

НАЦИОНАЛЬНЫЕ
ПРОЕКТЫ
РОССИИ



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



НЦМУ
ПЕРЕДОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



ПОЛИТЕХ
Центр национальной
технологической инициативы
Новые производственные технологии

CML
CompMechLab
ЦЕНТР
КОМПЬЮТЕРНОГО
ИНЖИНИРИНГА СПбПУ

**Научно-промышленного форум «Техническое
переворужение
машиностроительных предприятий России»**

**Секция «Наука-производству. Композитные и
полимерные материалы»**

18 октября 2022 года, Екатеринбург



Перспективы применения термопластичных полимерных композиционных материалов в ключевых отраслях промышленности

Кобышно Илья Александрович

**младший научный сотрудник лаборатории
«Моделирование технологических процессов и проектирование энергетического оборудования»
Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии»**

Достоинства и недостатки термопластичных полимерных композиционных материалов (ТПКМ)

Достоинства ТПКМ

- Безавтоклавное формование
- Широкий интервал температур эксплуатации (от -195 до +230 °C)
- Высокая скорость переработки (*изготовления изделия из препрега*)
- Широкий выбор полимеров (*по соотношению цена/качество*)
- Повышенная устойчивость к ударным нагрузкам
- Свариваемость (*резистивная, индукционная, лазерная сварка*)
- Повышенные демпфирующие свойства

Недостатки ТПКМ

- Высокая стоимость (≈ 600 €/кг)
- Сложность технологий переработки (*изготовления изделия из препрега*)
- Необходимость специализированного оборудования для переработки (*изготовления изделия из препрега*)
- Низкая доступность материала на российском рынке

Типы термопластичных полимеров:

Стандартные термопласты

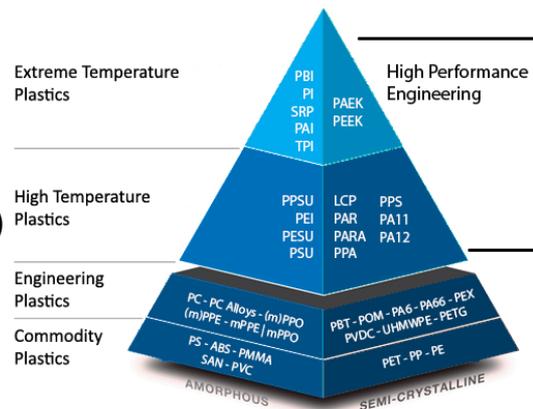
(температурный диапазон < 100 °C)

Конструкционные термопласты

(температурный диапазон 100-150 °C)

Суперинженерные термопласты

(температурный диапазон < 150 °C)



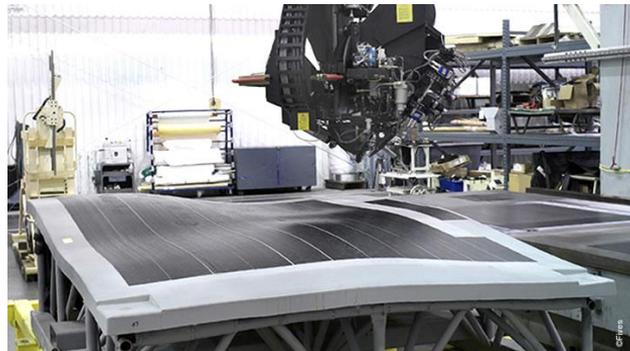
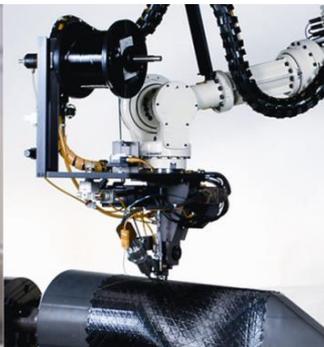
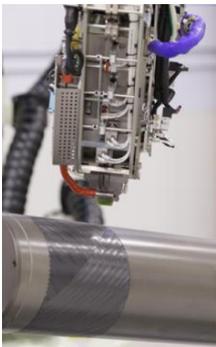
Материалы и технологии переработки

Формы выпуска материалов

- Однонаправленные ленты (UD Tape)
- Консолидированные ламинаты
- Тканые препреги

Технологии переработки в изделие

- Роботизированная выкладка (Advanced fiber placement (AFP) and Automated tape laying (ATL))
- Горячее прессование (штамповка)
- Вакуумная консолидация
- Производственные линии, включающие несколько операций (DIEFFENBACHER Tailored Blank Line)



FIBERFORGE



FIBERCON

Технологии переработки материала

- **Automated Dynamics (США)** – системы роботизированной выкладки с нагревом газовой горелкой и лазером и интеграции молниезащиты в процессе роботизированной выкладки
- **Coriolis Composites (Франция)** – системы роботизированной выкладки с нагревом лазером, система автоматизированного проектирования CAD-CAM-CAE
- **MIKROSAM (Македония)** – системы роботизированной выкладки с нагревом лазером
- **Dieffenbacher (Германия)** – линия производства, включающая порталный станок для выкладки, вакуумную консолидацию и горячую штамповку
- **KVE Composites Group (Нидерланды)** – системы индукционной и контактной сварки
- **STELIA Aerospace (Франция)** – системы индукционной сварки ТПКМ и интеграции молниезащиты в процессе роботизированной выкладки



