

Полимерные композиционные материалы: текущее состояние и перспективы

Морозов Олег Сергеевич

osmorozov@yandex.ru



Научный сотрудник кафедры химической технологии и новых материалов химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова



Старший научный сотрудник лаборатории высокотемпературных композиционных материалов АО «ИНУМiT»

История материалов

- Природные (камень, дерево)
- Искусственные (бетон, металлы и сплавы, стекло, керамика)
- Синтетические (полимеры и композиты)

Сохраняют свои свойства в процессе эксплуатации

- Умные материалы

Контролируемо меняют свойства



Израильтяне использовали рубленную солому для армирования кирпичей



История композитов

Египетские саркофаги отделаны склеенным шпоном, а мумии завернуты в ткань смоченную смолой



История композитов

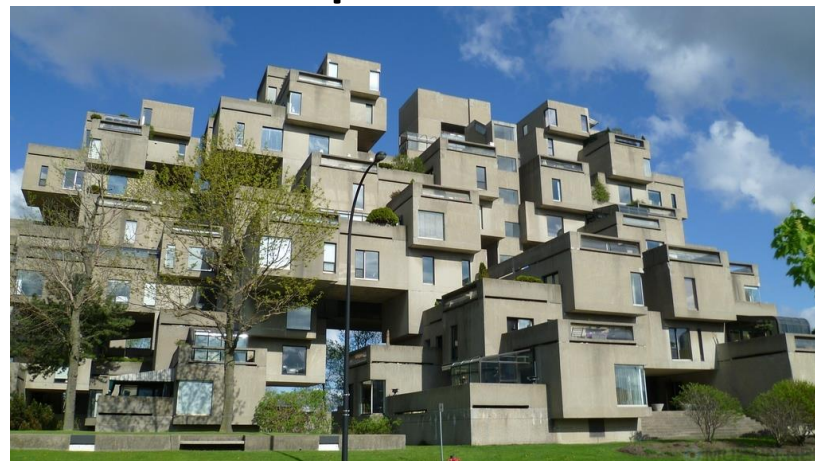
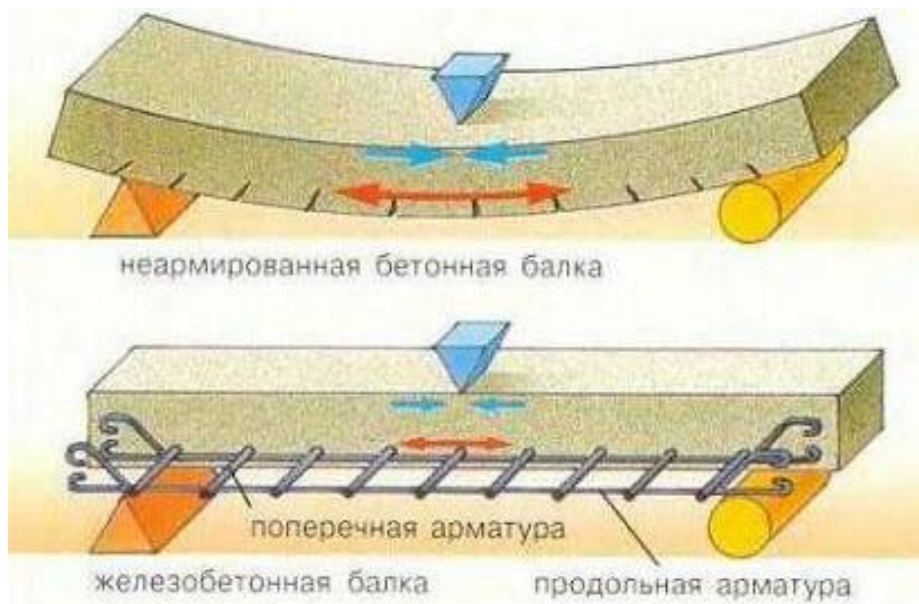
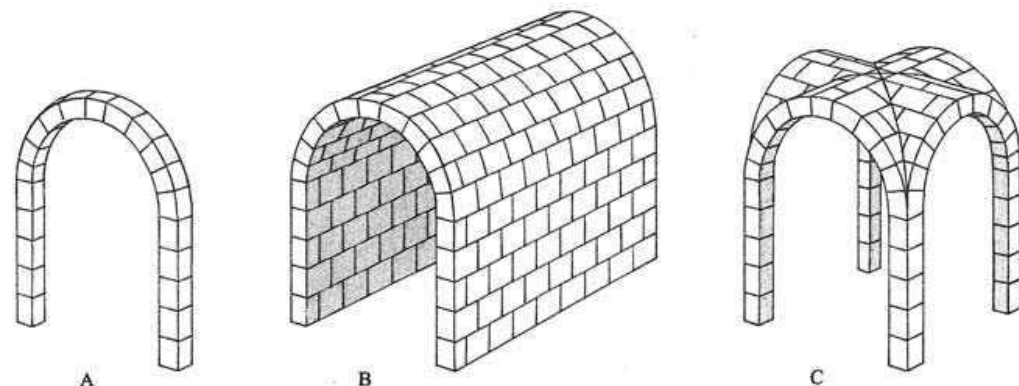
Монгольские войны использовали высококачественные луки изготовленные из сухожилий волов, рогов, бамбуковых стеблей, шелка и смолы сосны. Прочность таких луков достигала 80% от современных стеклопластиковых аналогов.



Современная реконструкция выполненная из стеклопластика и дерева исторического композитного лука.



Композиционные материалы



Композиционные материалы



Фото: <http://www.slavutich-media.ru>



Фото: www.мастерок.жж.рф



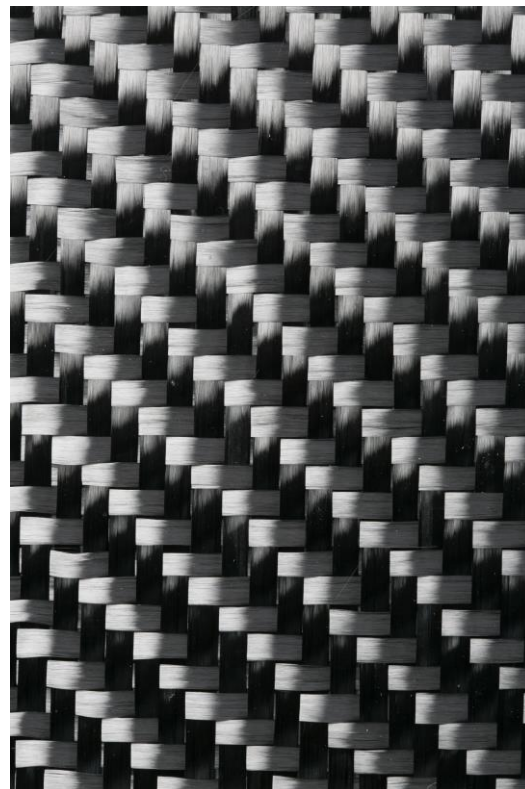
Из чего состоят ПКМ?

Связующее (Матрица)



Полимер

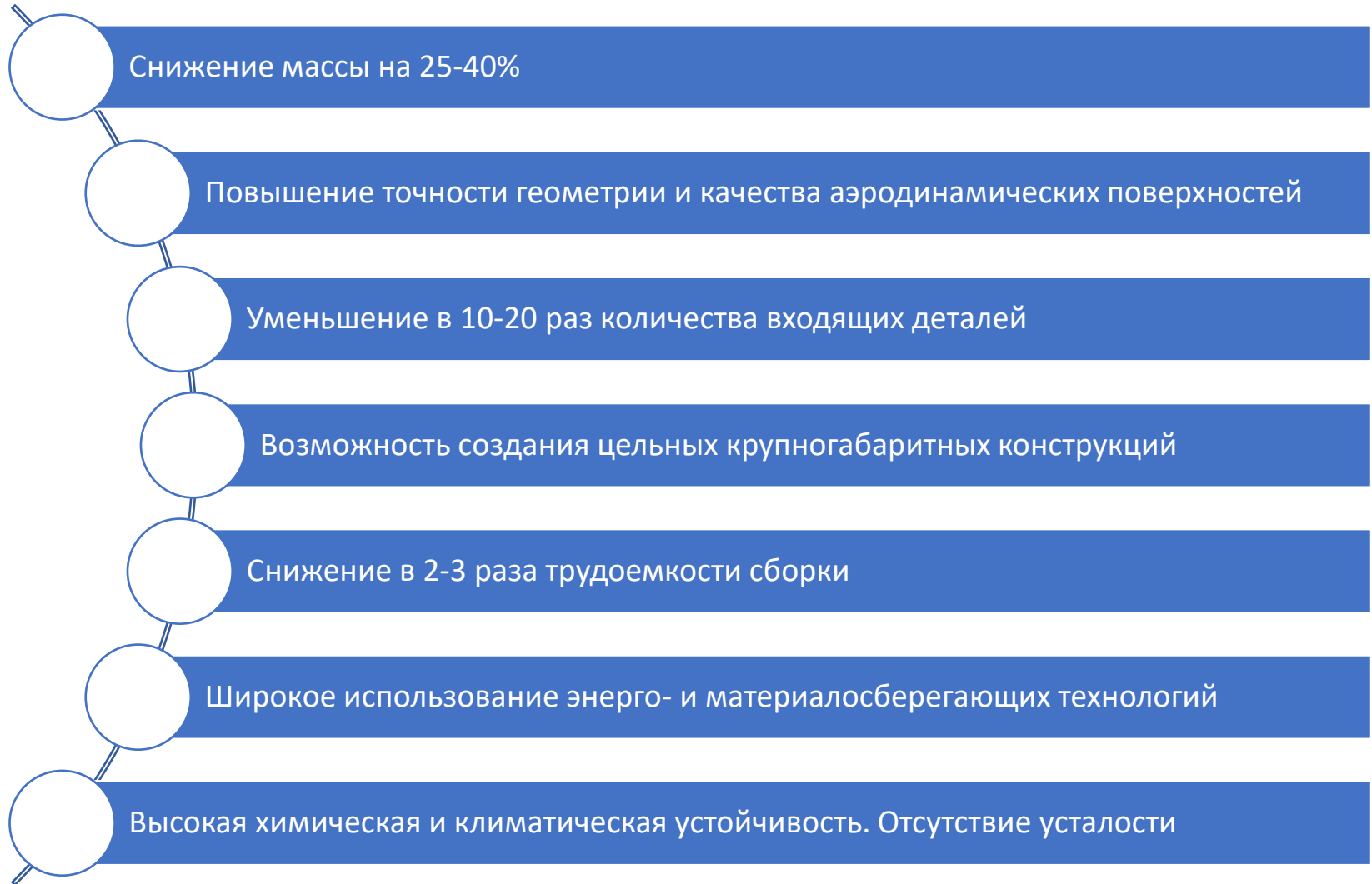
Армирующий наполнитель



Органический или неорганический



Зачем?



Композиты — это...

