

Полимерные композиционные материалы. От органического синтеза до конечных изделий

Бабкин Александр Владимирович
Кафедра химической технологии и новых материалов
Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Старший научный сотрудник

ООО «ИТЕКМА», ООО «ЦСКТ»
Технический директор



Композиционные материалы

Композиты — неоднородные сплошные материалы, состоящие из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.



Композиционные материалы



Фото: <http://www.slavutich-media.ru>



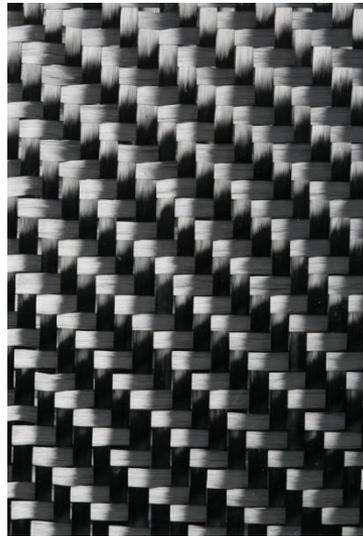
Фото: www.мастерок.жж.рф

Из чего состоят ПКМ?

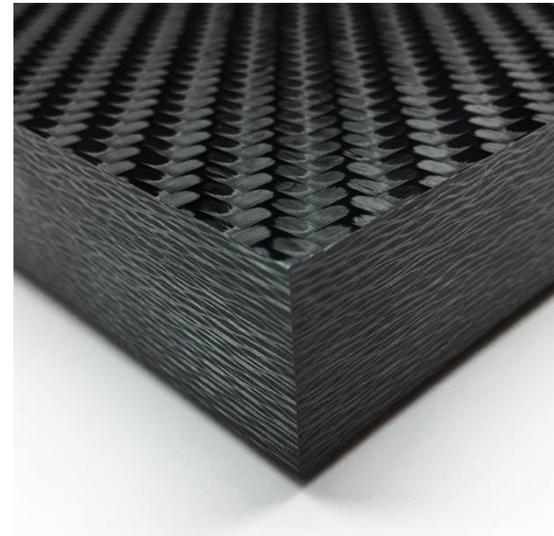
Связующее
(Матрица)



Армирующий
наполнитель

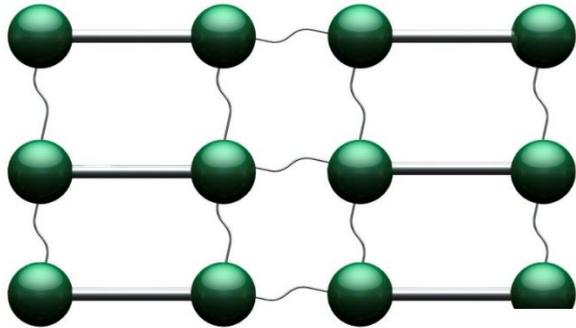


Полимерный композиционный
материал (ПКМ)



Полимерные матрицы. Реактопласты.

Вязкий или твердый



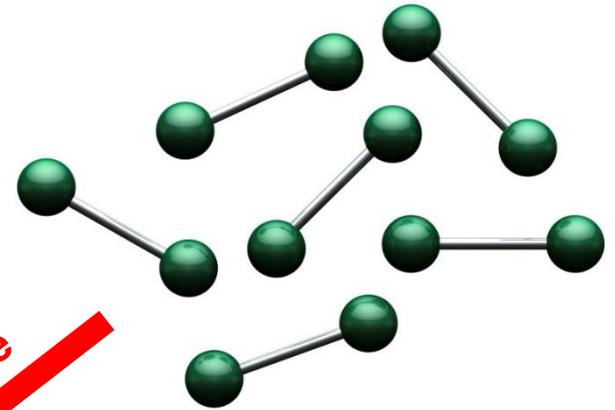
Нагрев



Охлаждение



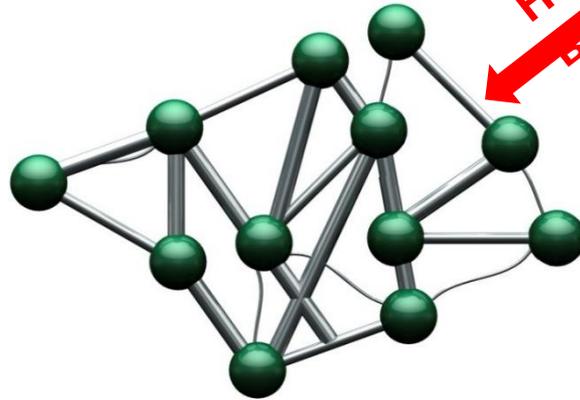
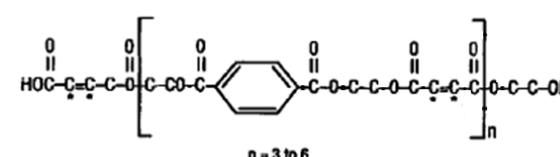
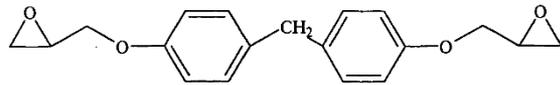
Текущий



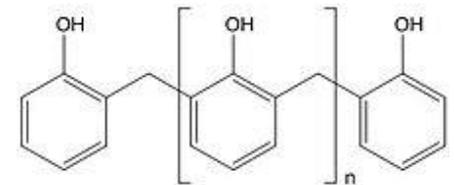
Нагрев

Нагрев

Нагрев

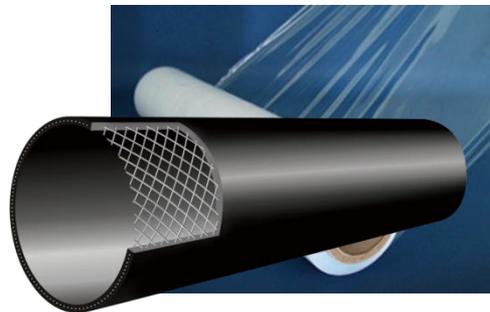


Сшитый полимер (твердый)



Полимерные матрицы.

Термопласты



Полиэтилен

ПЭТФ



ПВХ

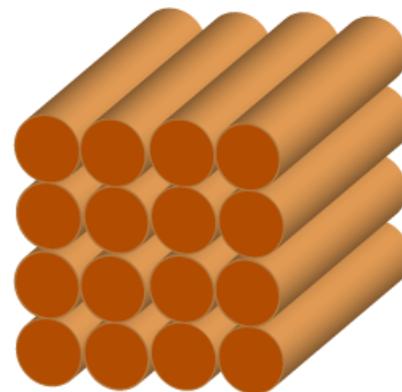
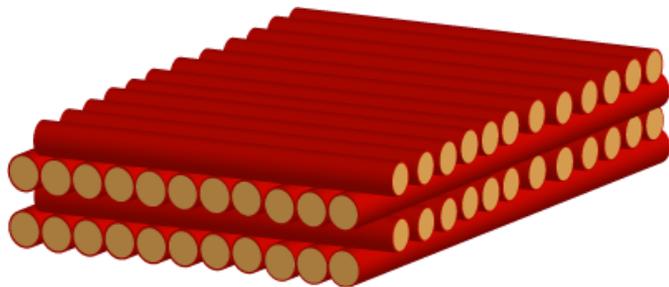
Полиуретан



Композиционные материалы

Сравнение удельной прочности (σ/ρ) и модуля упругости (E/ρ) для наиболее распространенных конструкционных материалов.

	ρ , кг/м ³	σ , МПа	E , ГПа	σ на 1 кг, КПа	E на 1 кг, МПа	увеличение прочности	увеличение жесткости
алюминиевые сплавы	2700	310	69	115	26	1,0	1,0
ПКМ квазиизотроп	1550	680	51	290	29	3,8	1,3
ПКМ UD	1550	3000	150	1935	97	16,9	3,8