Демонстратор фюзеляжа со стрингерами **STELIA Aerospace**



Полноразмерный демонстратор фюзеляжа вертолета **Automated Dynamics**

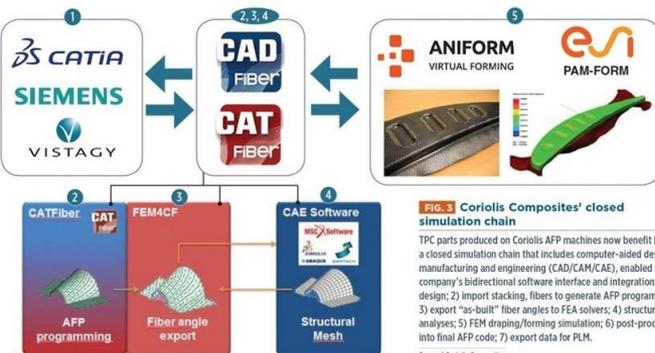


Fig. 3 Coriolis Composites' closed simulation chain

TPC parts produced on Coriolis AFP machines now benefit from a closed simulation chain that includes computer-aided design, manufacturing and engineering (CAD/CAM/CAE), enabled by the company's bidirectional software interface and integration: 1) design; 2) import stacking, fibers to generate AFP programming; 3) export "as-built" fiber angles to FEA solvers; 4) structural analyses; 5) FEM draping/forming simulation; 6) post-processor into final AFP code; 7) export data for PLM.

Source | Coriolis Composites

Замкнутая цепочка моделирования **Coriolis Composites**

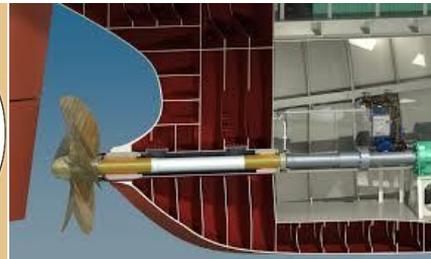
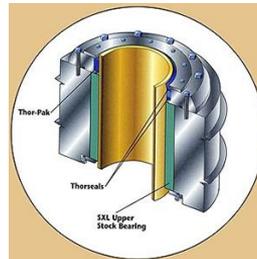
Области применения ТПКМ

- **Авиационное** – обшивка и реверсные створки ТРДД, консоль крыла, центроплан, обшивка фюзеляжа, хвостовое оперение
- **Ракетно-космическая промышленность** – топливные баки и корпуса РН, размеростабильные конструкции спутниковых систем
- **Энергетика** – баки для хранения сжатых и сжиженных газов, в том числе водорода
- **Тяжелое машиностроение и судостроение** – высоконагруженные подшипники скольжения



Ключевые требования промышленности:

- **Снижение стоимости производства** – снижение отходности и трудоемкости, экологическая и производственная безопасность
- **Технологичность** – использование различных процессов переработки для одного типа препрега
- **Длительный срок эксплуатации изделия** – устойчивость к внешним воздействиям: температура, радиация, агрессивные среды



Разработка композиционных однонаправленных термопластичных лент на основе ПЭЭК и углеволокна и изготовление конструкций из них

Фотографии образцов

Углеволокно – АО «Юматекс», Тоха, КНР
ПЭЭК – УЗИЦ «Эльбрус» (КБГУ, г. Нальчик),
АО «Институт пластмасс» (Ростех, г. Москва)



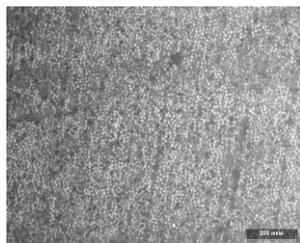
Пластина



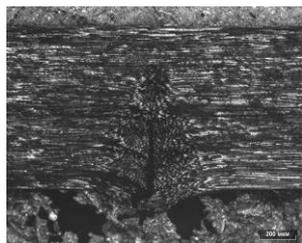
Полусфера



Труба

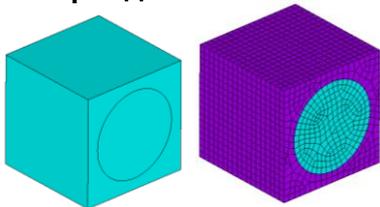


Микроструктура



После испытания на изгиб

Геометрическая и конечно-элементная модель ячейки периодичности



Углеродное волокно:
 $d=7$ мкм, $E=230$ ГПа, $\rho=1790$ кг/м³, $\nu=0.2$

Полимер - РЕЕК:
 $E=3600$ МПа, $\rho=1,32$ г/см³=1320 кг/м³, $\nu=0.39$.

Сравнение материала с зарубежными аналогами

Свойство	СПбПУ UDТТ РЕЕК-UMT45	СПбПУ UDТТ РЕЕК-SYT49	Tenax®-E TPUD РЕЕК-HTS45	Solvay® APC-2 UD Tape	Алюминиевые сплавы
Полимер	ПЭЭК	ПЭЭК	ПЭЭК	ПЭЭК	
Плотность, г/см ³	1,59	1,59	1,59	1,59	> 2,5
Содержание волокна, об. %	59	59	59	59	
0° Модуль упругости, МПа	130	135	138	138	< 80
0° Предел прочности, ГПа	2050	2250	2300	2070	< 700

Установка Центра НТИ по получению однонаправленной ленты

Центром НТИ СПбПУ разработано:

- Отечественная технология получения однонаправленных лент из углеродных волокон и термопластичных полимеров.
- Опытная установка, обеспечивающая непрерывное, автоматизированное производство ленты, с **производительностью до 10 кг/мес**
- На установке получены: экспериментальные образцы материалов PA, PPS, PEEK

К концу 2022 будет запущена полупромышленная установка с **производительностью до 100 кг/мес**

Установка позволит производить опытные партии препрегов с заданными техническими характеристиками на основе различных полимеров волокон