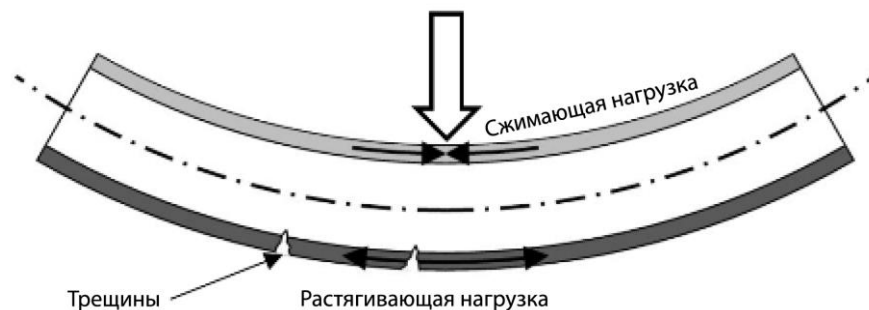
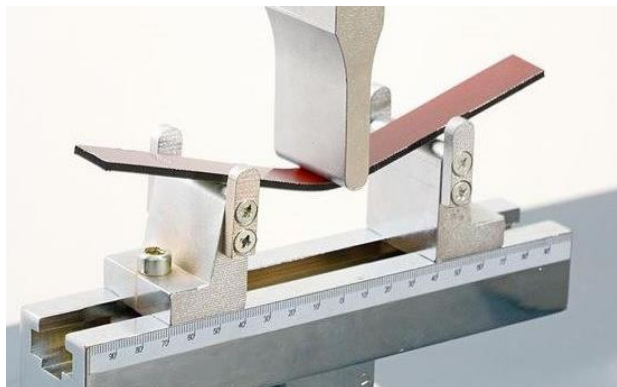


Роль компонентов

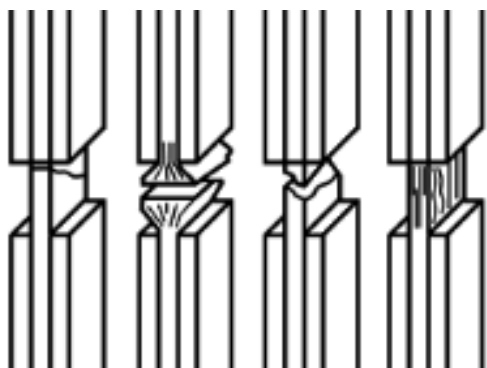
Матрица (полимер)

(трехточечный) изгиб

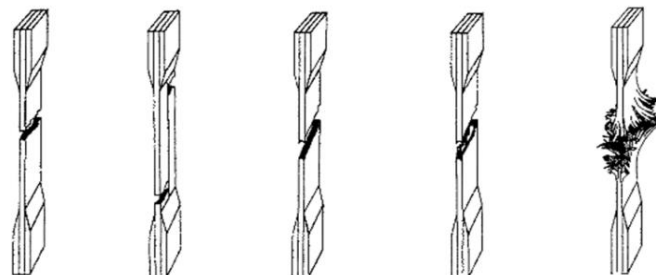
Армирующий наполнитель



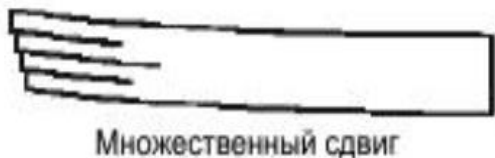
Сжатие:



Растяжение



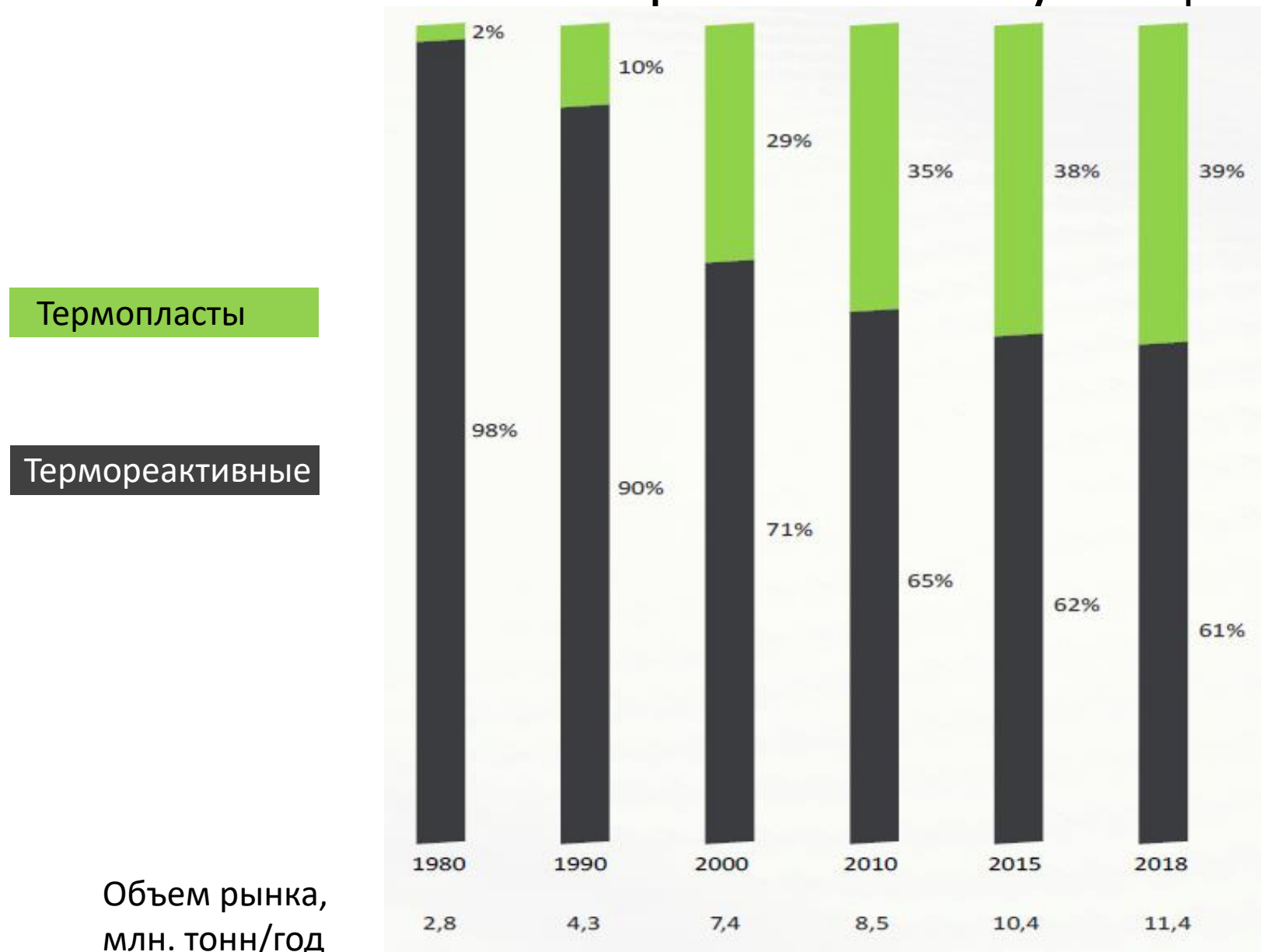
Межслоевой сдвиг:



Сдвиг в плоскости

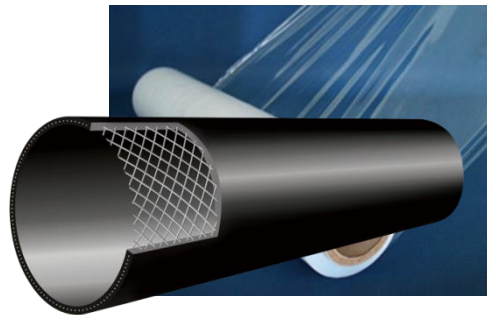


Рынок полимерных связующих



Полимерные матрицы.

Термопласты

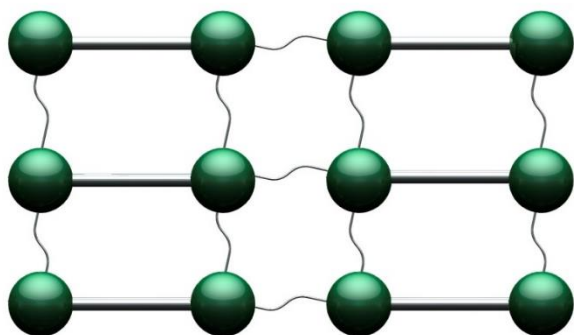


Полиэтилен



Термореактивные матрицы

Вязкий или твердый



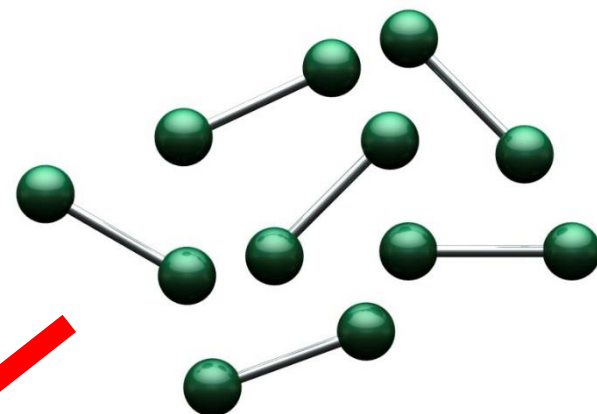
Нагрев



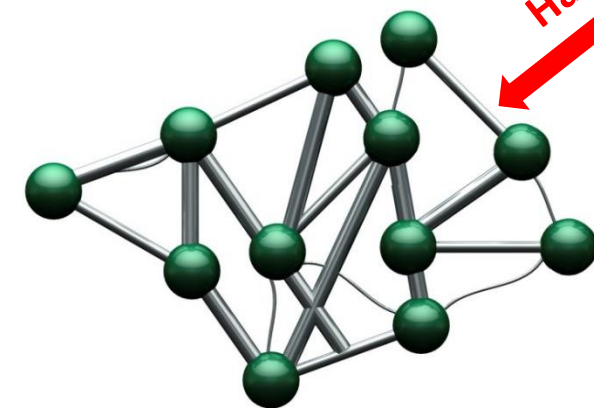
Охлаждение



Текущий



Нагрев



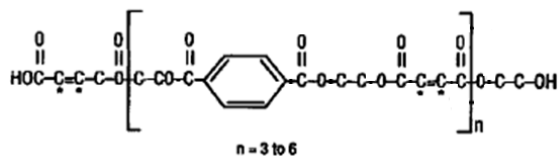
Сшитый полимер (твердый)



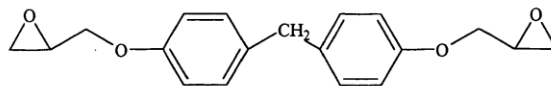
Полимерные матрицы. Реактопласты.