**спортивное
оборудование**

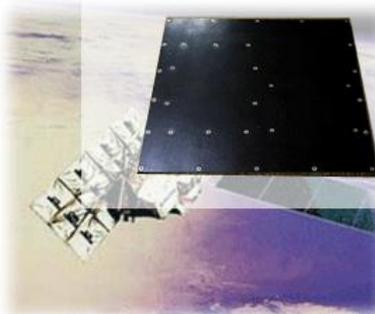
**автомобильная
промышленность**

применение углеродных волокон



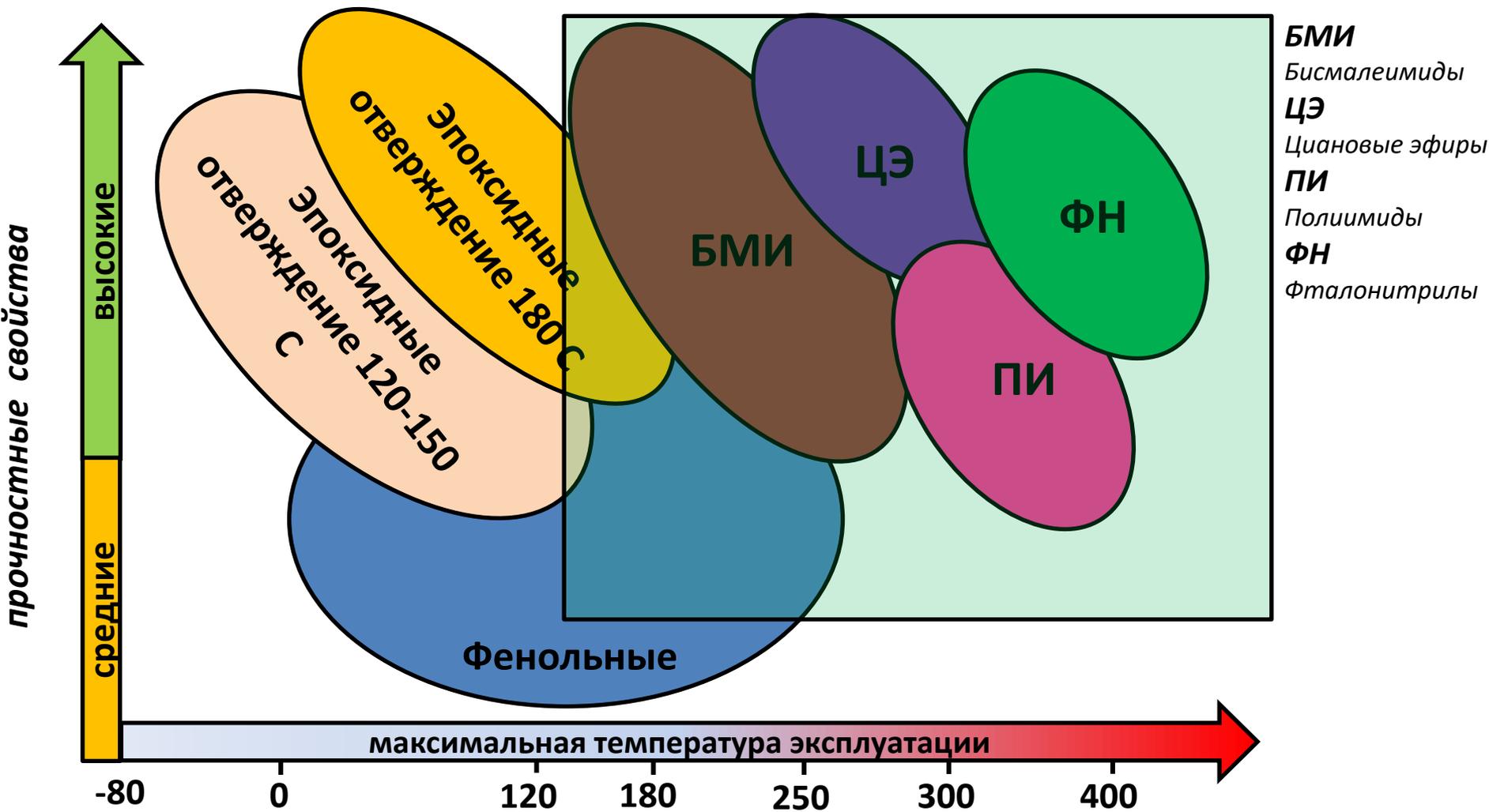
промышленность

**авиакосмическая
промышленность**



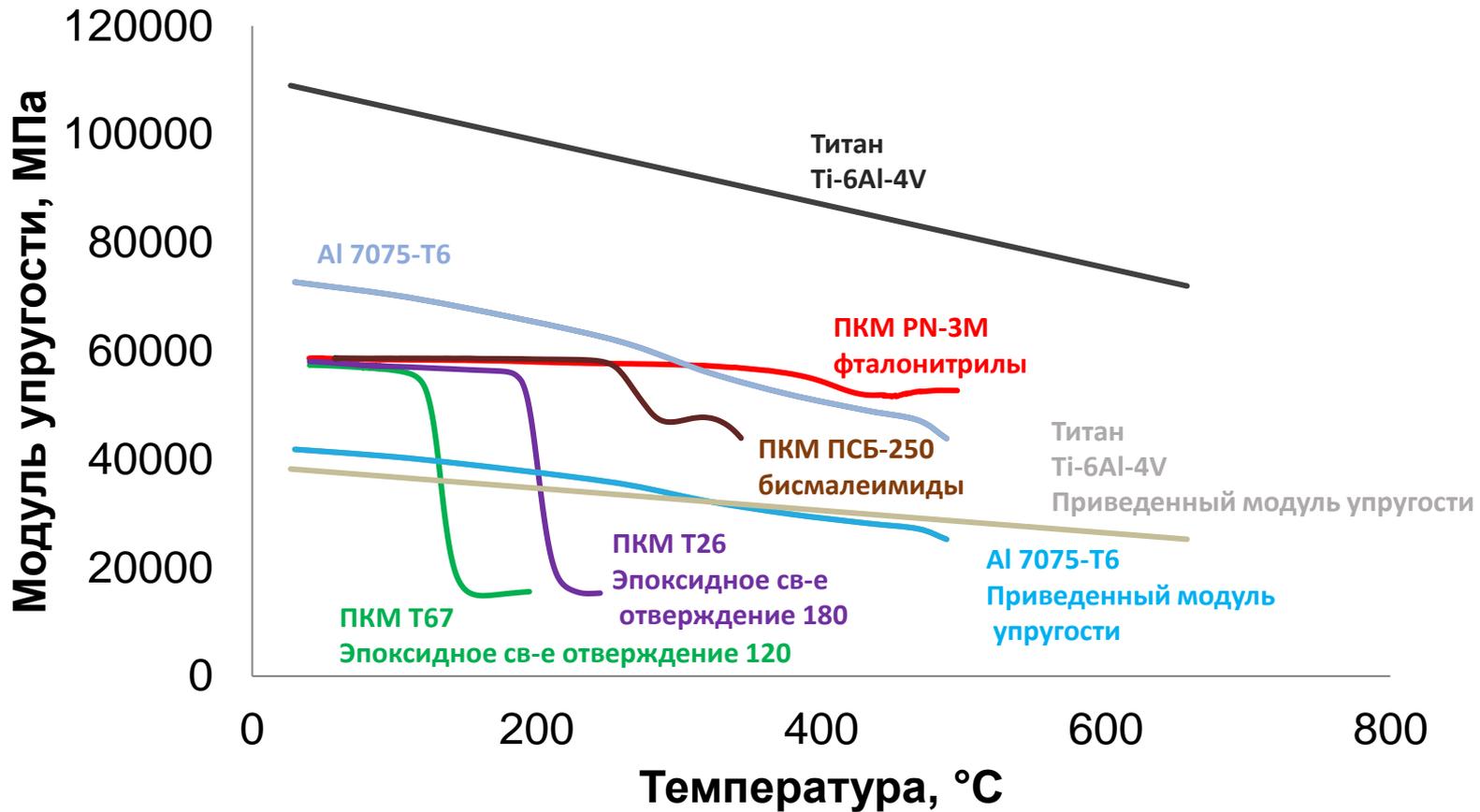
Полимерные связующие

Терморезистивные матрицы

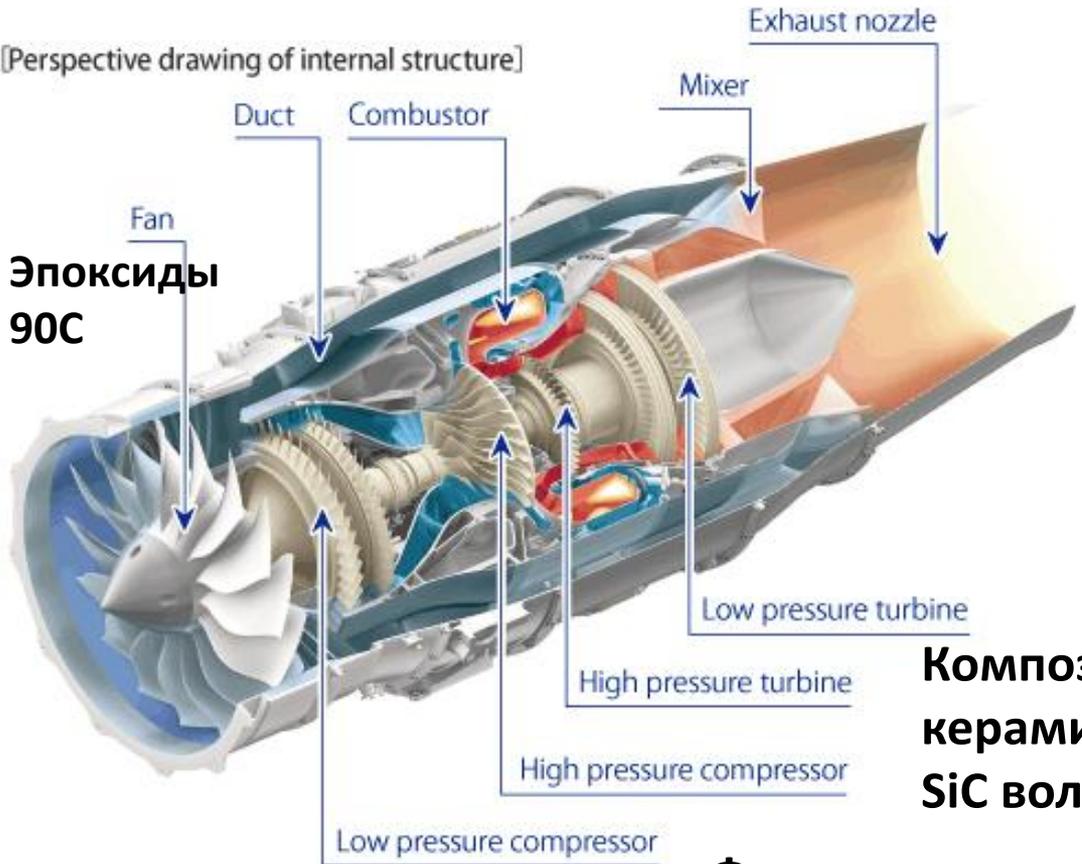


- БМИ**
Бисмалеимиды
- ЦЭ**
Циановые эфиры
- ПИ**
Полиимиды
- ФН**
Фталонитрилы

Температурные механические свойства материалов



Выбор связующего, температура эксплуатации



**Эпоксиды
90С**

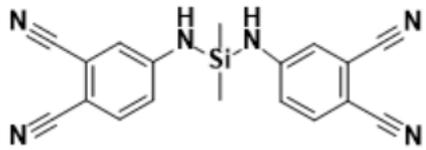
**Бисмалеимиды
200С**

**Фталонитрилы
350С**

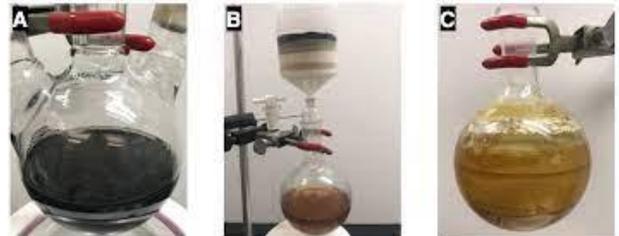
**Композиты на основе
керамической матрицы
SiC волокна 1200С**