Схема опытной установки для получения лент

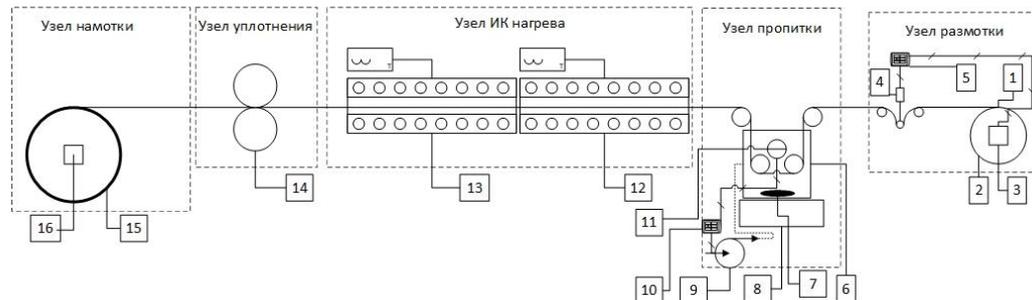


Фото оборудования (опытная установка для пропитки и горячей пресс)



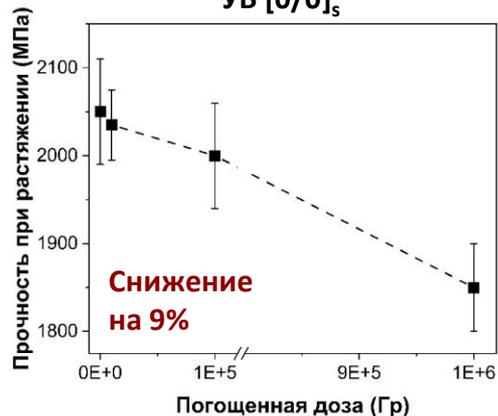
Влияние γ -радиации на прочностные свойства ТПКМ

Эксплуатация материалов в составе спутников на геосинхронных и высокоэллиптических орбитах требует от них устойчивости к γ -радиации. Для исследования была выбрана максимальная поглощённая доза излучения 10^6 Гр, которая соответствует наработке в 20 лет.

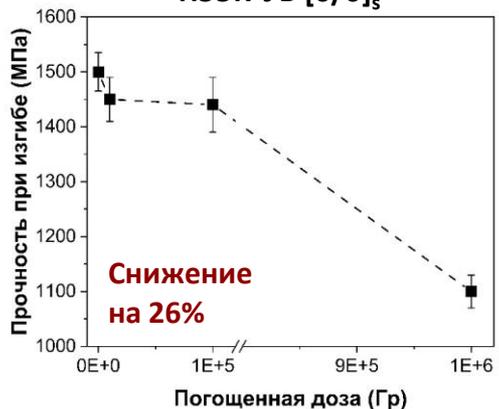
Исследования проводились на образцах:

- Композиционного материала с матрицей из полиэфирэфиркетона
- Чистого полиэфирэфиркетона

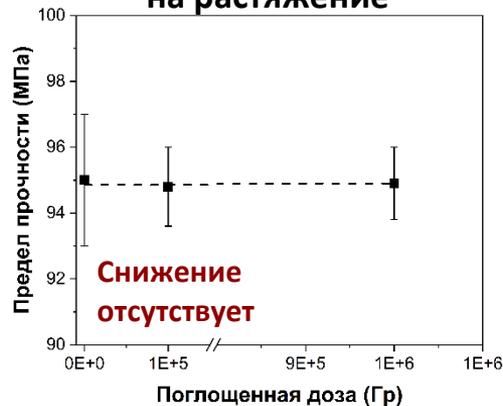
Результаты испытания
ТПКМ на растяжение ПЭЭК-
УВ [0/0]_s



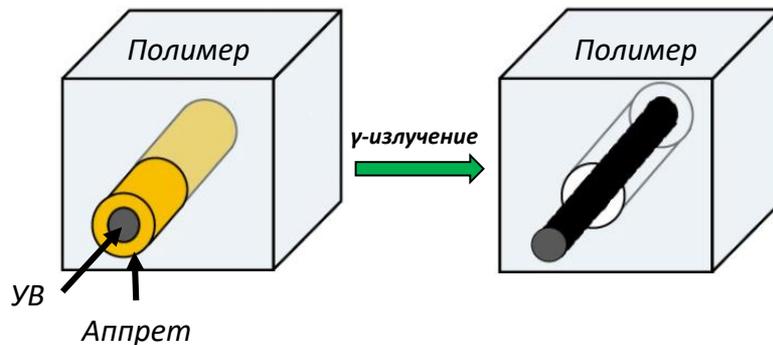
Результаты испытания
ТПКМ на изгиб
ПЭЭК-УВ [0/0]_s



Результаты испытания ПЭЭК
на растяжение



Механизм деградации ТПКМ под воздействием
 γ -излучения



Влияние криогенных температур на свойства ТПКМ

Для применения материалов в качестве криогенных топливных баков они должны выдерживать термоциклирование до температур жидкого азота и не пропускать газы.