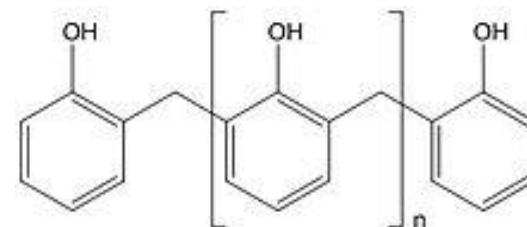
Полиэфирные смолы



Эпоксидные смолы



Фенолформальдегидные
смолы



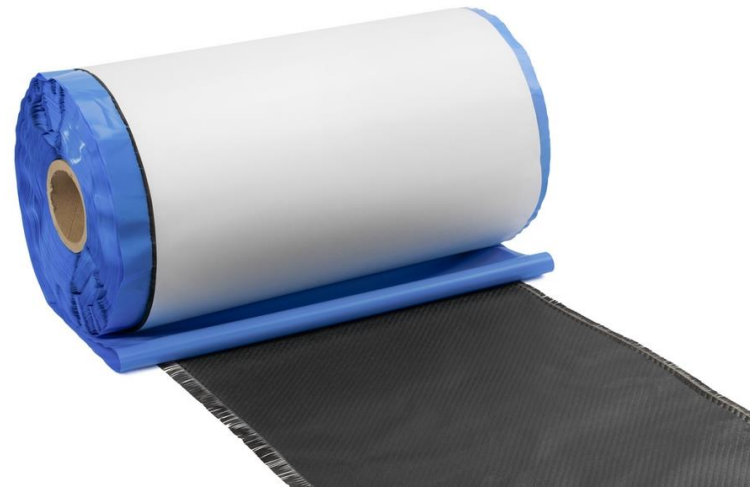
Пропитка наполнителя



Нужна низкая вязкость и
долгое время жизни
или
Использовать раствор



Прессматериал

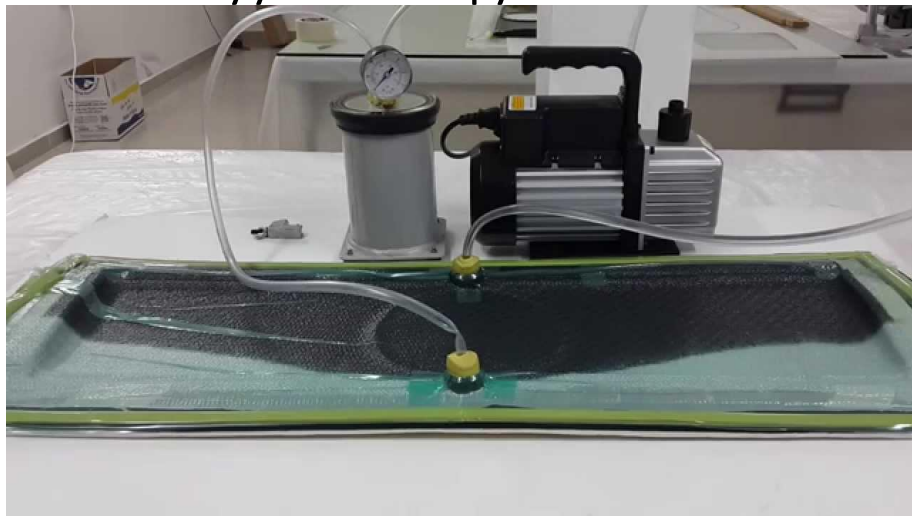


Препрег
(pre-impregnated)



Пропитка и формование

Вакуумная инфузия:



Инжекция в форму (RTM):



Намотка:



Ручная пропитка:



Автоклавное формование



- GE90 – ручная выкладка препрега. Вес лопасти составляет 14,5 кг,
- Лопатка вентилятора GE90 состоит из 400 слоёв, разбитых на 1700 кусков препрега.
- Для полной выкладки лопатки в пресс-форме рабочему требуется около 340 часов.



GE90 and GENx Composite fan blades



Composite fan blades

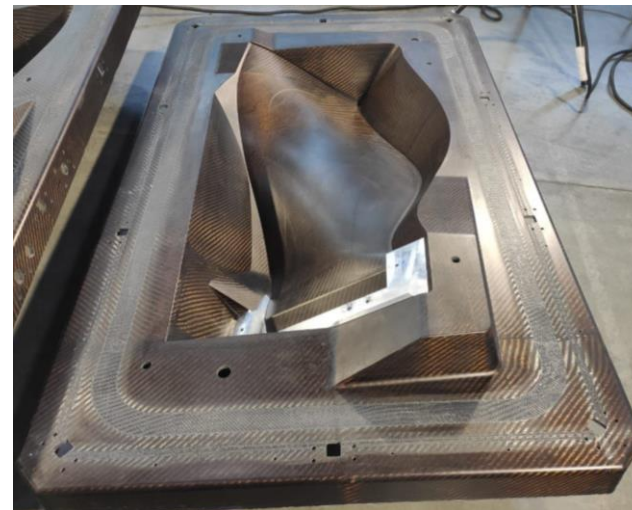


Производственный участок изделий из ПКМ



Примеры реализованных проектов

Оснастки для композитных лопаток авиационного двигателя. (2022 год)



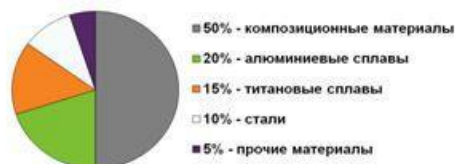
Перфорированная композитная панель двигателя ПД-8. (2022 год)



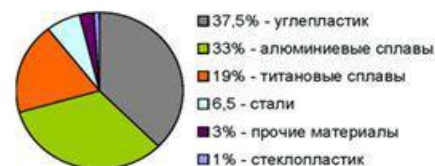
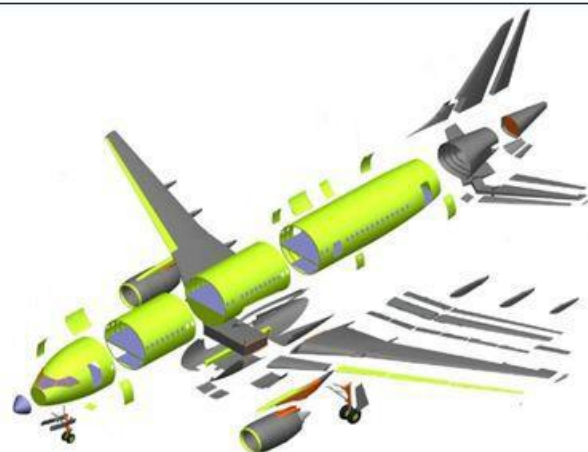


Применение композиционных материалов в авиастроении (гражданская и военная авиация)

Проект БОИНГ 787 DREAMLINER



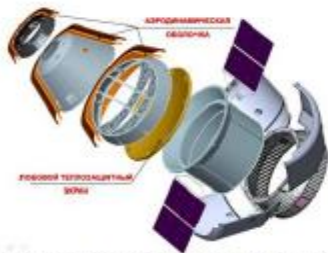
Проекты SSJ 1XX и IRCUT MS 21



- Доля ПКМ (по массе):
 - Аэробус А380 – 22%
 - Боинг 787 – до 60%
 - Военные – не более 40%
- Результаты использования ПКМ:
 - Снижение веса на 15-30%
 - Уменьшение расхода топлива
 - Улучшение экологических показателей
- По расчетам фирмы Porcher, за килограмм сэкономленного веса производители гражданских самолетов готовы платить до 500 ЕВРО



ПРОЕКТ ПТК НП «ФЕДЕРАЦИЯ»



комплекс бисмалеимидных материалов и материалов для композитной оснастки

БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ



комплекс материалов для вакуумной инфузии и композитной оснастки

ПРОЕКТ МС-21



комплекс материалов для изготовления элементов самолета и композитной оснастки

ПРОЕКТ Ил-114



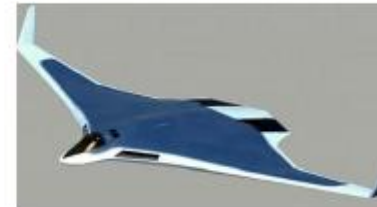
Комплекс материалов для оснастки, клеев и препрегов

ПРОЕКТ «Охотник»

Комплекс материалов для вакуумной инфузии и композитной оснастки, препреги



ПРОЕКТ ПАК ДА «Изделие 80»



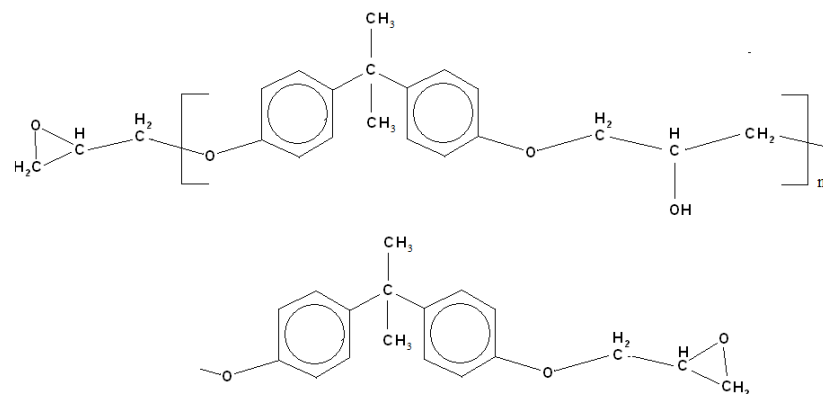
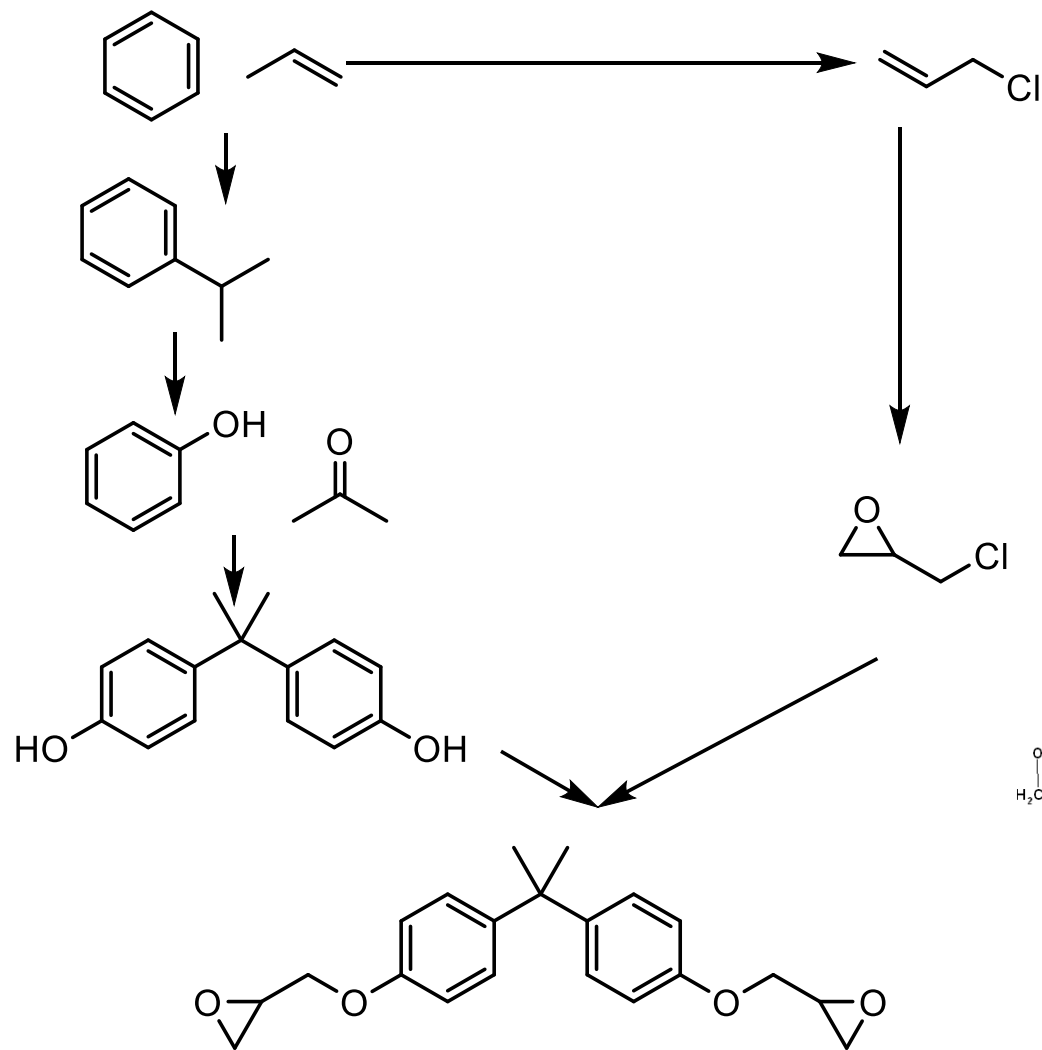
Комплекс высокотемпературных материалов для входного и выходного устройства