Разработка нового материала

Идея → Синтез → Связующее



Низкоплавкий мономер
Поиск литературы
Планирование синтеза



ЯМР, ВЭЖХ, ДСК
Масштабирование в реакторе



ДСК, реология
Режим отверждения



Пластик



ДМА, ТГА
Метод постотверждения
Механические свойства 12

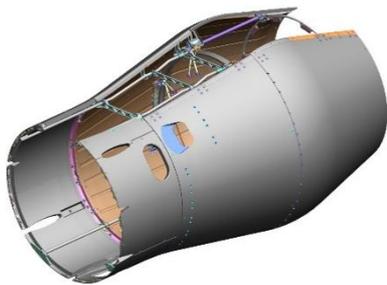
ПКМ



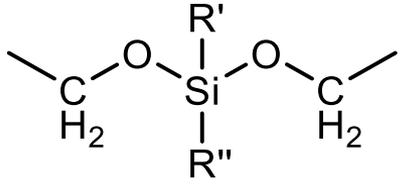
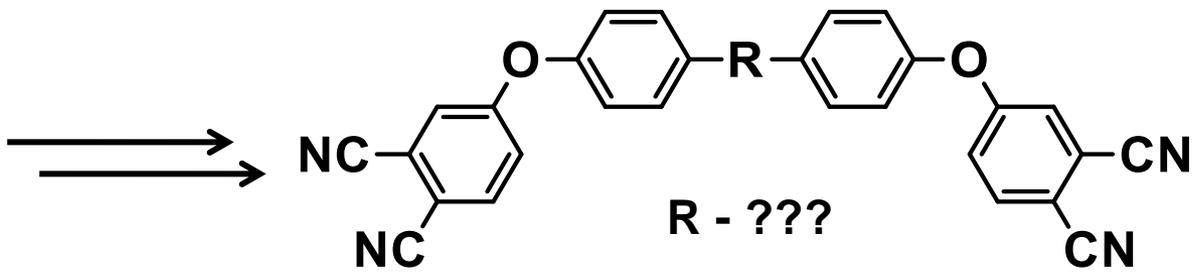
Метод формования
Механические и термические свойства
Квалификация

Результат

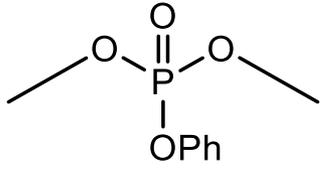
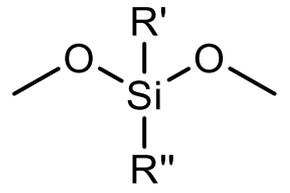
Изделие



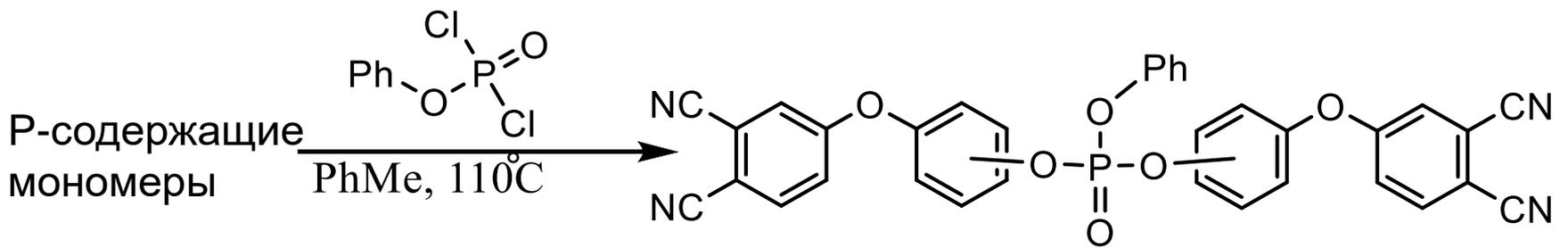
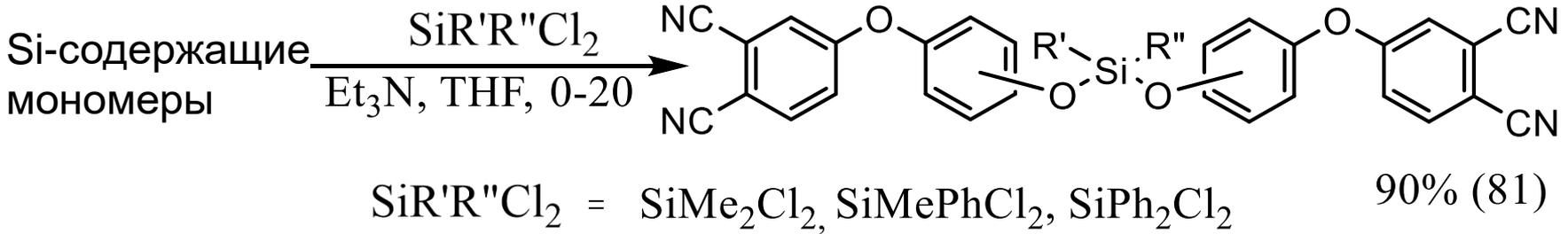
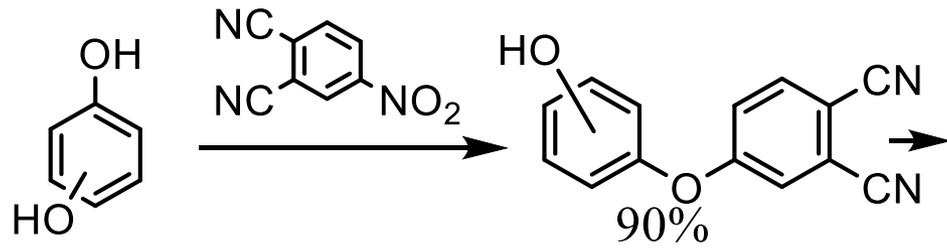
Идея нового мономера



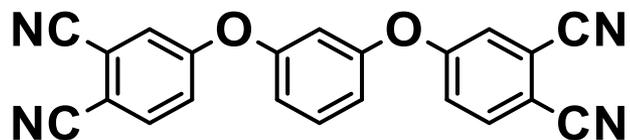
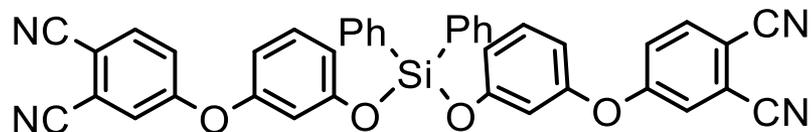
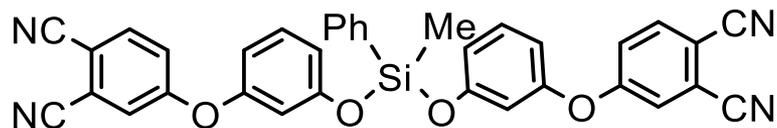
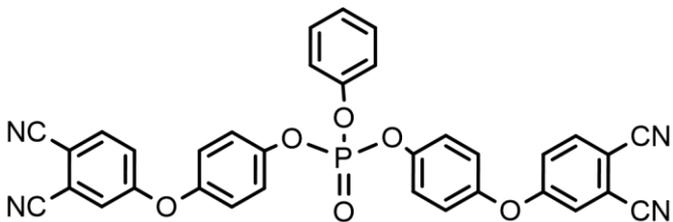
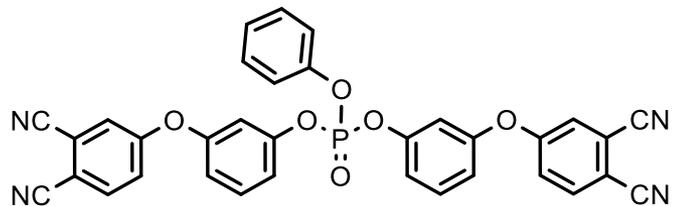
R =



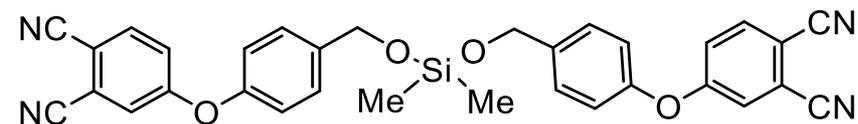
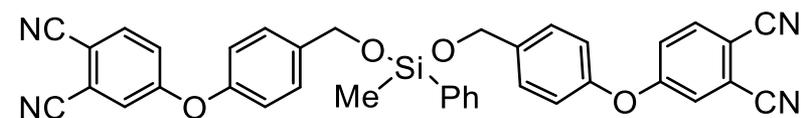
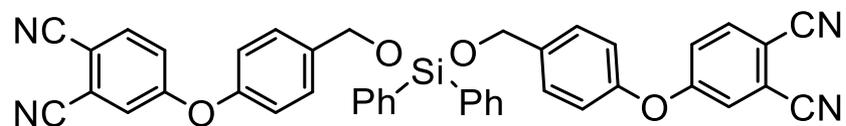
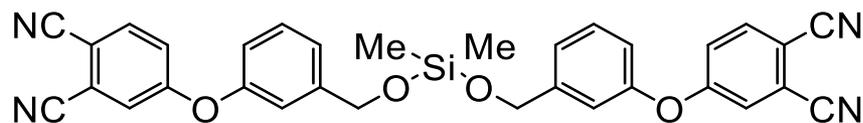
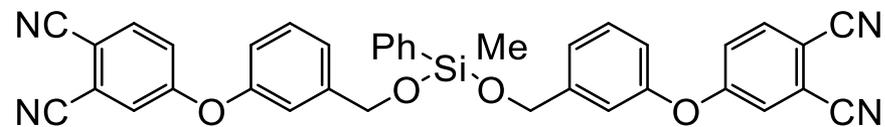
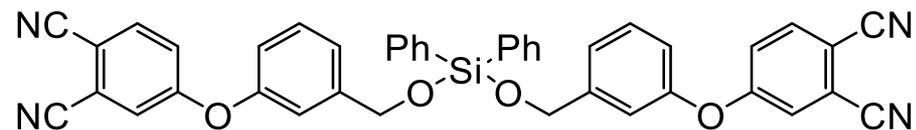
Поиск методов синтеза