Поведение материалов, подчиняющихся закону Фика, при испытании будут показывать значение течи в момент времени t :

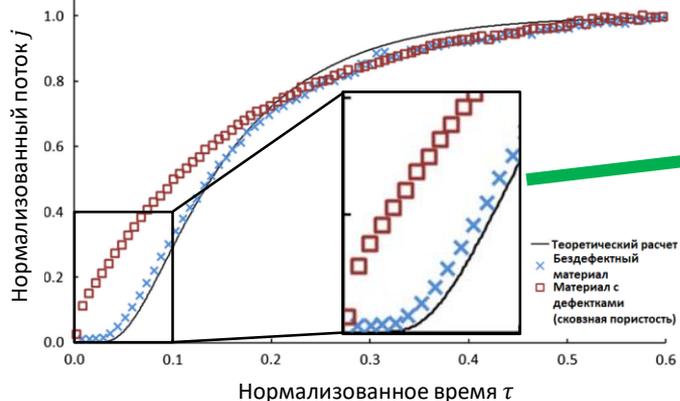
$$\frac{J}{J_{ss}} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{l^2}{4Dt}} \sum_{n=0}^{n=\infty} \exp\left\{-\frac{(2n+1)^2 L^2}{4Dt}\right\}$$

$$\text{при } J/J_{ss} = 0,5; \quad D = l^2/7,199t_{0,5}$$

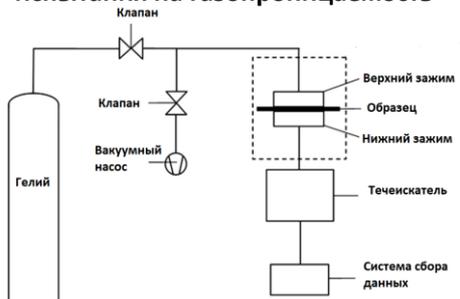
безразмерное отношение толщины к времени:

$$\tau = Dt/l^2$$

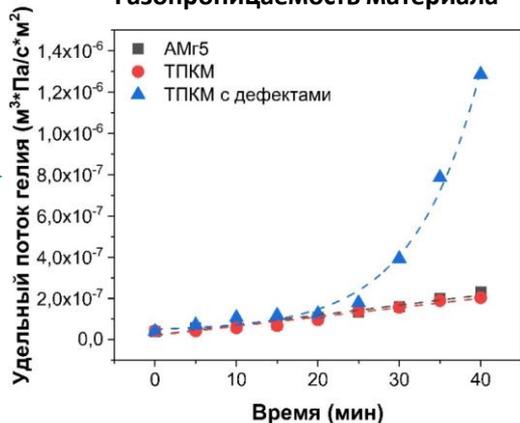
Теоретическая модель газопроницаемости



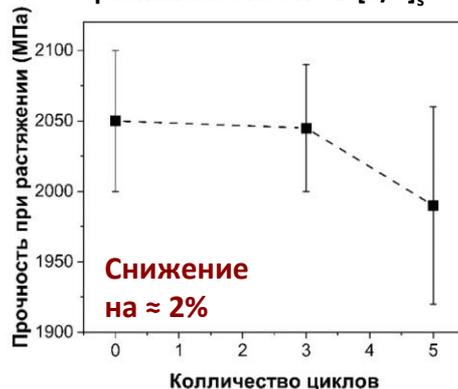
Экспериментальный стенд для испытания на газопроницаемость