ПРОЕКТ «Ка 226»

Комплекс бисмалеимидных материалов для капота и предкрылков



Эпоксидные смолы



Эпоксидные связующие

Достоинства

Прочность ++

Жесткость ++

Низкая вязкость +/-

Высокая температура стеклования
(до 200°C) ++

Высокая трещиностойкость
(с пластификаторами) +++

Низкая усадка ++

умеренное влагонасыщение +/-

Технологичность +++

Цена +/-

Недостатки

Температура эксплуатации
до 90-120°C +/-

Отверждение при 180°C +/-

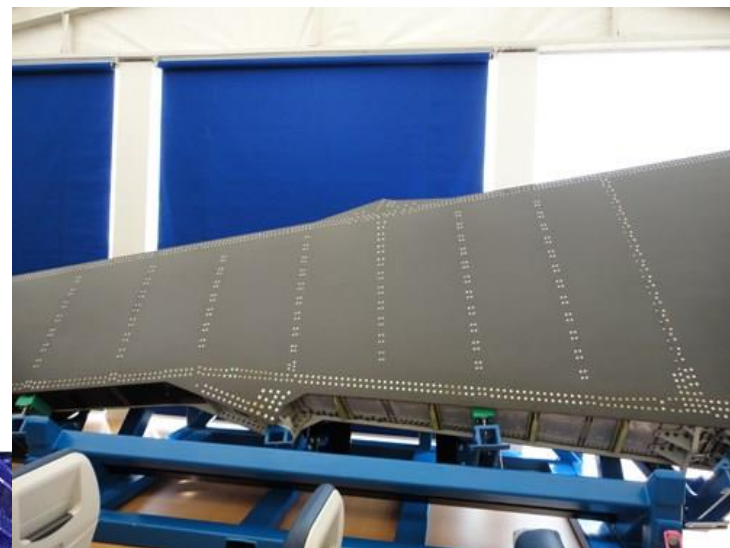


РКК ЭНЕРГИЯ

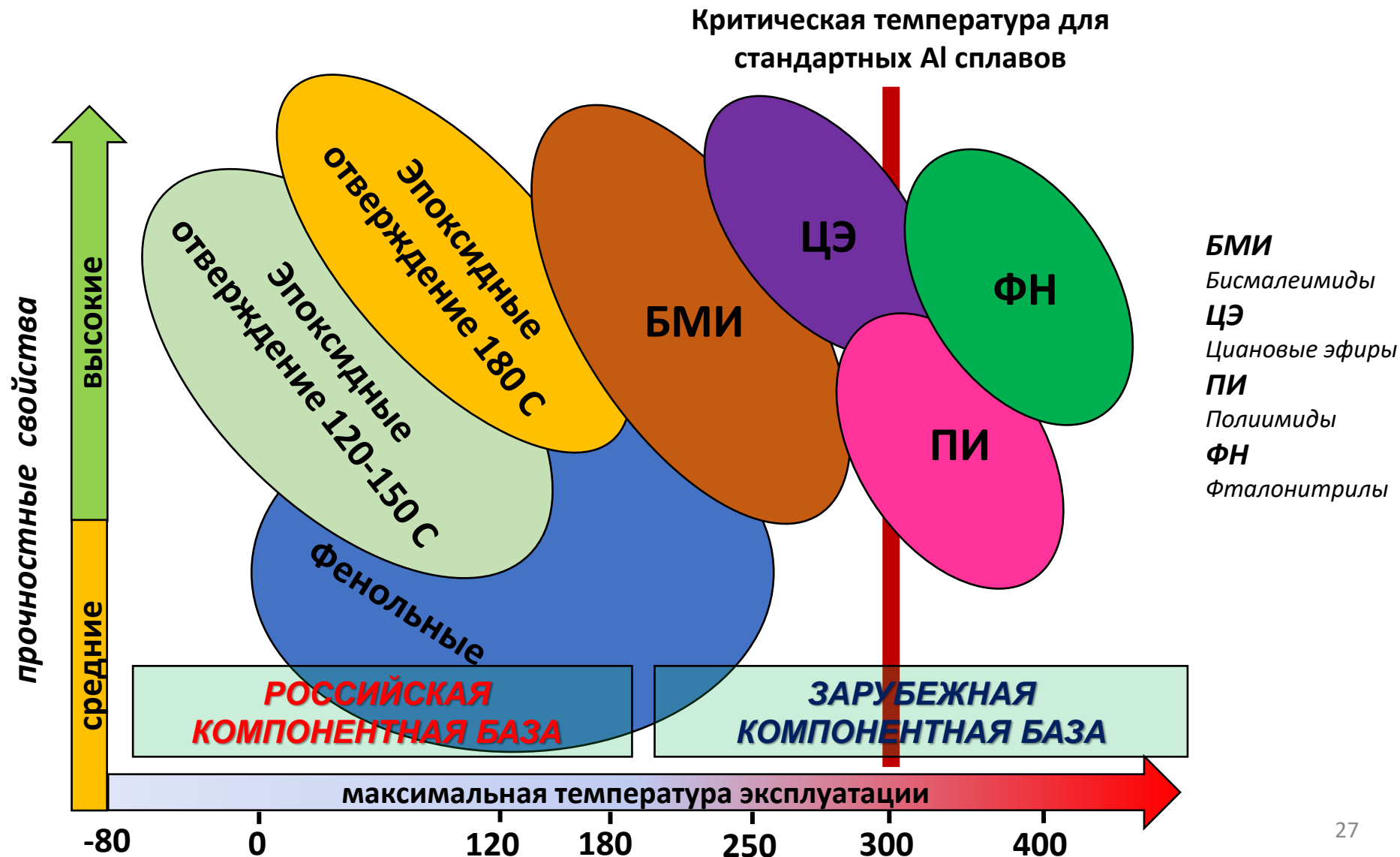
композитный отсек возвращаемого аппарата



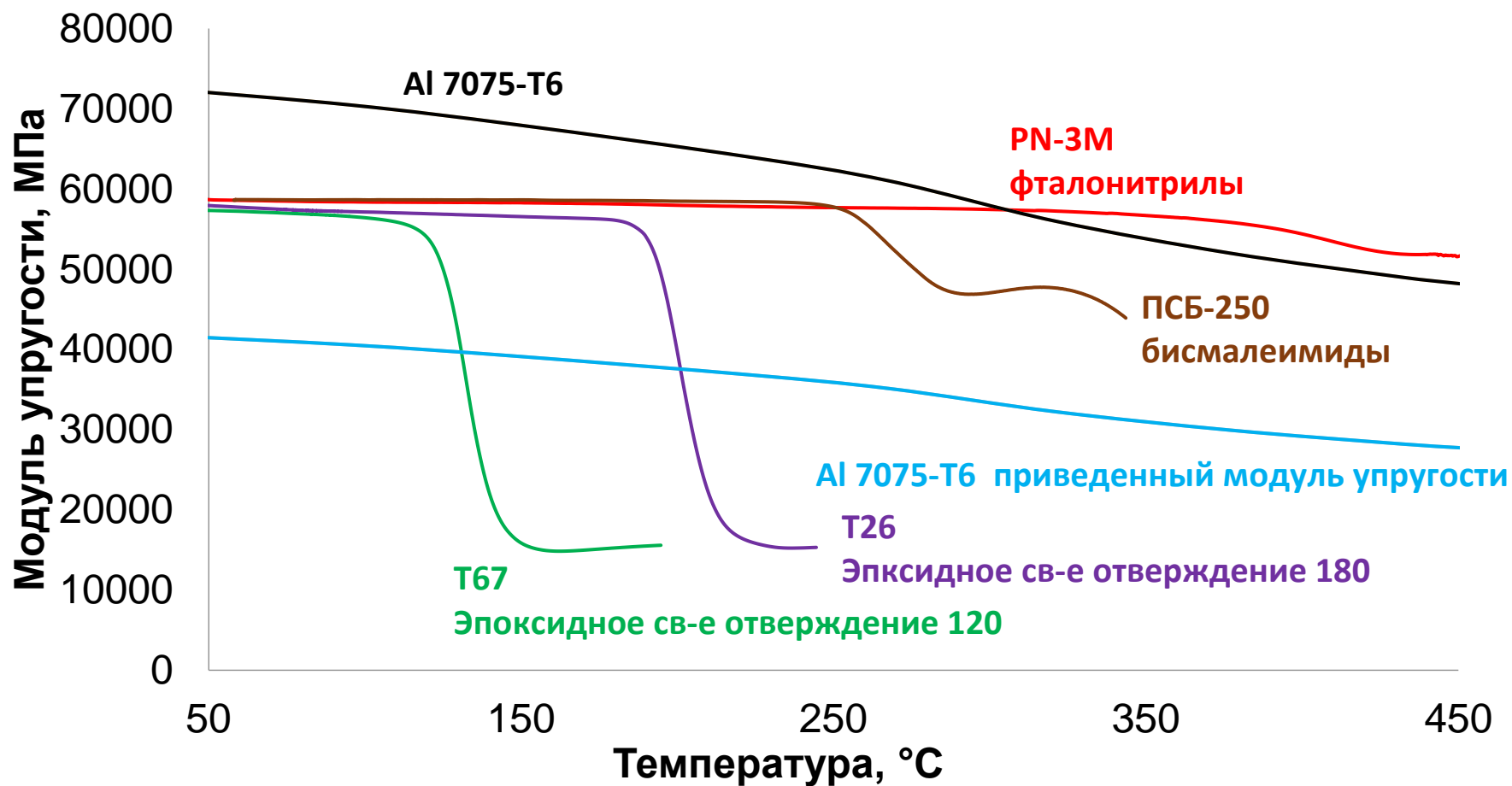
Композитный кессон МС-21



Термореактивные связующие

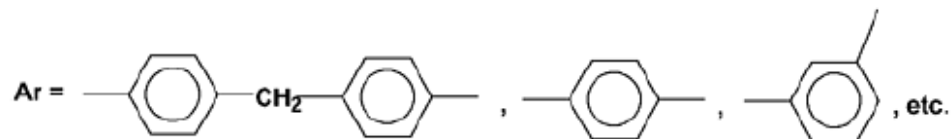
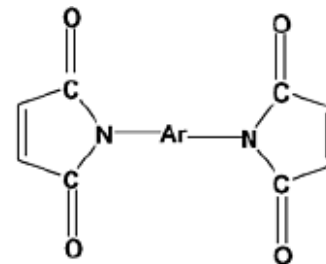