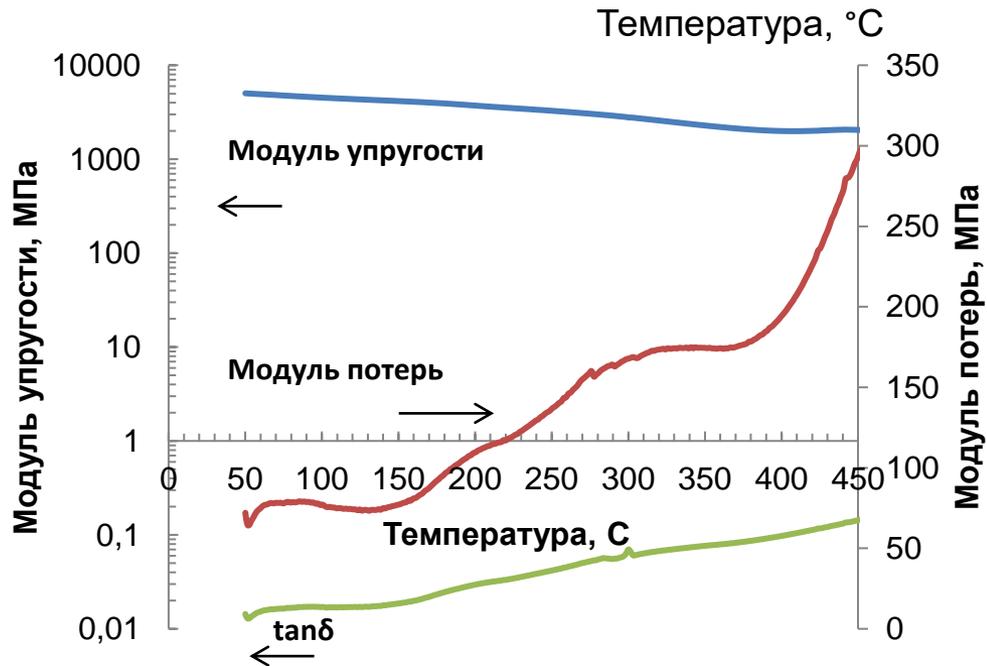
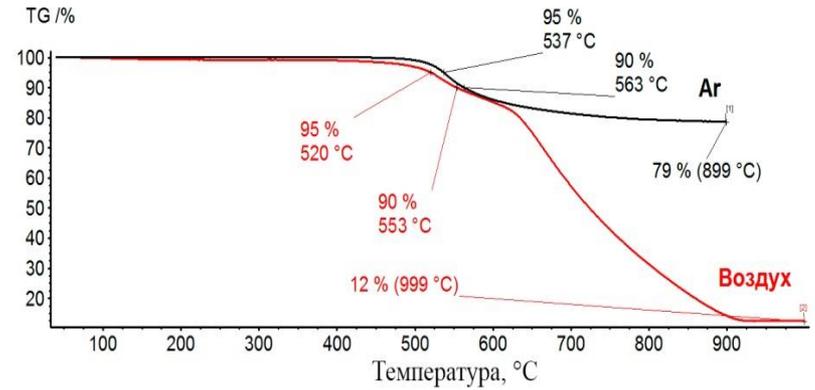
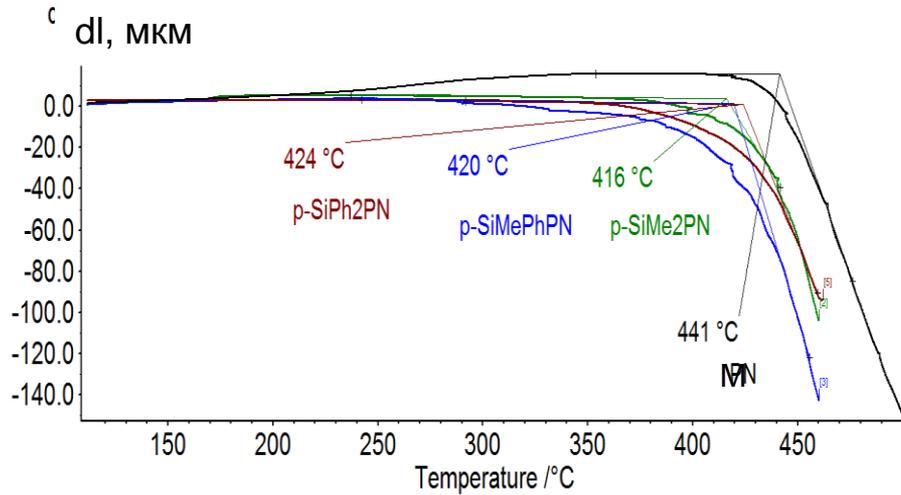
Новые мономеры



**Стандартный
мономер**



Термические характеристики



Механические свойства полимерных матриц

	1	2	3	4
Прочность при изгибе, МПа	69±9	76±20	76±18	70±10
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,6±0,2	3,2±0,2	4,45±0,2	5,7±0,2
G_{IC} , Дж/м ²	230±0,042	145±0,030	152±0,039	173±38
K_{IC} , МПа*м ^{1/2}	0,490±0,054	0,562±0,079	0,597±0,103	0,637±0,109
Теплостойкость, °С	420	425	479	460



Механические свойства ПКМ

Механические характеристики ПКМ на основе ФН и углеродных волокон

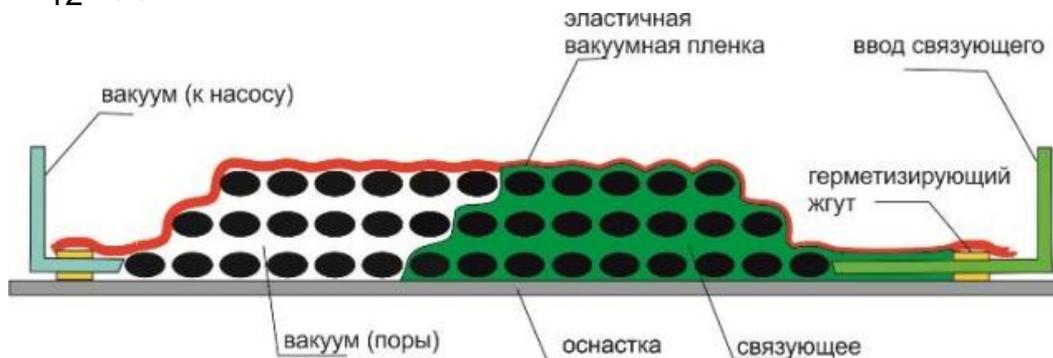
Образец	Температура	σ_{11}^+ , МПа	σ_{11}^- , МПа	τ_{13} , МПа	τ_{12} , МПа
	25°C	487±17	341±36	31±2	66±2
	300°C	535±19	315±24	30±2	65±2
	Δ , %	+9,8	-7,7	-3,3	-2,7

σ_{11}^+ растяжение вдоль направления волокон

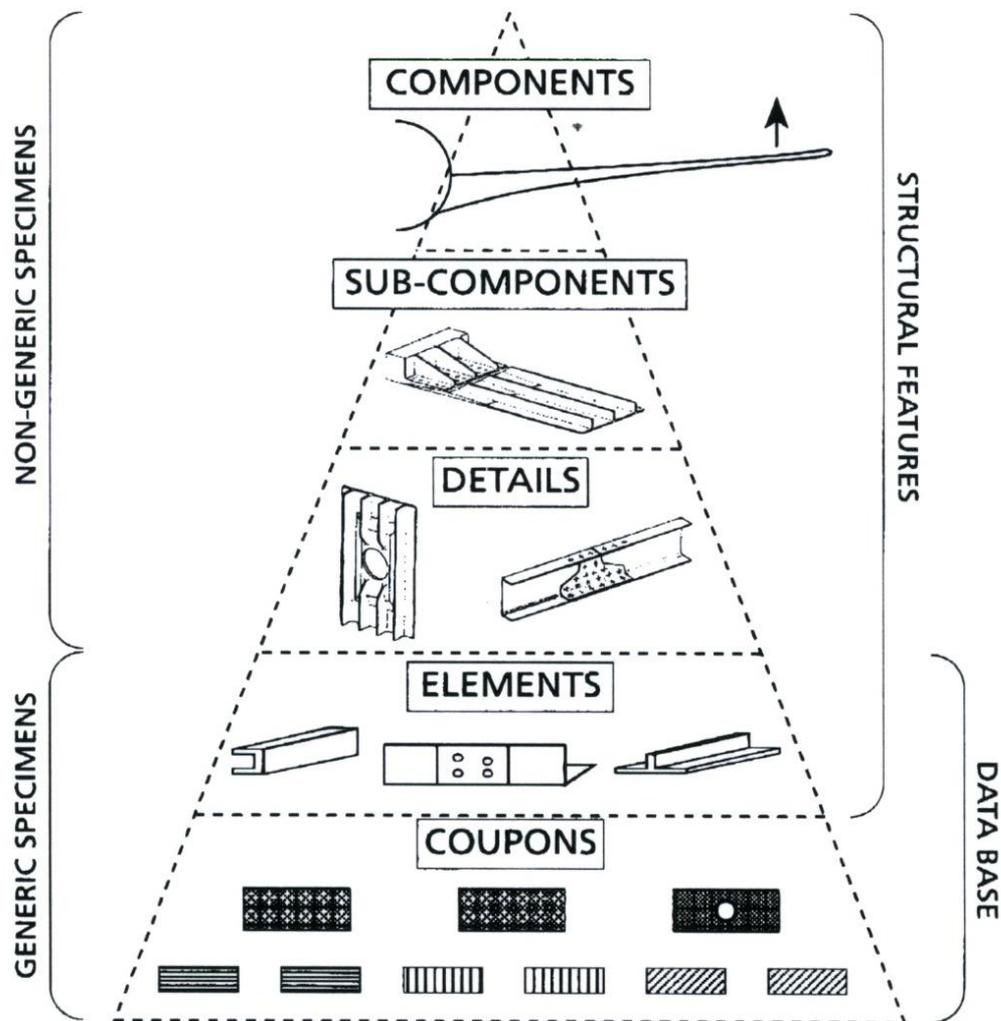
σ_{11}^- сжатие вдоль направления волокон