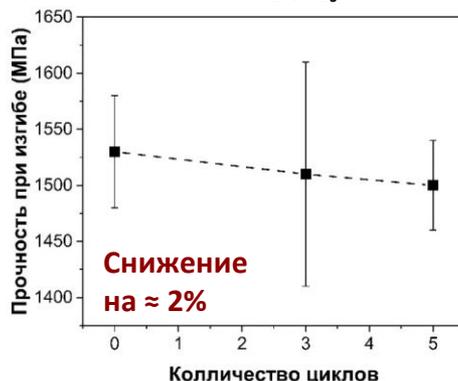
Газопроницаемость материала



Результаты испытания ТПКМ на растяжение ПЭЭК-УВ [0/0]_s

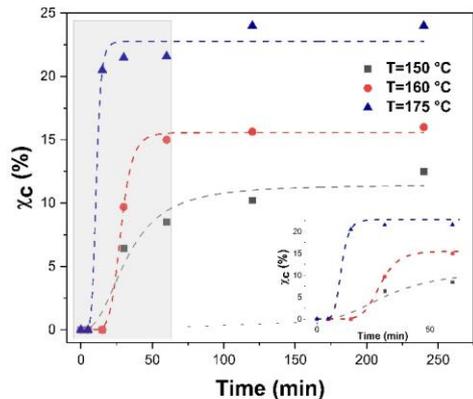


Результаты испытания ТПКМ на изгиб ПЭЭК-УВ [0/0]_s

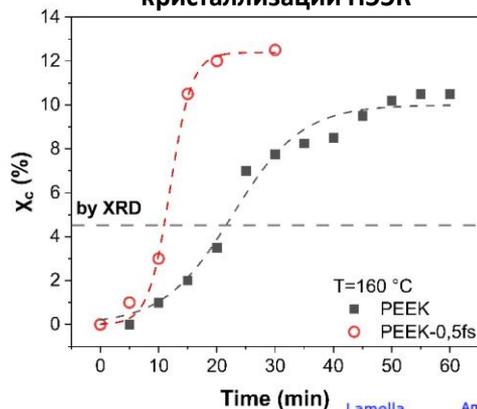


Кинетика кристаллизации ПЭЭК и композитов на его основе

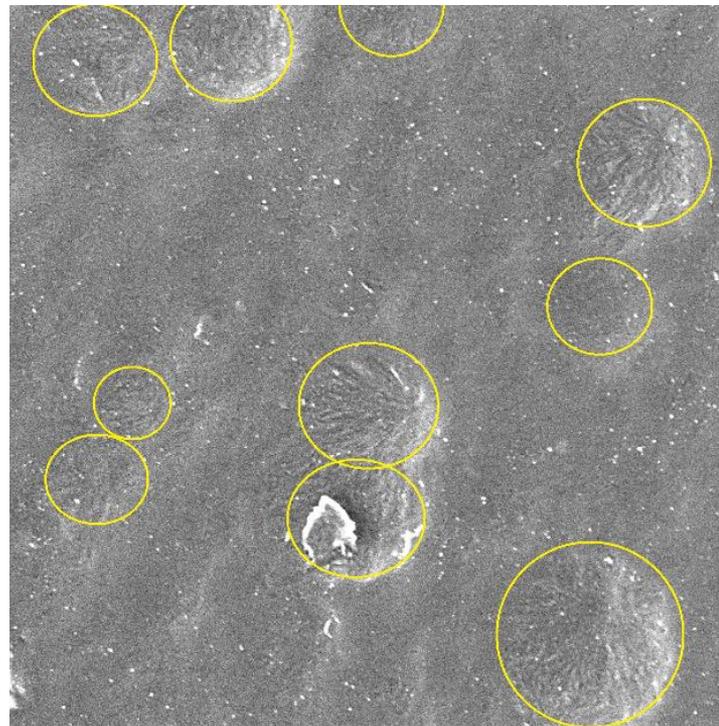
Кинетика кристаллизации ПЭЭК



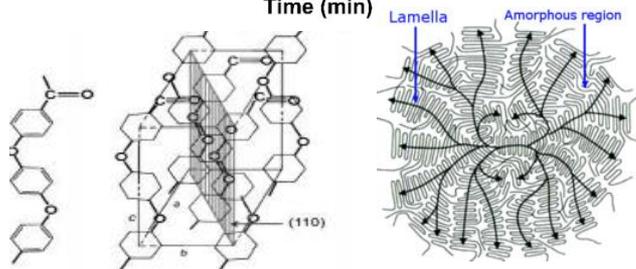
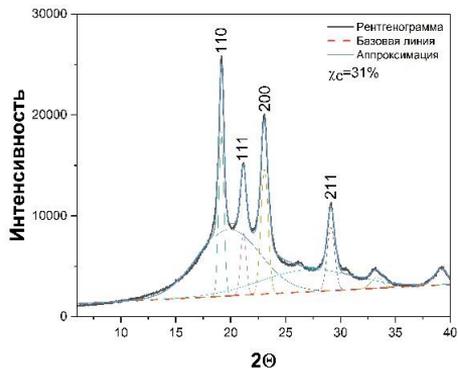
Влияние наночастиц на кинетику кристаллизации ПЭЭК



СЭМ снимки образца после отжига 250 °C, 30 мин



РФА для ПЭЭК после отжига



Образцы ПЭЭК после закалки и отжига при 160 °C
 0 мин 15 мин 30 мин 60 мин 120 мин 240 мин



SEM HV: 2.0 kV	WD: 10.23 mm			MIRA3 TESCAN
View field: 14.4 μm	Det: SE	2 μm		
SEM MAG: 50.0 kx	Date(m/d/y): 04/06/21			

Сравнение материала с зарубежными аналогами

Характеристика	СПбПУ UDTT РЕЕК-UMT45	СПбПУ UDTT РЕЕК-SYT49	Tenax®-E TPUD РЕЕК-HTS45	Solvay® APC-2 UD Tape
Полимер	ПЭЭК	ПЭЭК	ПЭЭК	ПЭЭК
Плотность, г/см ³	1,59	1,59	1,59	1,59
Содержание волокна, об.% *	59	59	59	59
0° Модуль упругости при растяжение, ГПа	130	135	138	138
0° Предел прочности при растяжении, МПа	2050	2250	2300	2070
0° Модуль упругости при изгибе, ГПа	120	120	120	124
0° Предел прочности при изгибе, МПа	1700	2400	1840	2000

Разработаны и утверждены **технические условия ТУ 23.99.14-001-02068574-2021.**

«Однонаправленные ленточные препреги на основе углеродного волокна и полиэфирэфиркетона»

Возможна разработка или доработка материала и ТУ под требования заказчика

Технология автоматизированной выкладки ленты

Технология получения консолидированных ламинатов

Пропитка

Горячее прессование
Вакуумная консолидация

Испытания экспериментальных
образцов

Создание базы данных материалов

Базы данных
материалов

Создание CAD-CAM-CAE системы на базе Цифровой платформы CML-Bench™

CAD-модуль



CAM-CAE модуль

Топологическая оптимизация изделия
Учет технологических ограничений
Моделирование технологического процесса