Теплостойкость ПКМ



Бисмалеимиды

Horst Stenzenberger



General Dynamics F-16XL

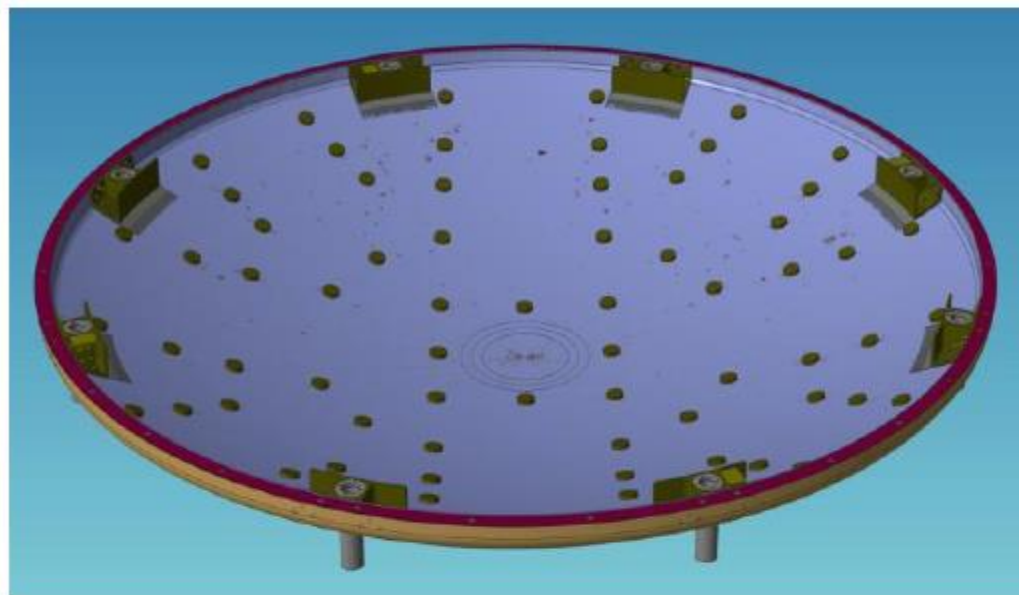


McDonnell Douglas AV-8B Harrier 29

Опыт внедрения разработок

Комплекс материалов на основе БМИ связующих
для каркаса ЛТЭ

Статус: серийная поставка материалов



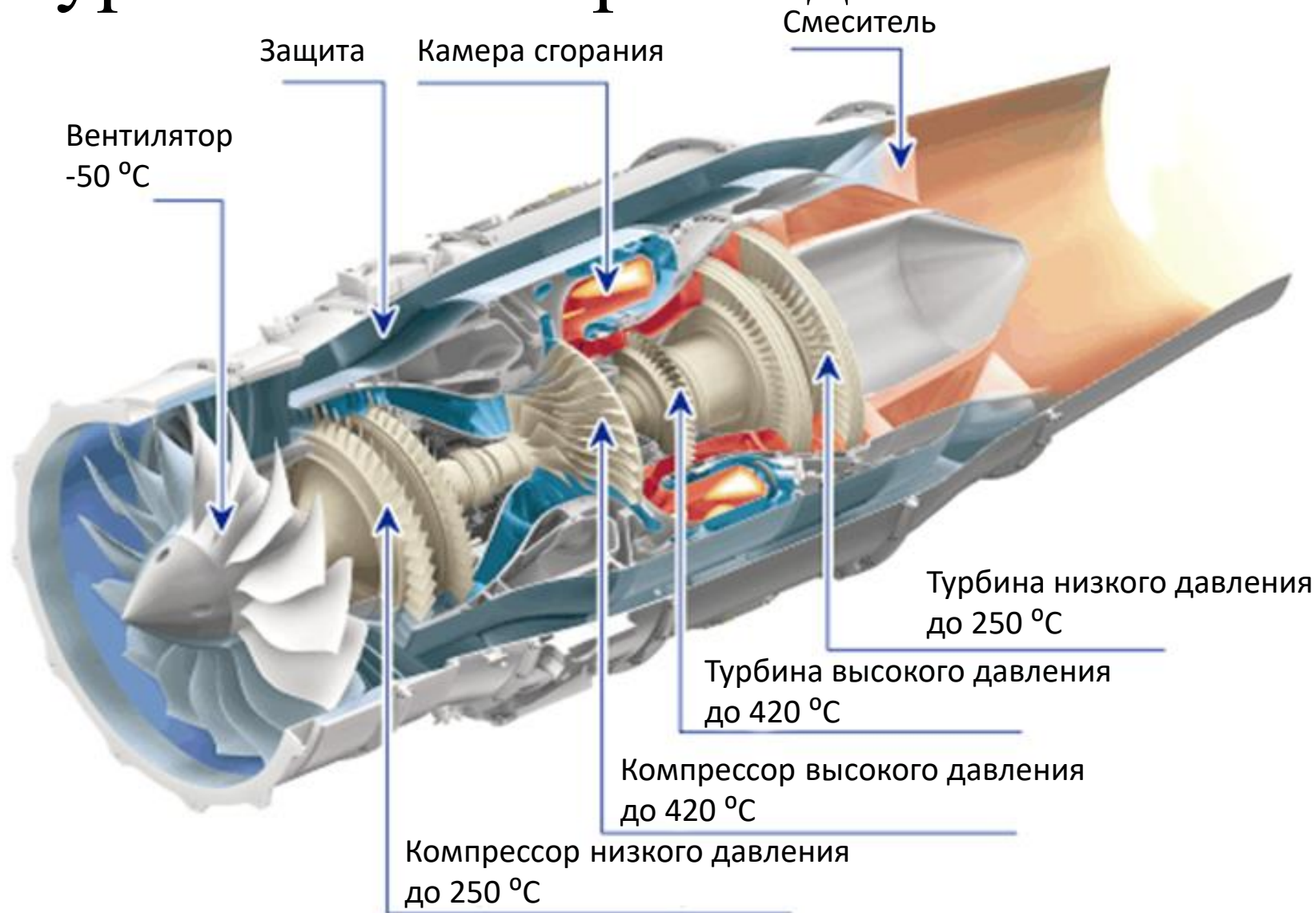
**ПРЕПРЕГ + ПЛЕНОЧНЫЙ КЛЕЙ + ВСПЕНИВАЮЩИЙСЯ СОТОЗАПОЛНИТЕЛЬ+
ПАСТА ДЛЯ ЗАБИВКИ СОТ+БМИ КЛЕЙ**

На все материалы есть ТУ согласованные с «РКК Энергия» материалы прошли
испытания по программе разработанной «РКК Энергия»

Применение БМИ



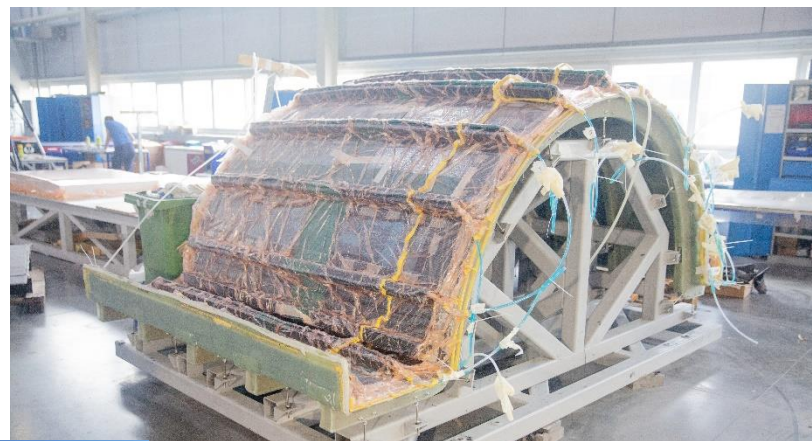
Турбовентиляторный двигатель



Производственный участок изделий из ПКМ

Примеры реализованных проектов

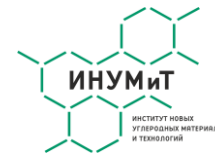
Комплект углепластиковой оснастки для двигателя ПД-14 (2022 год)



Производственный участок изделий из ПКМ

Примеры реализованных проектов

Комплект углепластиковой оснастки для двигателя ПД-8 (2022 год)



Разработка связующего

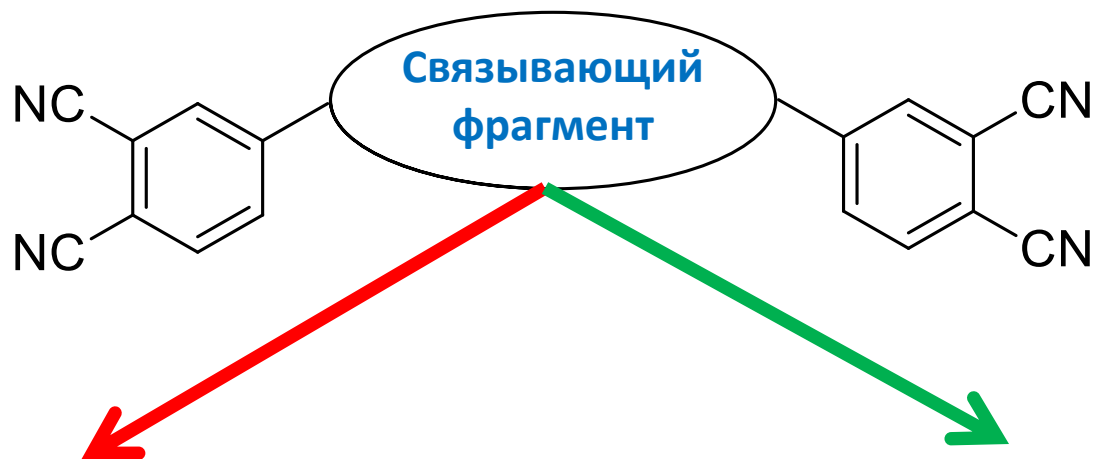
Идея (что хотим улучшить?)

| | |
|-----------------|--|
| Синтез мономера | Отработка лабораторного метода Масштабирование и оптимизация Метод выделения |
|-----------------|--|

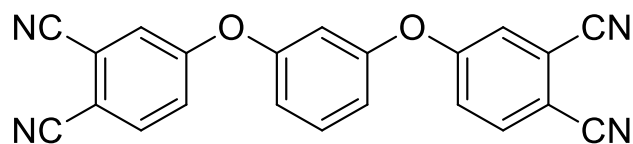
| | |
|---------------------|--|
| Свойства связующего | Вязкость и скорость реакции Термические свойства Химическая характеристика |
|---------------------|--|

| | |
|---------|---|
| Пластик | Выбор состава Режим отверждения Механические и термические свойства |
|---------|---|

Фталонитрилы



Жесткий



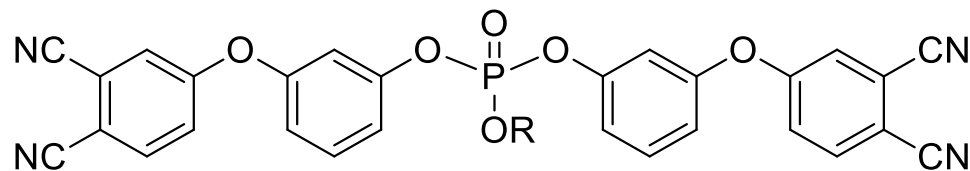
$T_{пл} = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$

Т. Келлер, 1982 г.