τ_{13} межслоевой сдвиг

τ_{12} сдвиг в плоскости листа



Пирамида испытаний



Требования к материалам

Требования к углеродным волокнам

Модуль Упругости не менее 230ГПа, лучше 290+

Предел прочности не менее 4,5 ГПа, лучше 6+

Удлинение до разрыва 1,9%+

Требования к полимерной матрице

Свойства связующего

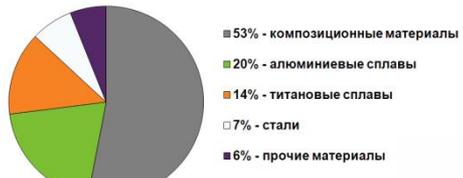
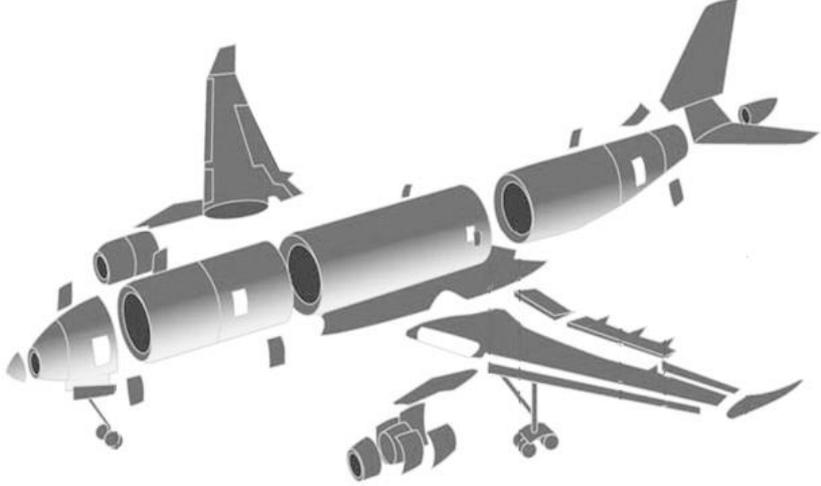
1. Технология переработки (препрег, РТМ, инфузия, намотка)
2. Прочность
3. Модуль упругости
4. Удлинение при разрыве
5. Трещиностойкость
6. Температура стеклования
7. Цена
8. Влагонасыщение
 - a) Прочность во влагонасыщенном состоянии
 - b) Модуль упругости во влагонасыщенном состоянии
 - c) Удлинение при разрыве во влагонасыщенном состоянии
 - d) Трещиностойкость во влагонасыщенном состоянии
 - e) Температура стеклования во влагонасыщенном состоянии

Применение углеродных композиционных материалов в авиастроении

Проект БОИНГ 737 DREAMLINER



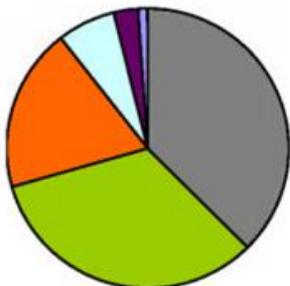
Проект АЭРОБУС А350 XWB



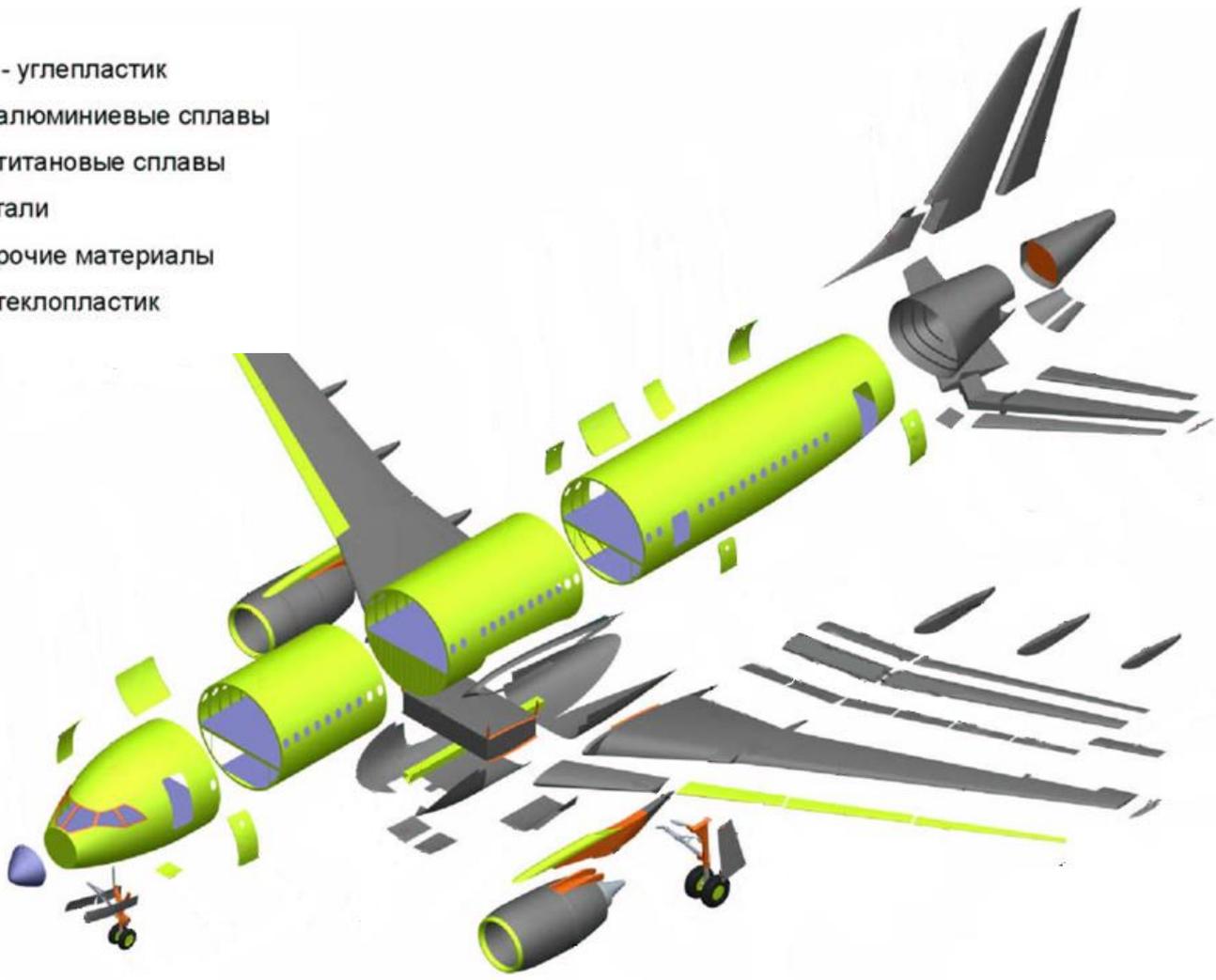
Ключевые факты

- Доля ПКМ (по массе):
 - Аэробус А380 - 22%
 - Боинг 787 - до 60%
 - Военные - 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

Планы по использованию композиционных материалов в проекте MS 21



- 37,5% - углепластик
- 33% - алюминиевые сплавы
- 19% - титановые сплавы
- 6,5 - стали
- 3% - прочие материалы
- 1% - стеклопластик



Композиты в автомобилях



BMW i8, 2014 -



BMW i3, 2013 -



Намотка волокна. Области применения

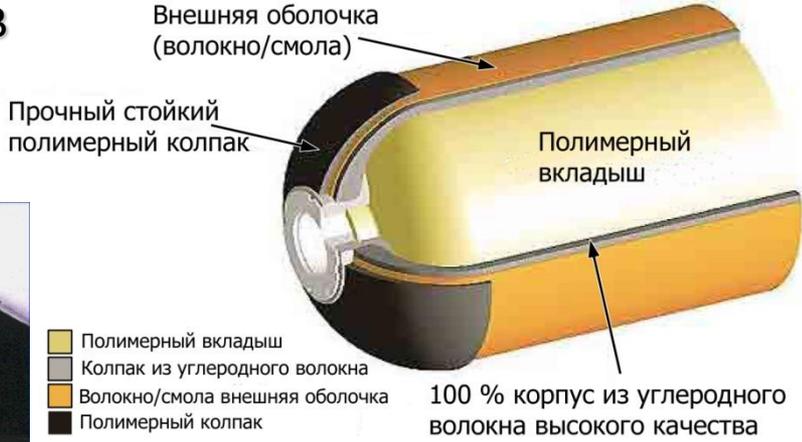
ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ ГАЗОВ



Автономный дыхательный аппарат со сжатым воздухом – **2 кг** УВ



Баллон со сжатым природным газом – **10-20 кг** УВ



Баллон с водородом – **20 кг** УВ

Применение в ветроэнергетике







«В разработке и производстве композитов для MC-21 принимают участие ведущие химики и технологи России. В их числе - ученые и специалисты МГУ и предприятий Росатома»



«Лидер импортозамещения»