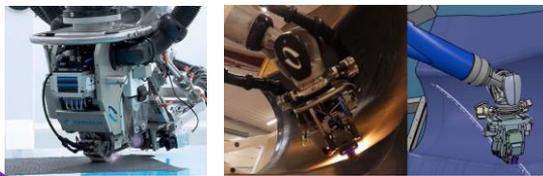
Базы данных
материалов

Базы данных технологических
процессов

Установки роботизированной выкладки ленты

Система позиционирования
Промышленный робот
Поворотный стол

Головка для выкладки



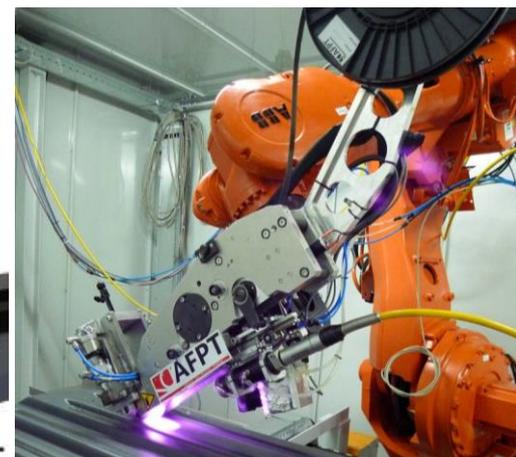
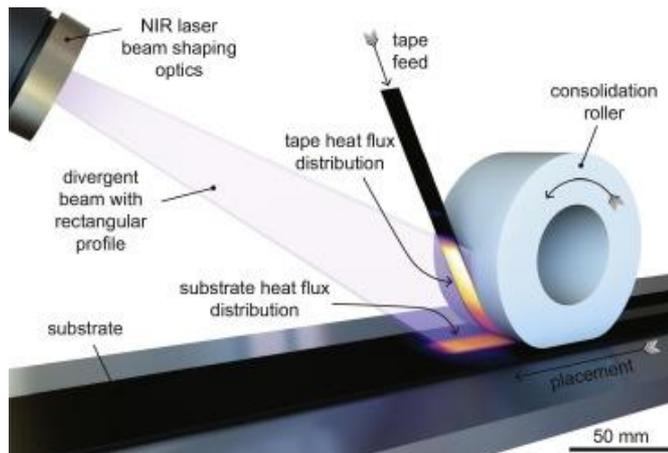
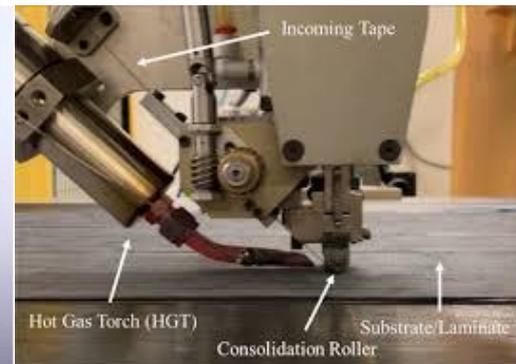
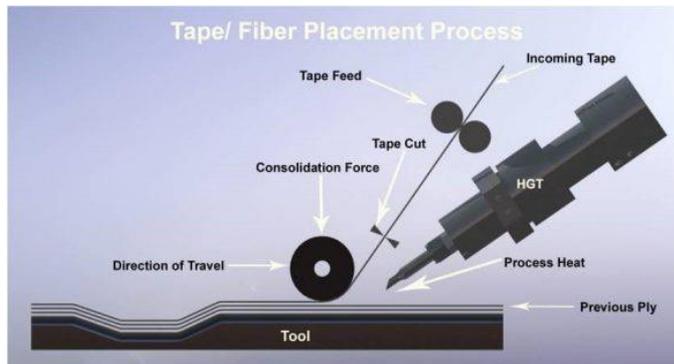
Математические модели
процесса

Технология автоматизированной выкладки ленты

В Центре НТИ СПбПУ с участниками консорциума создана лабораторная установка автоматизированной ленты на которой проводятся работы по разработкам технологических режимов и созданию базы данных свойств материалов и технологических процессов.

Под требования заказчика (конкретные ДСЕ) возможна доработка оборудования и технологии.

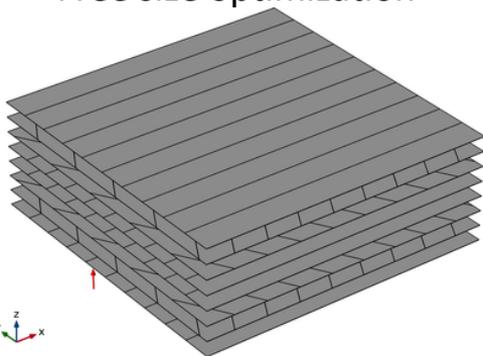
Ожидаемые результаты позволят создать «инструменты» проектирования для конструкторов и значительно ускорить процесс внедрения ТПКМ в «реальные» изделия



Топологическая оптимизация слоистых композитов



Free size optimization

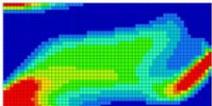
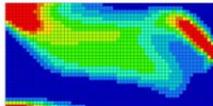
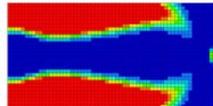


Ply 101 - No groups

Ply 102 - No groups

Ply 103 - No groups

Ply 104 - No groups

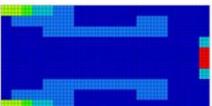
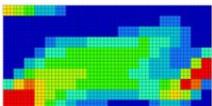
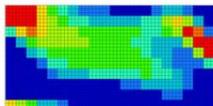
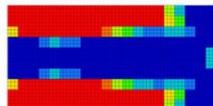


Ply 101 - Small groups

Ply 102 - Small groups

Ply 103 - Small groups

Ply 104 - Small groups

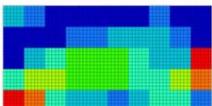
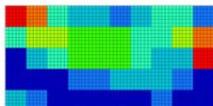


Ply 101 - Large groups

Ply 102 - Large groups

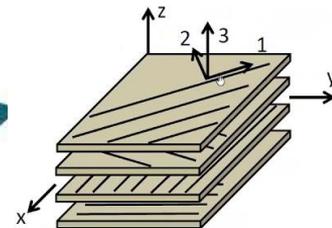
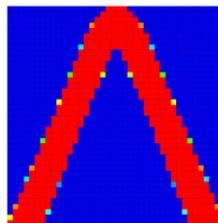
Ply 103 - Large groups