ФГУП «ВИАМ», 2015 г.

Производство «ИТЕКМА синтез», сейчас

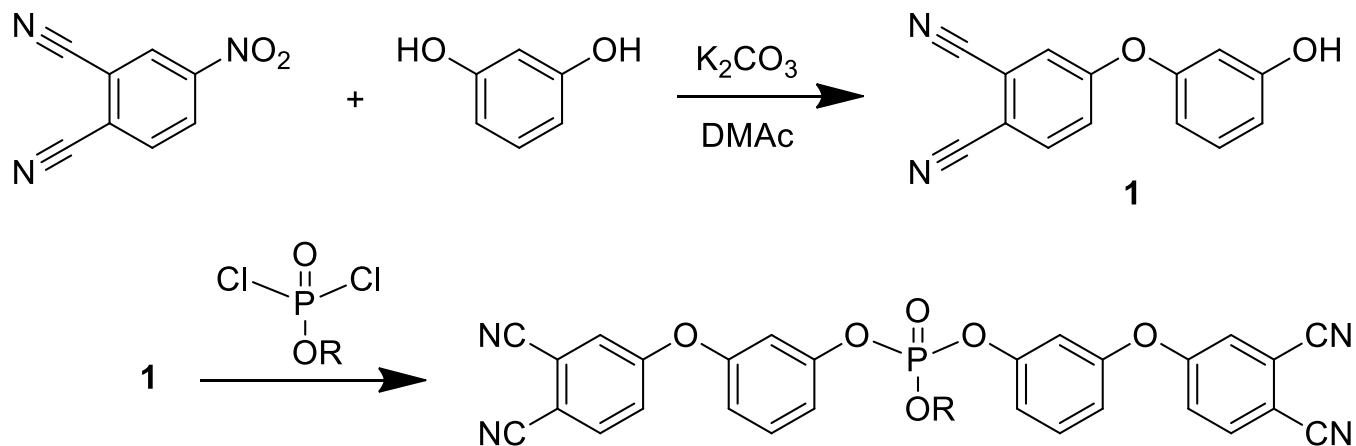
Гибкий



$T_{ст} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$

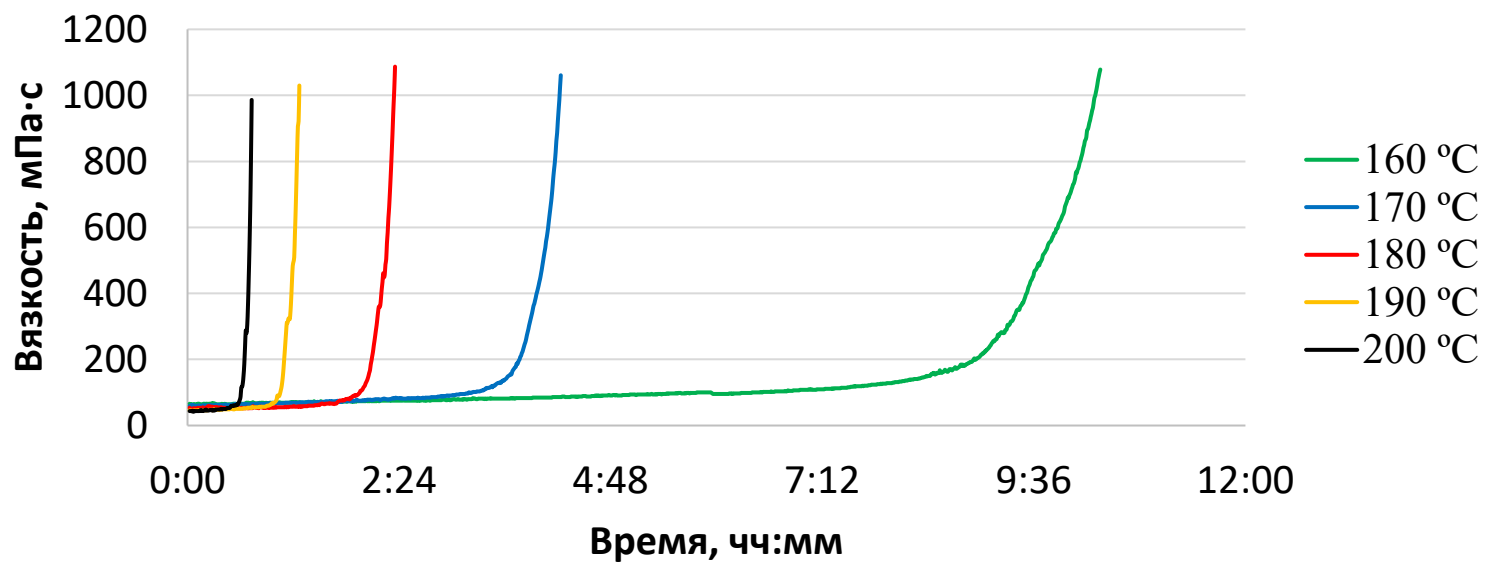
МГУ, 2015

Синтез фталонитрилов

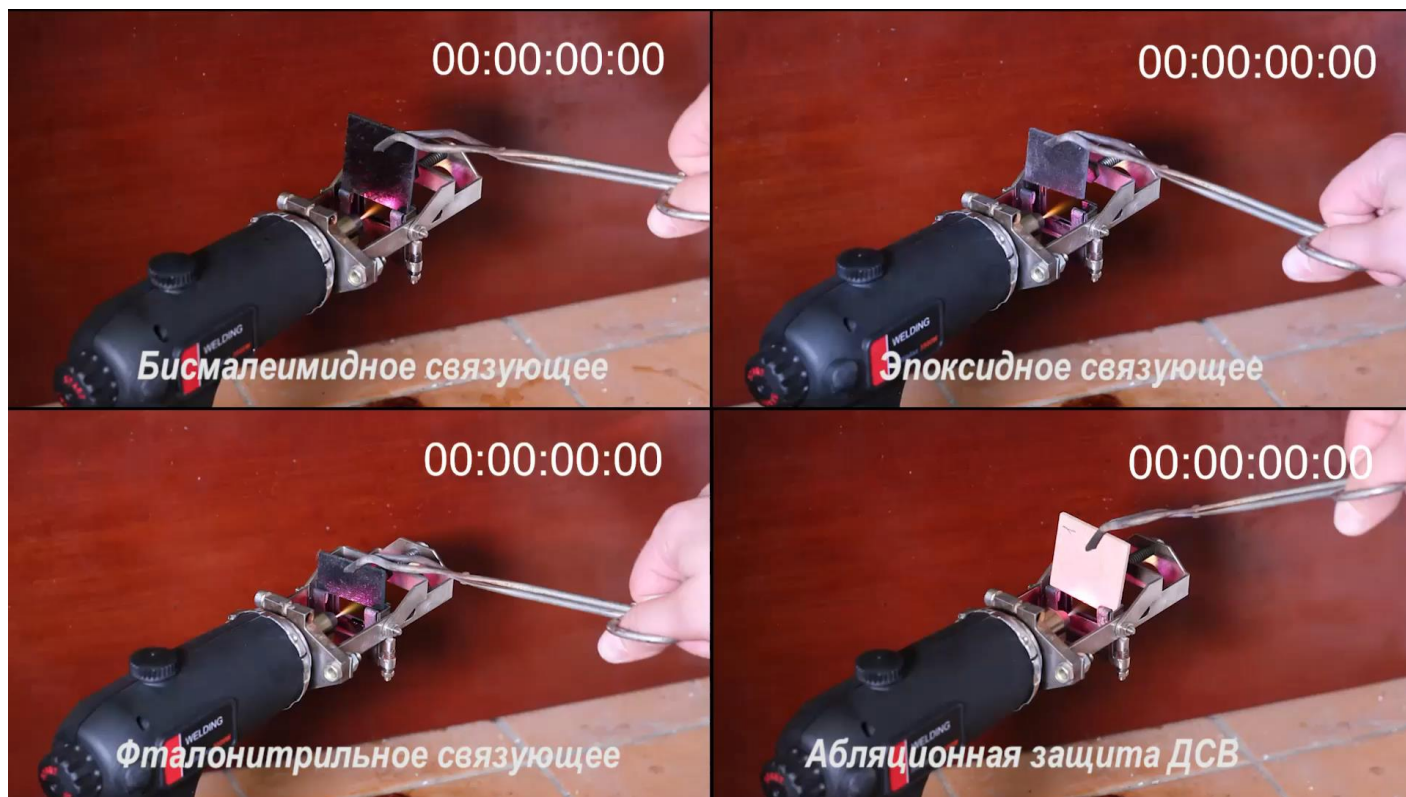


Технологичность фталонитрилов

| | Стандарт | Температура отверждения | |
|---|------------|-------------------------|-------|
| | | 375°C | 180°C |
| Предел прочности при изгибе, МПа | ASTM D790 | 86 | 190 |
| Модуль упругости, ГПа | ASTM D790 | 4,5 | 4,6 |
| Трещиностойкость, K_{IC} , МПа·м ^{1/2} | ASTM D5045 | 0,562 | 0,756 |
| Энергия деформации, G_{IC} , Дж/м ² | ASTM D5045 | 145 | 276 |
| Температура стеклования, T_g , °C | ASTM E2092 | >450 | 200 |
| КЛТР, 10^{-6} К^{-1} | ASTM E831 | 39 | 90 |
| Плотность, г/см ³ | ASTM D792 | 1.347 | 1.336 |



Огнестойкость ПКМ



Изготовление ПКМ

У нас есть связующее

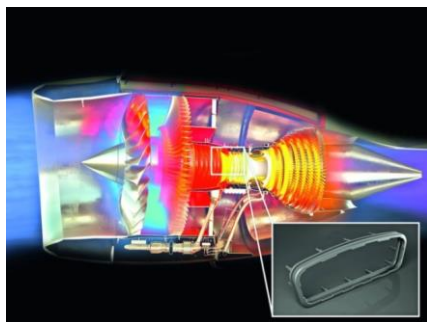
| | |
|---------------------------|--|
| Метод пропитки формования | Инфузия или RTM Автоклав или пресс Растворная пропитка |
|---------------------------|--|

| | |
|-----------------------|--|
| Программа отверждения | Одна стадия Постотверждение Дополнительная обработка |
|-----------------------|--|

| | |
|--------------|---|
| Свойства ПКМ | Выбор испытаний Нарезка образцов Длительные испытания Квалификация материала |
|--------------|---|

