нанотрубок?**

При прямом размешивании нанотрубки будут повреждены

Работа с сухими нанотрубками требует сложных и дорогостоящих мер охраны труда

Издержки при прямом перемешивании выше

Сухие нанотрубки имеют ограниченный срок хранения



*Выбери все верные варианты.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**



**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

При прямом размещивании нанотрубки будут повреждены

Работа с сухими нанотрубками требует сложных и дорогостоящих мер охраны труда

Издержки при прямом перемешивании выше

Сухие нанотрубки имеют ограниченный срок хранения



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

При прямом размещивании нанотрубки будут повреждены

Работа с сухими нанотрубками требует сложных и дорогостоящих мер охраны труда

Издержки при прямом перемешивании выше

Сухие нанотрубки имеют ограниченный срок хранения



## Вопрос 6.

### Катализаторы для выращивания нанотрубок



**Какие из перечисленных элементов являются катализаторами реакции выращивания нанотрубок?**

|    |  |
|----|--|
| Fe |  |
| Cl |  |
| Na |  |
| Ni |  |
| Au |  |
| Hg |  |
| Md |  |



*Перемести элементы в область.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

|    |                                                         |    |    |
|----|---------------------------------------------------------|----|----|
| Fe | <table><tr><td>Fe</td></tr><tr><td>Ni</td></tr></table> | Fe | Ni |
| Fe |                                                         |    |    |
| Ni |                                                         |    |    |
| Cl |                                                         |    |    |
| Na |                                                         |    |    |
| Ni |                                                         |    |    |
| Au |                                                         |    |    |
| Hg |                                                         |    |    |
| Md |                                                         |    |    |



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

|           |  |
|-----------|--|
| <b>Fe</b> |  |
| <b>Cl</b> |  |
| <b>Na</b> |  |
| <b>Ni</b> |  |
| <b>Au</b> |  |
| <b>Hg</b> |  |
| <b>Md</b> |  |



## Вопрос 7.

Портятся ли волокна при выращивании на них нанотрубок?



**Почему прочность «пушистых» углеродных волокон, как правило, снижена по сравнению с исходным волокном?**

Нанотрубки твёрдые, и они царапают волокно

Нанотрубки вступают в химическую реакцию с углеродом волокна и «разъедают» его

Части металлического катализатора вступают в химическую реакцию с углеродом волокна и «разъедают» его

Волокна ломаются при проведении реакции химического осаждения из газовой фазы



*Выбери один из вариантов.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

Нанотрубки твёрдые, и они царапают волокно

Нанотрубки вступают в химическую реакцию с углеродом волокна и «разъедают» его

Части металлического катализатора вступают в химическую реакцию с углеродом волокна и «разъедают» его

Волокна ломаются при проведении реакции химического осаждения из газовой фазы



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

Нанотрубки твёрдые, и они царапают волокно

Нанотрубки вступают в химическую реакцию с углеродом волокна и «разъедают» его

Части металлического катализатора вступают в химическую реакцию с углеродом волокна и «разъедают» его

Волокна ломаются при проведении реакции химического осаждения из газовой фазы





## Вопрос 8.

### УНТ-армирование и расслоение композита



Деталь, изображённая на рисунке  – ребро жесткости, применяемое для придания жесткости крылу самолёта – изготовлена из углепластика. Основной вид разрушения детали при изгибном нагружении – отслоение у основания фланца, как показано на рисунке.

**Какой из методов нано-армирования будет наиболее эффективным для противодействия такому разрушению?**

УНТ, диспергированные в связующем

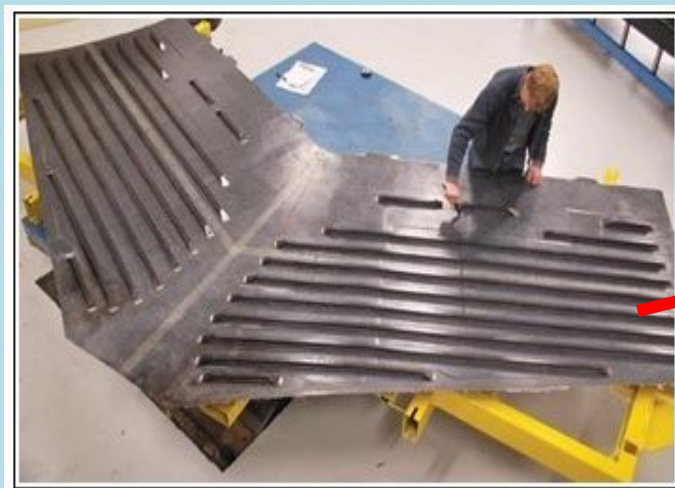
УНТ, выращенные на волокнах армирующей углеволокнуистой ткани

Прослойка из УНТ-«вуали», помещённая при изготовлении ребра жёсткости между фланцем и основанием



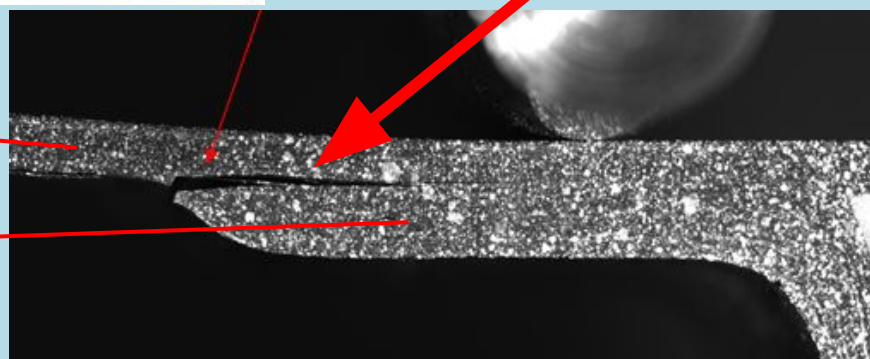
*Выбери один из вариантов.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**



основание

фланец



**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

УНТ, диспергированные в связующем

УНТ, выращенные на волокнах армирующей углеволокнутой ткани

Прослойка из УНТ-«вуали», помещённая при изготовлении ребра жёсткости между фланцем и основанием



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

УНТ, диспергированные в связующем

УНТ, выращенные на волокнах армирующей углеволокнутой ткани

Прослойка из УНТ-«вуали», помещённая при изготовлении ребра жёсткости между фланцем и основанием



## Вопрос 8 (продолжение). УНТ-армирование и расслоение композита



В чем заключается эффективность применения прослойки из УНТ-«вуали», помещённой при изготовлении ребра жёсткости между фланцем и основанием?