ИТЕКМА - Д. Мантуров, министр промышленности и торговли РФ

СИСТЕМА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ для

производства КОМПОЗИТОВ для особо требовательных отраслей, в том числе для авиации и космоса

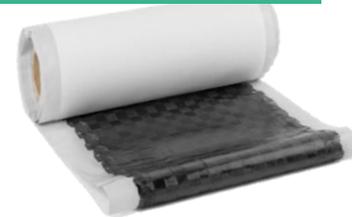
Связующие



Углеродные ткани



Препреги



Клеи

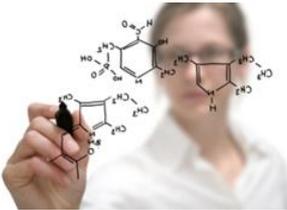
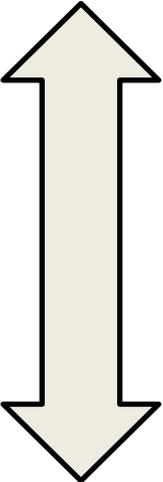
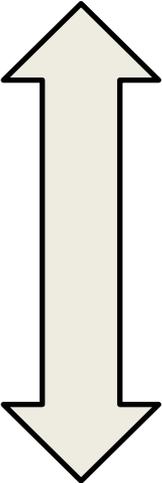


Совместная работа – залог успеха создания уникальных изделий из композиционных материалов

Конструкторы

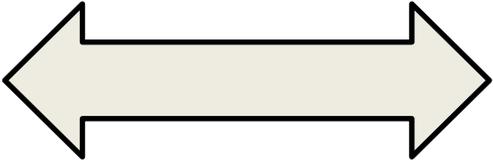


Прочнисты



**Материаловеды
(Химики)**

Технологи



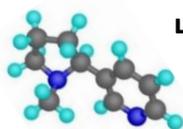
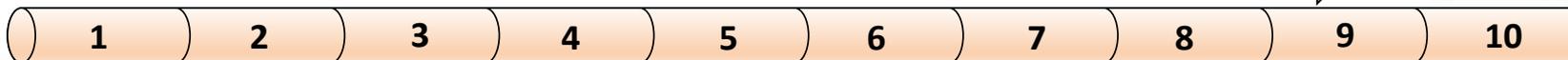
Сопоставление циклов разработки принципиально новых материалов и новой авиационной техники

начало проекта

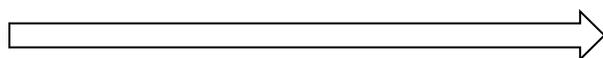


цикл создания новой гражданской авиационной техники составляет порядка 10 лет

начало серийного производства



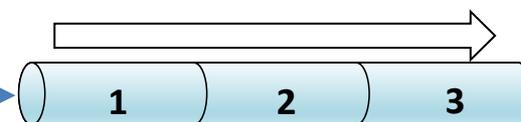
цикл разработки нового материала с нуля до опытного производства 6-8 лет



Состояние разработки в котором конструктора могут рассматривать материал для применения в новом проекте

цикл разработки принципиально нового материала сравним с циклом создания новой авиационной техники и составляет порядка 10 лет

Квалификация (испытания) материала, технологическая отработка, организация серийного производства 2-3 года



Разработка принципиально новых материалов должна вестись параллельно или опережая возможный старт новых будущих программ без привязки к срокам реализации текущих авиационных проектов, но в тесном взаимодействии с авиастроителями.

Схема изготовления композитных изделий на основе фталонитрильных полимерных матриц армирующий наполнитель

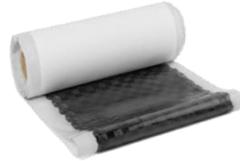
Выкладка на оснастку



связующее



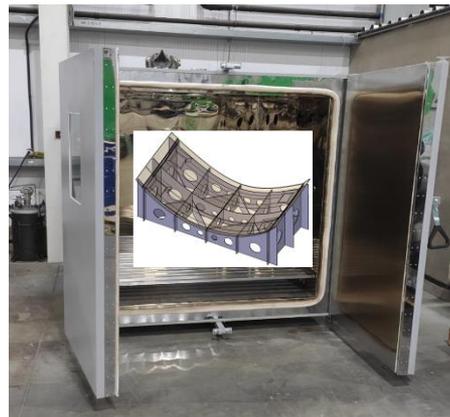
препрег



Композитная деталь
двигателя



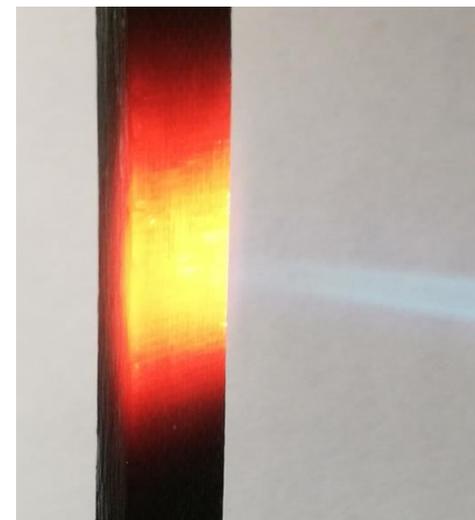
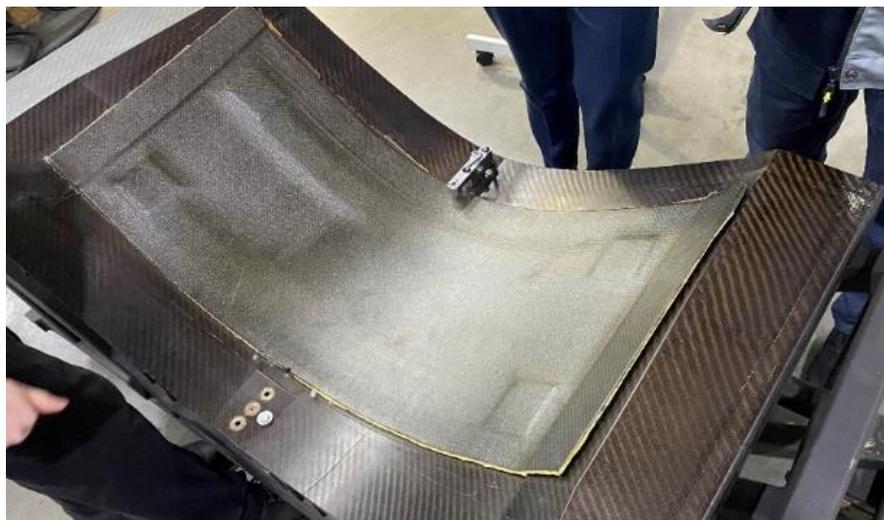
Постотверждение в печи
300-350 °С



Отверждение в автоклаве
при 180 °С



Изделия на основе ФН матрицы



Оборудование для изготовления ПКМ



Структура стоимости углепластиковых изделий для авиации

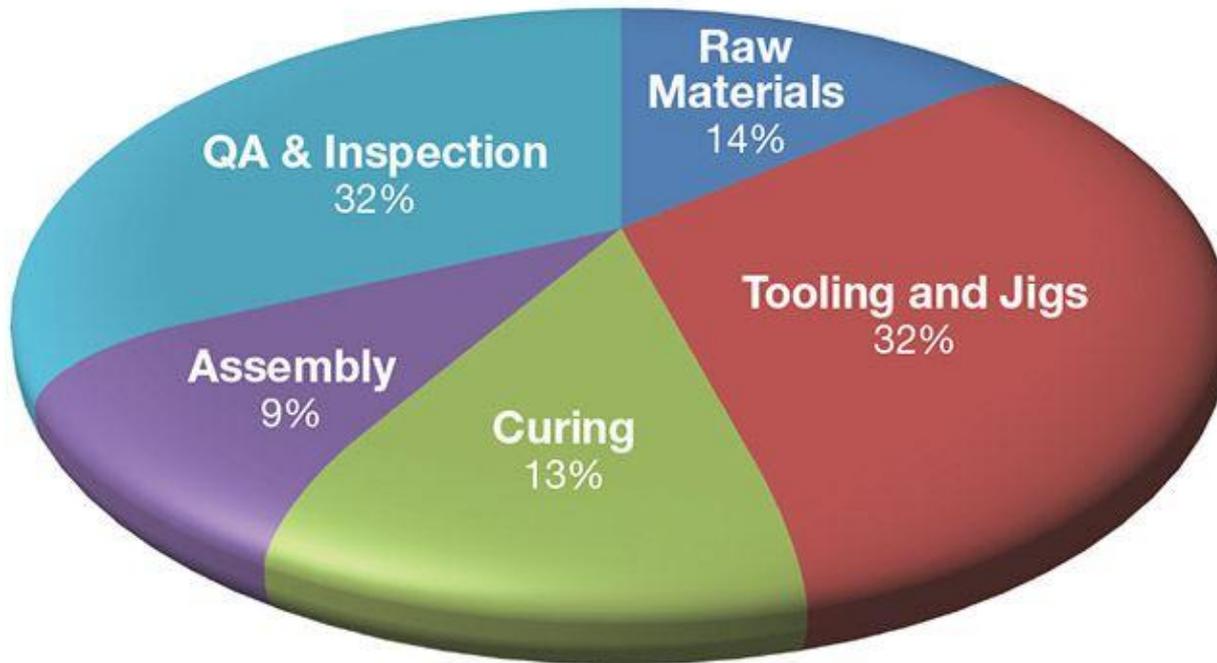


Figure 5

Source: CFC (Jan 2014)