Применение фталонитрилов

Элементы двигателей



Возвращаемые космические аппараты



Специальная техника



Морская техника с высокими требованиями к горючести

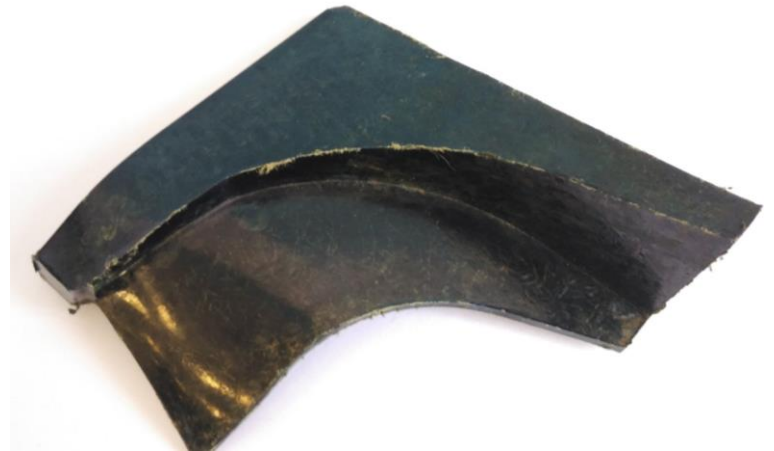


Первые продукты

Лопатка компрессора (Сухая преформа, углеродное волокно, арамидный биндер)



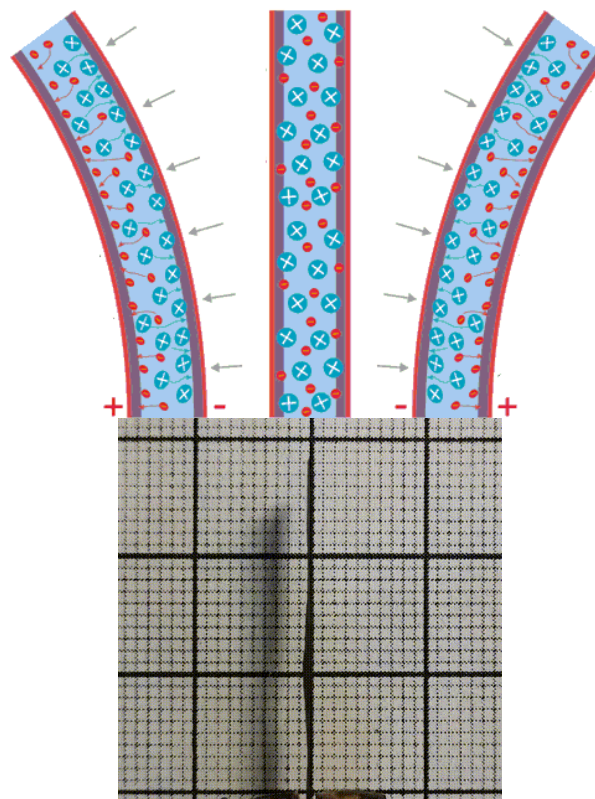
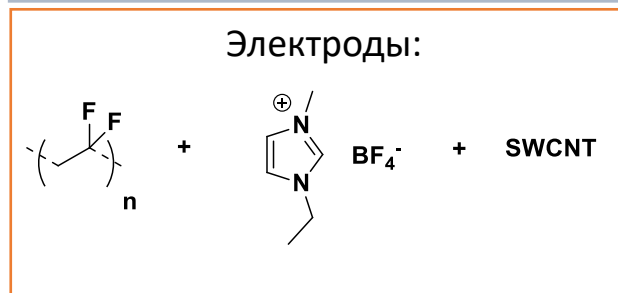
Сухая преформа



Готовая лопатка

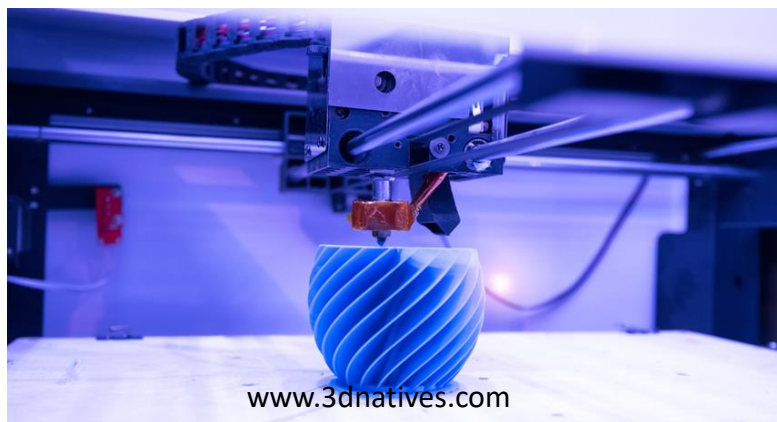
Электроактивные полимеры

полимерные электроактивные материалы, способные функционировать в жестких условиях (вакуум космоса)

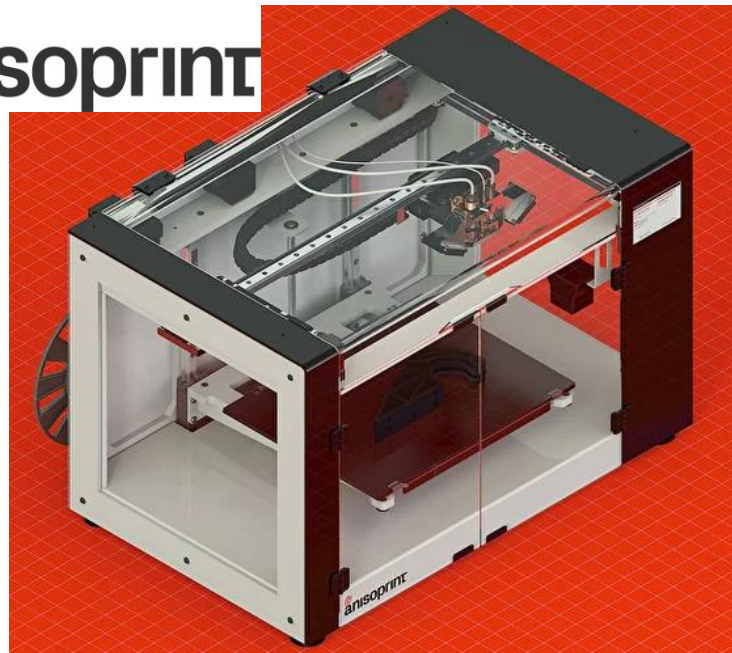


3D-печать

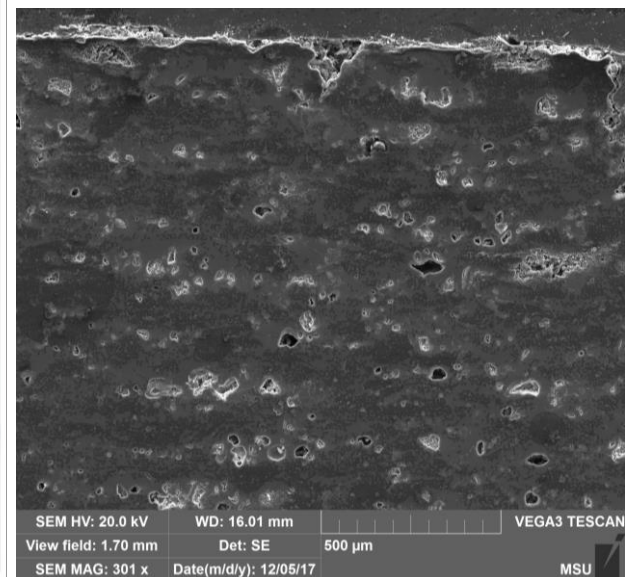
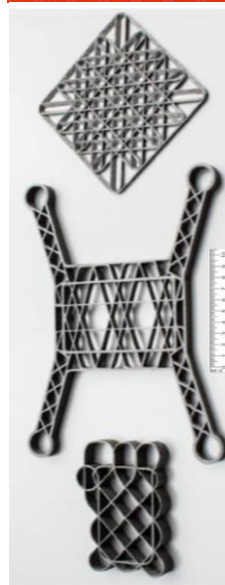
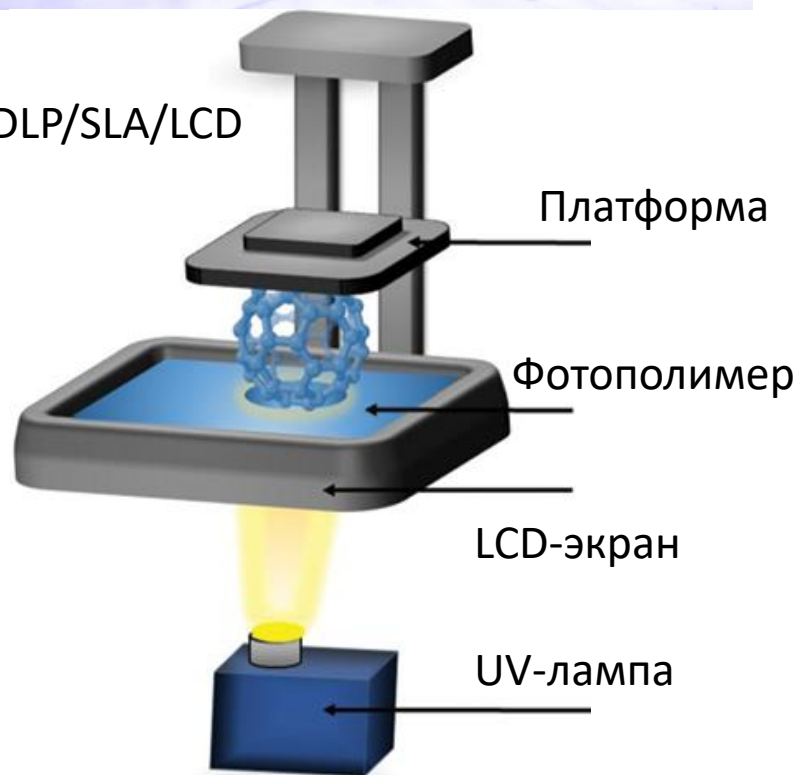
FDM (fused deposition modeling):