Такая прослойка прочнее, чем лес нанотрубок, выращенный на волокне

При таком способе механические свойства УНТ после пропитки сохраняются в наибольшей степени

При этом УНТ-армирование помещается именно в то место, где ожидается разрушение



*Выбери один из вариантов.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

Такая прослойка прочнее, чем лес нанотрубок, выращенный на волокне

При таком способе механические свойства УНТ после пропитки сохраняются в наибольшей степени

При этом УНТ-армирование помещается именно в то место, где ожидается разрушение



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

Такая прослойка прочнее, чем лес нанотрубок, выращенный на волокне

При таком способе механические свойства УНТ после пропитки сохраняются в наибольшей степени

При этом УНТ-армирование помещается именно в то место, где ожидается разрушение



## Вопрос 9.

### Механизм повышения трещиностойкости



**Почему повышается трещиностойкость УНТ-армированных композитов ?**

УНТ увеличивают модуль Юнга композита, следовательно, деформации при заданной нагрузке уменьшаются и трещины не раскрываются

УНТ залечивают образовавшиеся трещины

УНТ противодействуют распространению и росту трещин, «скрепляя» их края

Жёсткие УНТ отклоняют трещины, затрудняя их прорастание

За счёт химического взаимодействия полимера с УНТ прочность связующего повышается



*Выбери все верные варианты.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**



**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

УНТ увеличивают модуль Юнга композита, следовательно, деформации при заданной нагрузке уменьшаются и трещины не раскрываются

УНТ залечивают образовавшиеся трещины

УНТ противодействуют распространению и росту трещин, «скрепляя» их края

Жёсткие УНТ отклоняют трещины, затрудняя их прорастание

За счёт химического взаимодействия полимера с УНТ прочность связующего повышается



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

УНТ увеличивают модуль Юнга композита, следовательно, деформации при заданной нагрузке уменьшаются и трещины не раскрываются

УНТ залечивают образовавшиеся трещины

УНТ противодействуют распространению и росту трещин, «скрепляя» их края

Жёсткие УНТ отклоняют трещины, затрудняя их прорастание

За счёт химического взаимодействия полимера с УНТ прочность связующего повышается



## Вопрос 10.

### Практическое применение УНТ-армирования



Какие из перечисленных продуктов уже производятся коммерчески и какие находятся в стадии лабораторных разработок ?

|                                                    |                           |
|----------------------------------------------------|---------------------------|
| Суперконцентраты УНТ в термореактивных связующих   | Коммерческие/лабораторные |
| Суперконцентраты УНТ в термопластических связующих | Коммерческие/лабораторные |
| Клюшки для гольфа и хоккея                         | Коммерческие/лабораторные |
| Автомобильные бамперы                              | Коммерческие/лабораторные |
| Детали крыльев самолётов                           | Коммерческие/лабораторные |
| Элементы электромагнитной защиты                   | Коммерческие/лабораторные |
| Датчики деформации и разрушения, основанные на УНТ | Коммерческие/лабораторные |



*Выбери вариант для каждого продукта.  
У тебя всего одна попытка.*

**Ответить**

**Молодец!**  
**Это правильный ответ.**

|                                                    |              |
|----------------------------------------------------|--------------|
| Суперконцентраты УНТ в термореактивных связующих   | Коммерческие |
| Суперконцентраты УНТ в термопластических связующих | Коммерческие |
| Клюшки для гольфа и хоккея                         | Коммерческие |
| Автомобильные бамперы                              | Коммерческие |
| Детали крыльев самолётов                           | Лабораторные |
| Элементы электромагнитной защиты                   | Лабораторные |
| Датчики деформации и разрушения, основанные на УНТ | Лабораторные |



**Ты ошибся.  
Это неправильный ответ.**

|                                                    |                           |
|----------------------------------------------------|---------------------------|
| Суперконцентраты УНТ в термореактивных связующих   | Коммерческие/лабораторные |
| Суперконцентраты УНТ в термопластических связующих | Коммерческие/лабораторные |
| Клюшки для гольфа и хоккея                         | Коммерческие/лабораторные |
| Автомобильные бамперы                              | Коммерческие/лабораторные |
| Детали крыльев самолётов                           | Коммерческие/лабораторные |
| Элементы электромагнитной защиты                   | Коммерческие/лабораторные |
| Датчики деформации и разрушения, основанные на УНТ | Коммерческие/лабораторные |



# Результаты (вариант 1)

Твой результат \_\_\_\_\_

Благодаря тебе,  
теперь я могу  
исчезать!

**В начало курса**

**Заккрыть курс**



## Результаты (вариант 2)

Твой результат \_\_\_\_\_

К сожалению, ты не  
в полной мере освоил  
Повторим нашу  
базовые принципы нано-  
экскурсию еще раз?  
армирования волокнистых  
композитов!

**Пройти  
тестирование  
еще раз**

**В начало курса**

**Заккрыть курс**