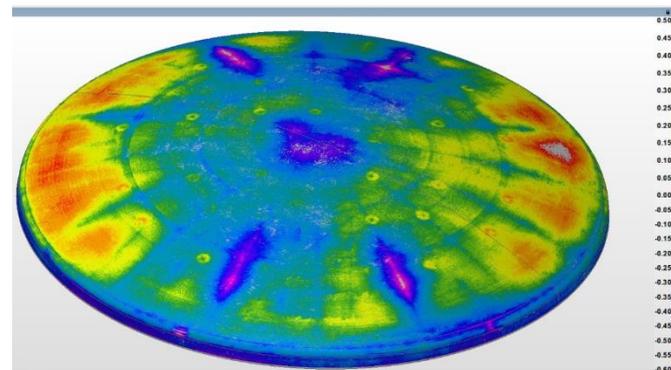
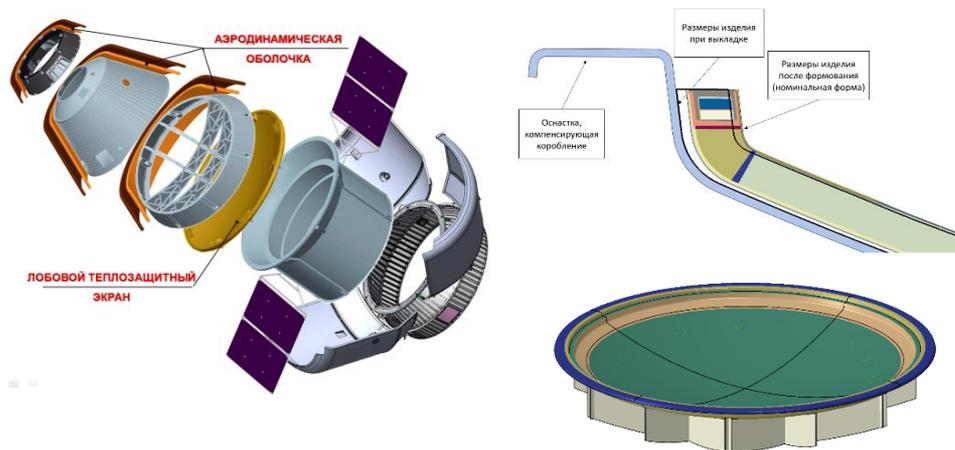
The cost breakdown for CFRP aerostructures.

Примеры реализованных проектов

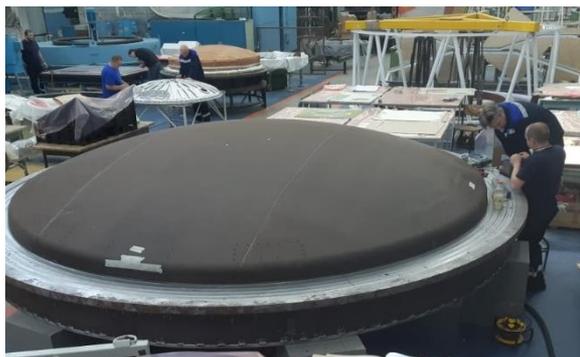


Примеры реализованных проектов

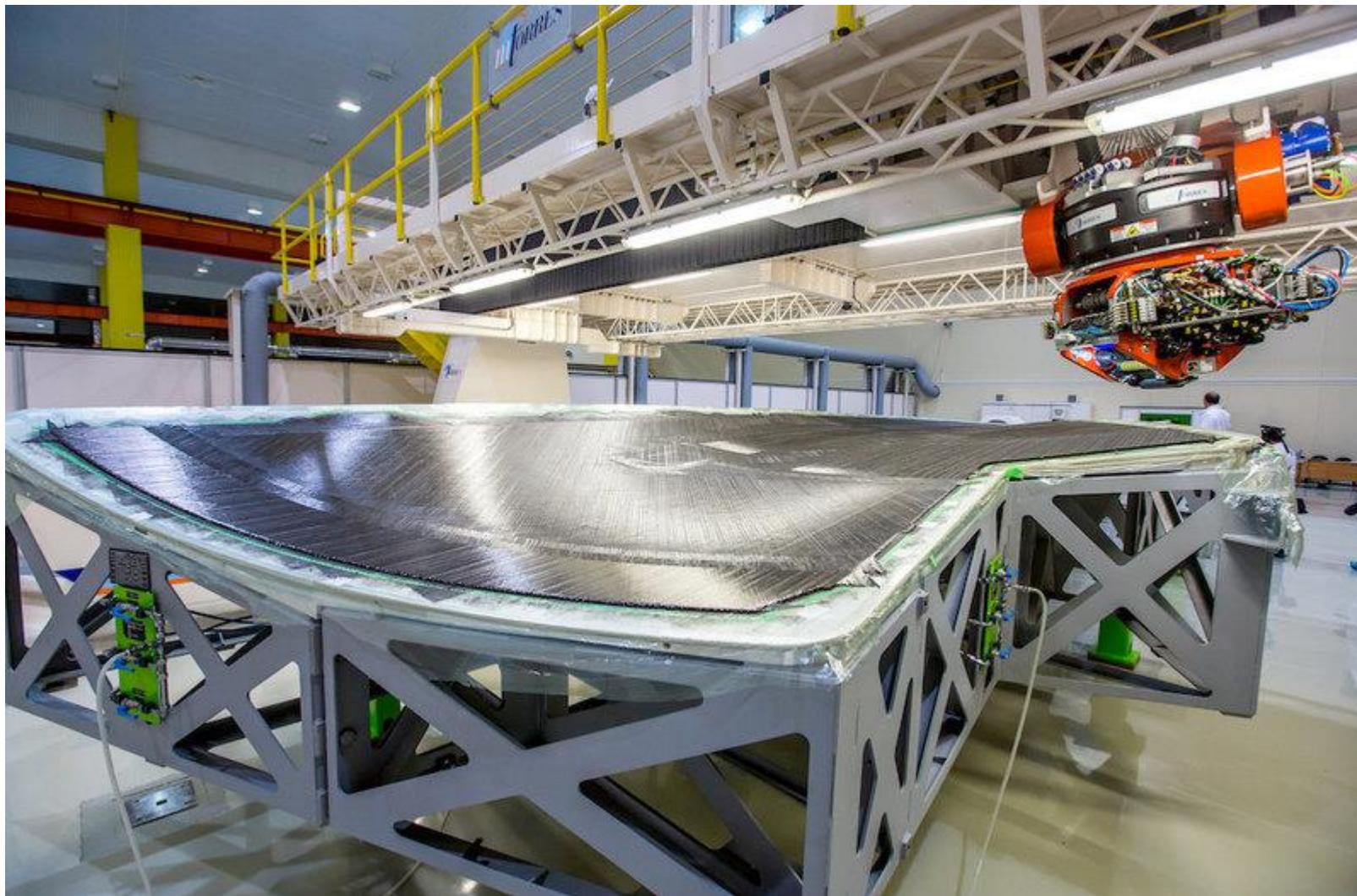
Комплекс материалов для пилотируемого транспортного корабля нового поколения



ЛОБОВОЙ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН



Используется комплекс высокотемпературных композиционных материалов с температурой эксплуатации до 250 °С



Примеры изделий



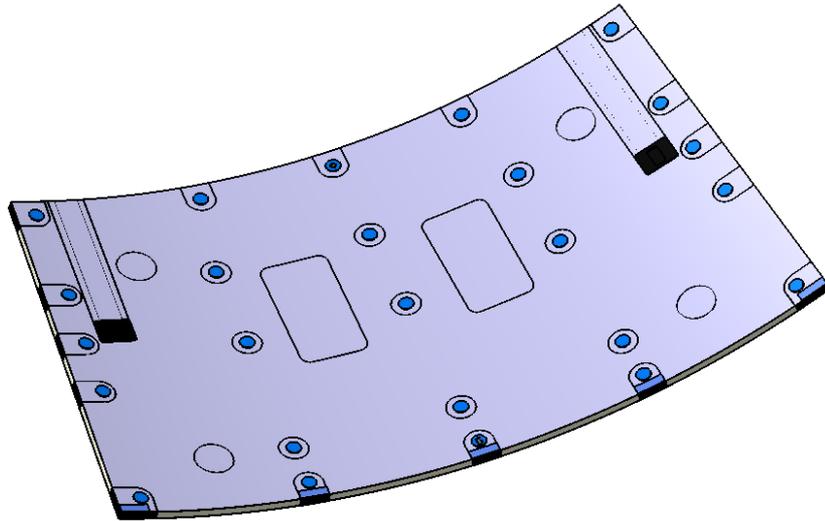
Панели пола и багажного отделения



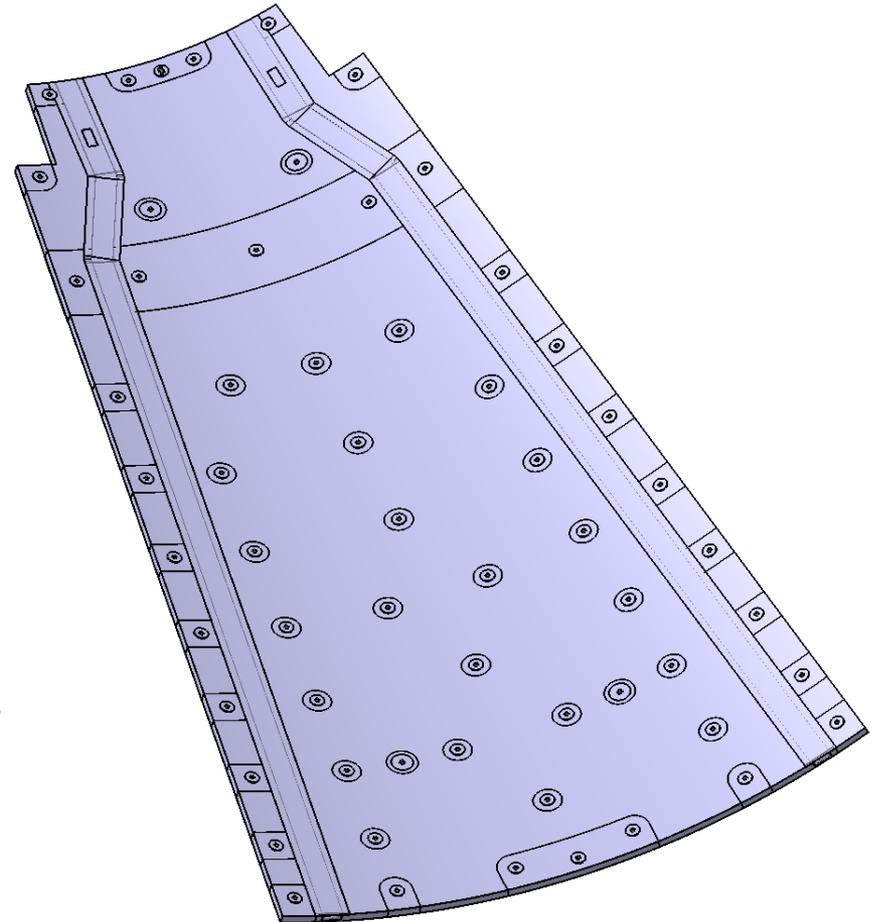
РКК Энергия – проект ПТК НП



Изготовление секций аэродинамической оболочки (АДО) космического корабля «Орел»