 **anisoprint**



DLP/SLA/LCD

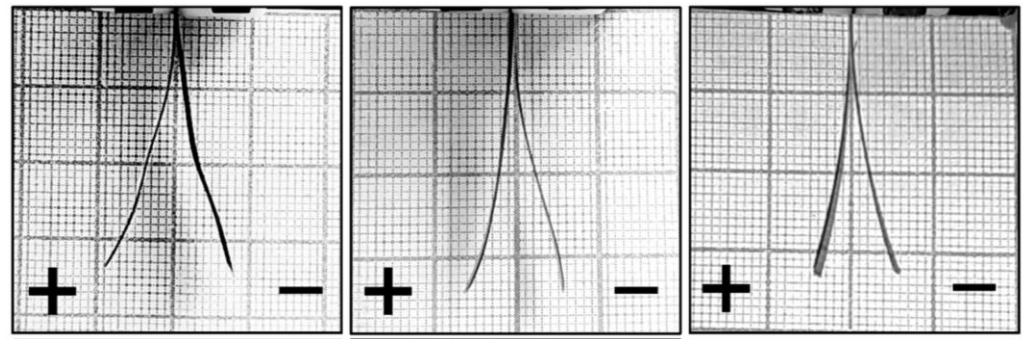
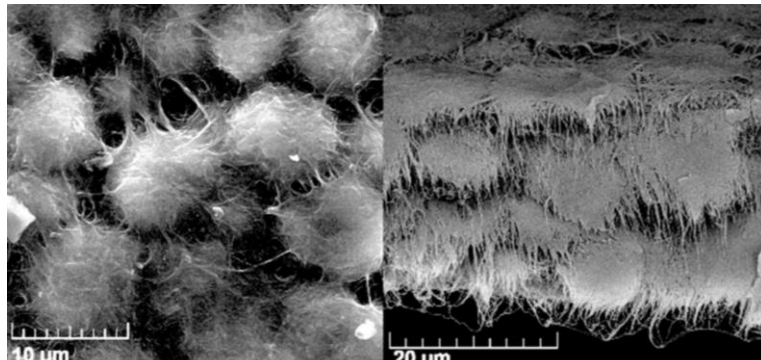
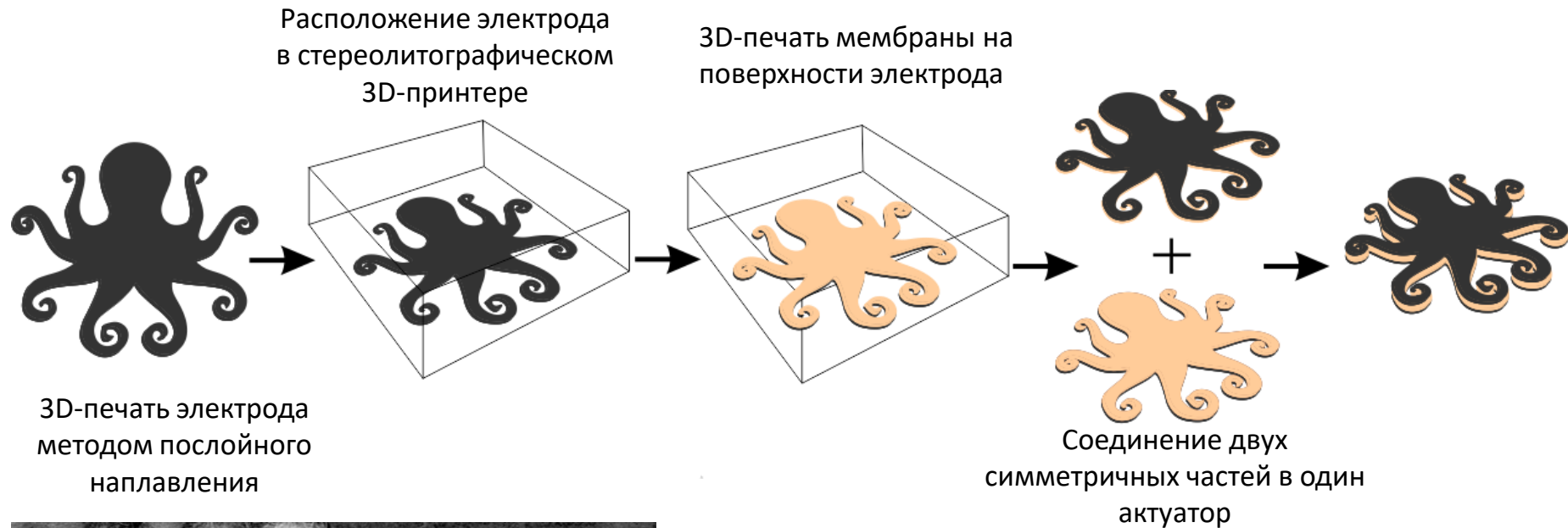


Стереолитография

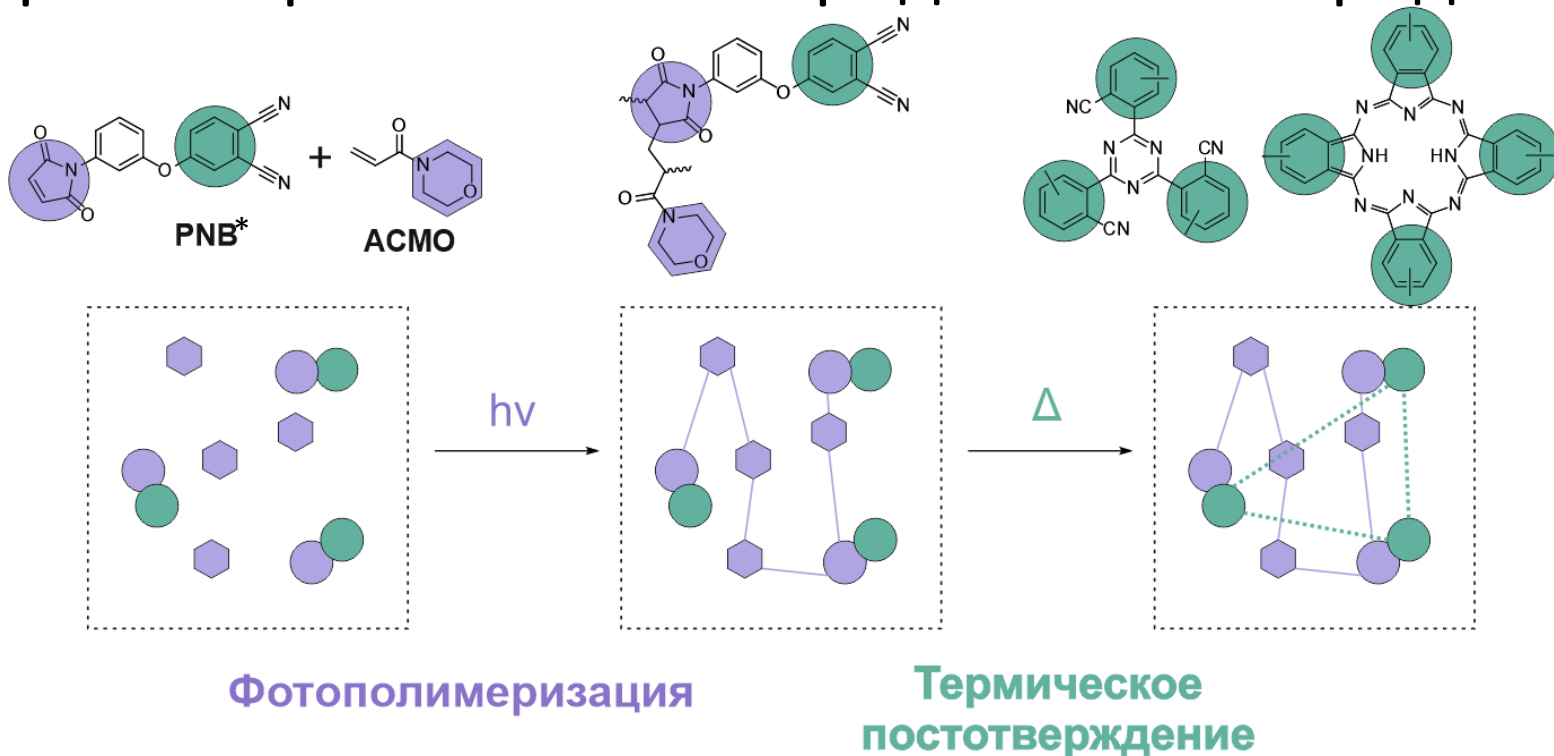


3D-печать электродов

Предложенный подход 3D-печати ионных ЭАП актуаторов.



Концепция 3D-печати с использованием фталонитрильного мономера двойного отверждения



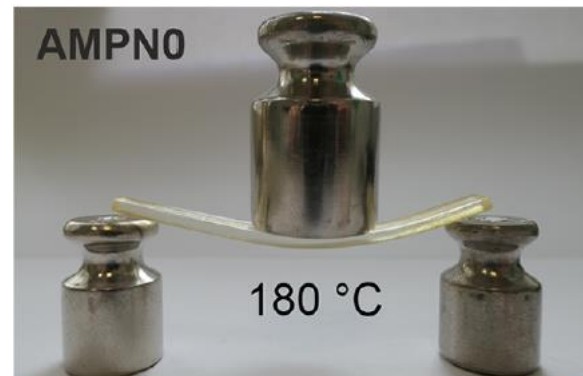
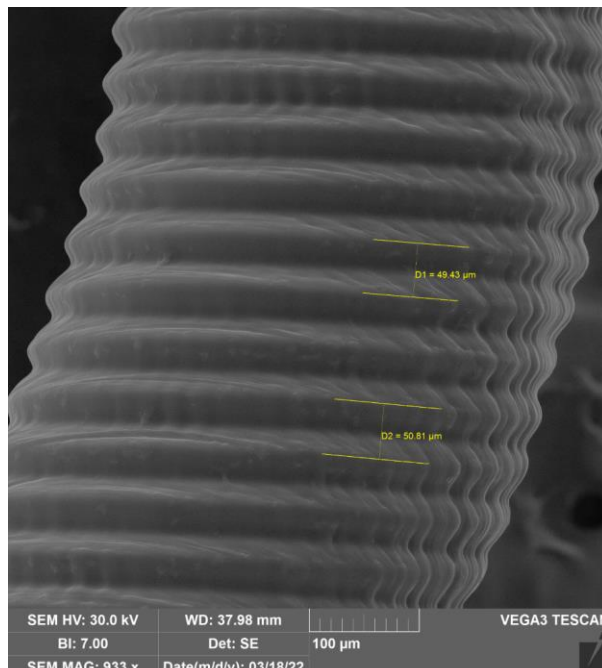
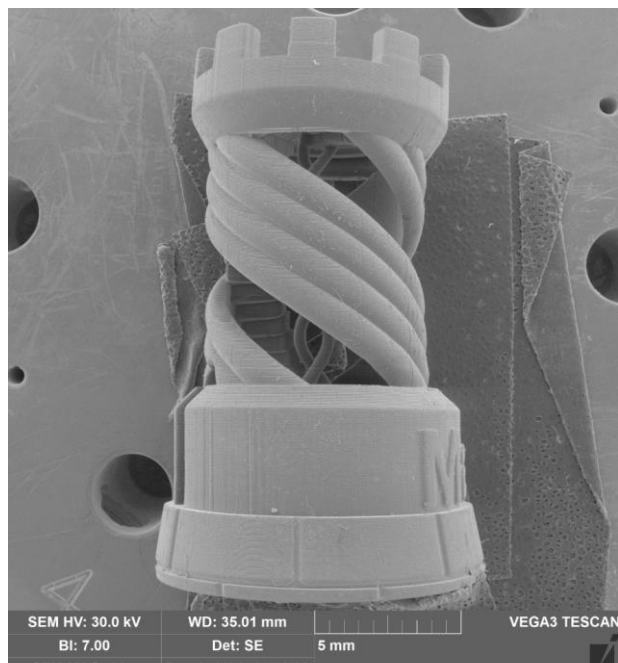
Микрофотографии РЭМ



UV
3D printing



Δ
post-curing



Испытание на горение в пламени газовой горелки