Ply 104 - Large groups



Разработка ПО для оптимизации КОМПОЗИТОВ

Интерфейс пользователя



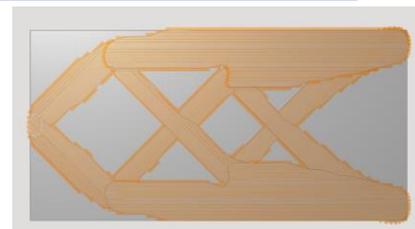
Топологическая
оптимизация

Топографическая
оптимизация

Оптимизация
укладки

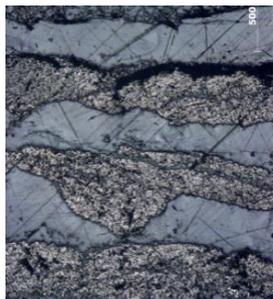


Конечно-элементный
решатель

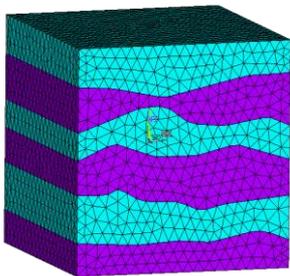


Интегрированная система компьютерного проектирования и инжиниринга легких и надежных композитных конструкций (ФЦП 1.4 в интересах ОРКК)

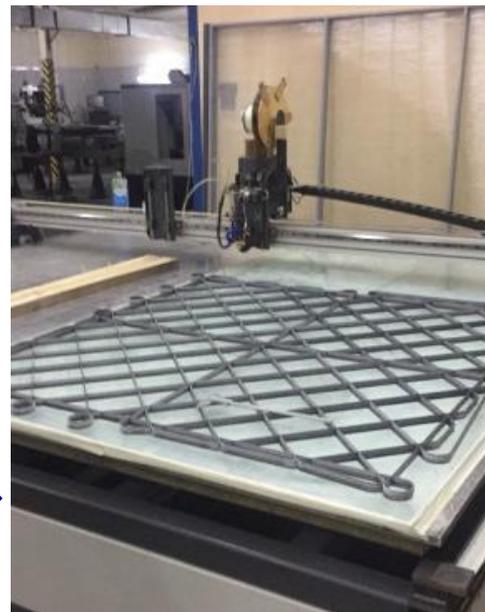
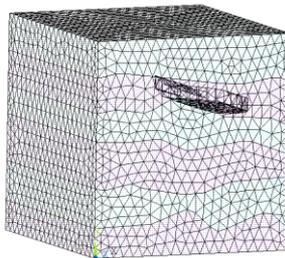
Микроструктура



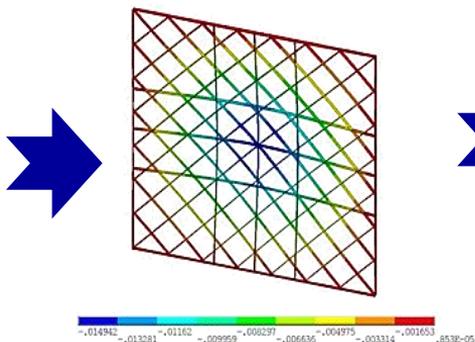
КЭ модель
представительного
элемента объема



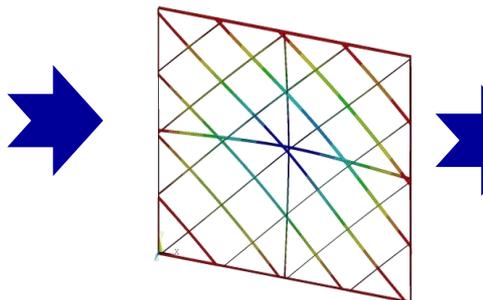
Дефекты



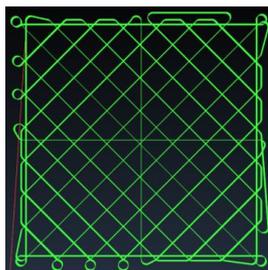
Изготовление
изделия



Многоуровневое моделирование



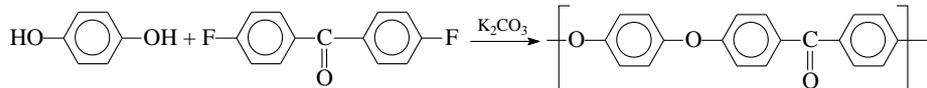
Параметрическая
оптимизация



Генерация
G-кодов

Разработка подшипников скольжения на основе ПЭЭК

Задача работы: исследовать влияния структуры полимера и условий фрикционного взаимодействия на трибологические свойства ПЭЭК, для его применения в подшипниках скольжения



Путем регулирования соотношения 4,4'-дифторбензофенона к гидрохинону в молярном соотношении от 1:1 до 1:1,04 была получена серия ПЭЭК с показателем текучести расплава (ПТР)