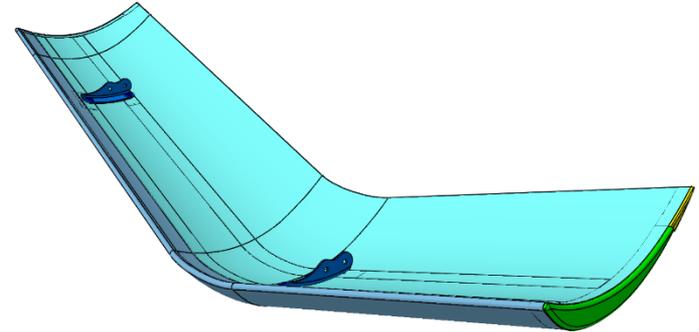


Секция АДО агрегатного отсека (АО)



Секция АДО командного отсека (КО)

Предкрылок вертолета Ка-226Т



Комплекс выполненных работ:

- Разработка конструкции предкрылка
- Испытание материалов и проведение прочностных расчетов
- Проектирование и изготовление оснастки
- Изготовление опытных агрегатов

Особенности:

- В конструкции предкрылка применены высокотемпературные композиционные материалы для защиты агрегата от потока горячих выхлопных газов
- Проведен частотный анализ конструкции для устранения возможных резонансных колебаний

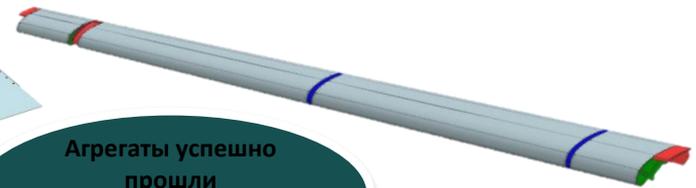
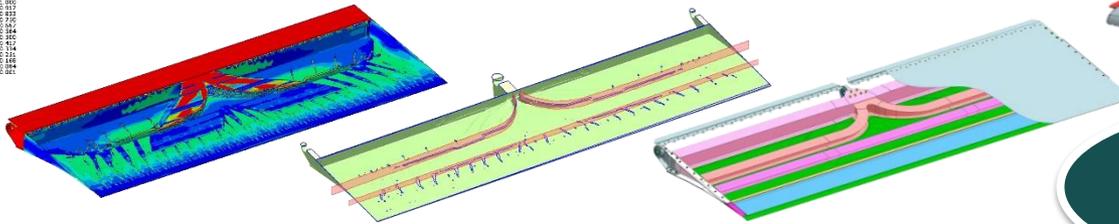


Примеры реализованных проектов

Тормозные щитки и дефлектор закрылка самолета Ил-114-300



MAT_PROP_NORMALIZED
[Unit: 10^4]
C 1015
C 1010
C 1005
C 1000
C 995
C 990
C 985
C 980
C 975
C 970
C 965
C 960
C 955
C 950
C 945
C 940
C 935
C 930
C 925
C 920
C 915
C 910
C 905
C 900
C 895
C 890
C 885
C 880
C 875
C 870
C 865
C 860
C 855
C 850
C 845
C 840
C 835
C 830
C 825
C 820
C 815
C 810
C 805
C 800
C 795
C 790
C 785
C 780
C 775
C 770
C 765
C 760
C 755
C 750
C 745
C 740
C 735
C 730
C 725
C 720
C 715
C 710
C 705
C 700
C 695
C 690
C 685
C 680
C 675
C 670
C 665
C 660
C 655
C 650
C 645
C 640
C 635
C 630
C 625
C 620
C 615
C 610
C 605
C 600
C 595
C 590
C 585
C 580
C 575
C 570
C 565
C 560
C 555
C 550
C 545
C 540
C 535
C 530
C 525
C 520
C 515
C 510
C 505
C 500
C 495
C 490
C 485
C 480
C 475
C 470
C 465
C 460
C 455
C 450
C 445
C 440
C 435
C 430
C 425
C 420
C 415
C 410
C 405
C 400
C 395
C 390
C 385
C 380
C 375
C 370
C 365
C 360
C 355
C 350
C 345
C 340
C 335
C 330
C 325
C 320
C 315
C 310
C 305
C 300
C 295
C 290
C 285
C 280
C 275
C 270
C 265
C 260
C 255
C 250
C 245
C 240
C 235
C 230
C 225
C 220
C 215
C 210
C 205
C 200
C 195
C 190
C 185
C 180
C 175
C 170
C 165
C 160
C 155
C 150
C 145
C 140
C 135
C 130
C 125
C 120
C 115
C 110
C 105
C 100
C 95
C 90
C 85
C 80
C 75
C 70
C 65
C 60
C 55
C 50
C 45
C 40
C 35
C 30
C 25
C 20
C 15
C 10
C 5
C 0



Агрегаты успешно
прошли
прочностные
испытания

Комплекс выполненных работ:

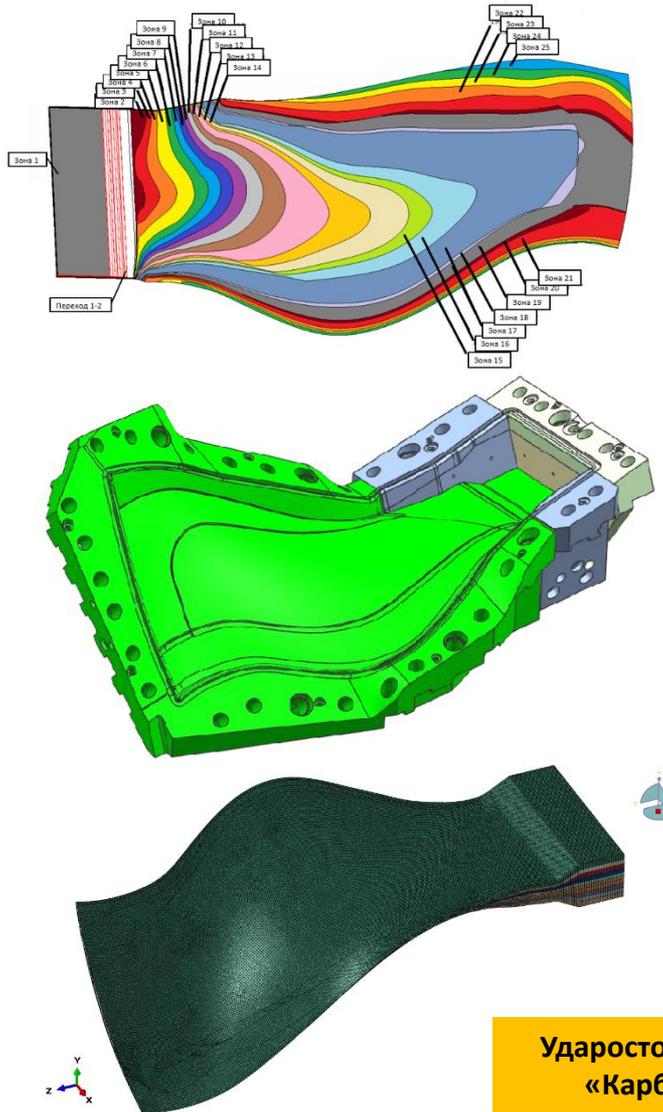
- Разработка конструкции агрегатов
- Испытание материалов и проведение прочностных расчетов
- Проектирование и изготовление оснастки
- Проектирование испытательных стендов

Особенности:

- Использована топологическая оптимизация для нахождения оптимальной конфигурации внутреннего силового набора. Результат – увеличенная жесткость и прочность
- Использование подхода интегральной многостеночной конструкции. Результат – снижение трудоемкости изготовления



Моделирование промежуточных подпрессовок, остаточных напряжений и коробления рабочей лопасти вентилятора



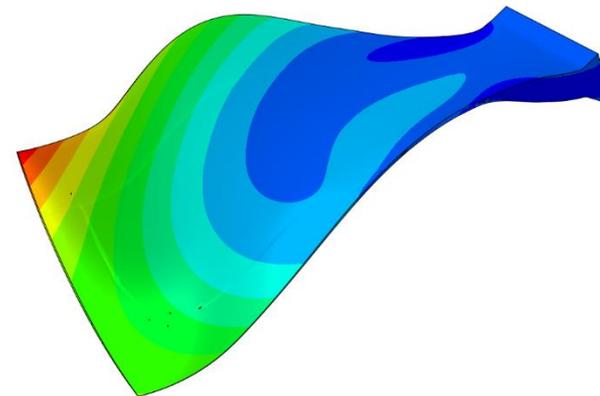
Комплекс выполненных работ:

- Проведено численное моделирование полного цикла производства композитной рабочей лопасти вентилятора.
- Путем моделирования определен оптимальный температурный режим промежуточных подпрессовок слоев препрега.
- Определены остаточные напряжения в материале, возникающие в процессе отверждения и охлаждения изделия; выявлены потенциальные зоны зарождения дефектов.
- Рассчитано коробление изделия.

Особенности:

- Около 400 слоев в корневой части заготовки.

Ударостойкий препрег
«Карболон 225»



Спасибо за внимание