Зависимость физико-механических свойств ПЭЭК от ПТР

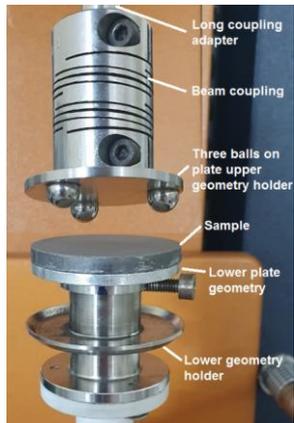
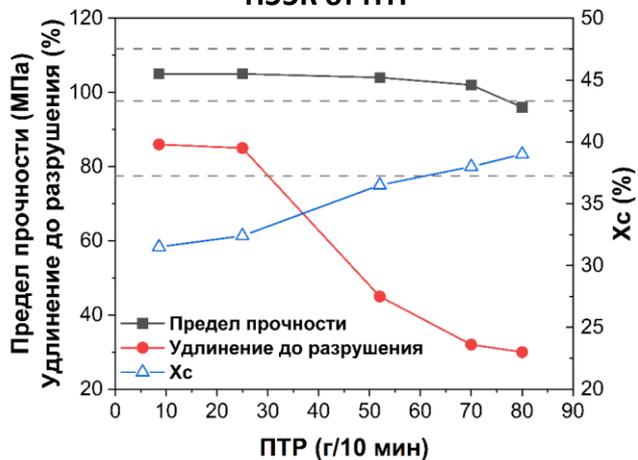
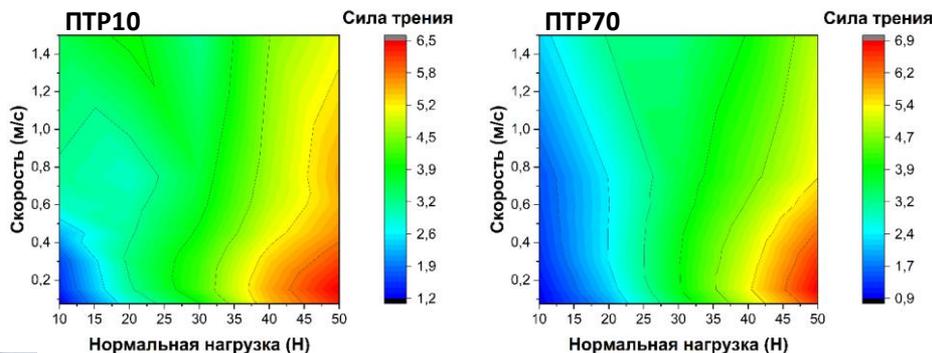
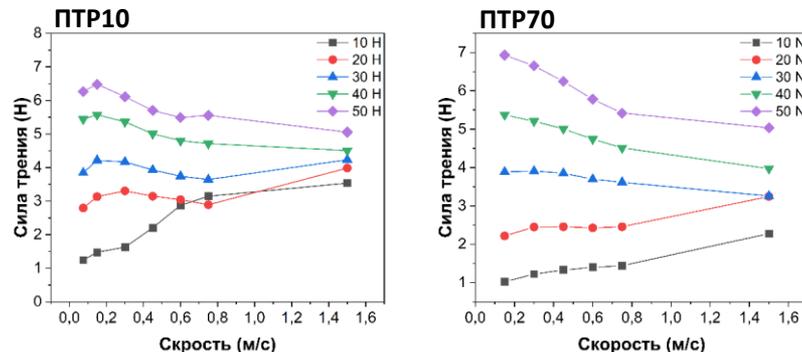


Схема испытания на трение

Зависимость силы трения от скорости скольжения и нормальной нагрузки

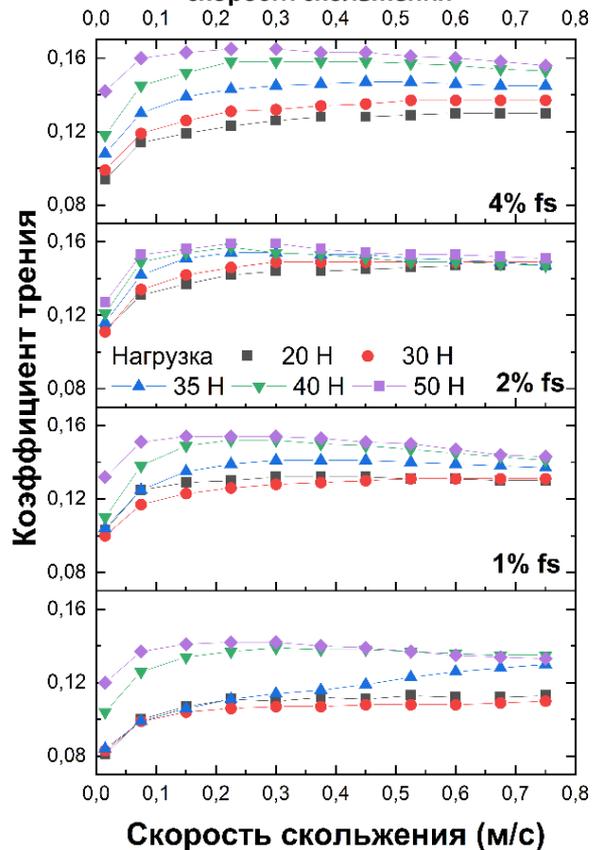


Зависимость силы трения от скорости скольжения при разных нагрузках

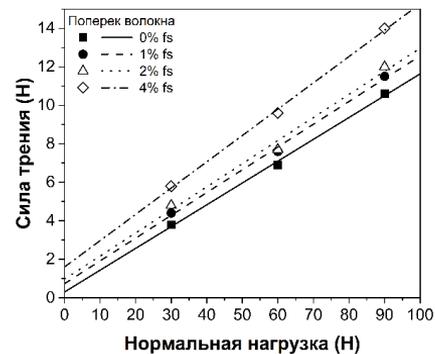
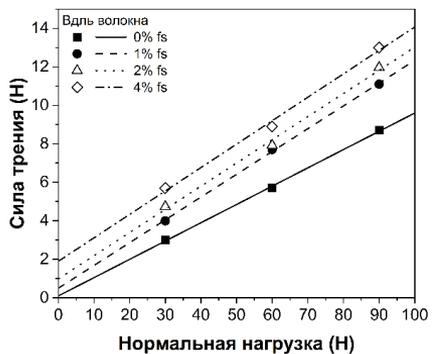


Разработка подшипников скольжения на основе ТПКМ

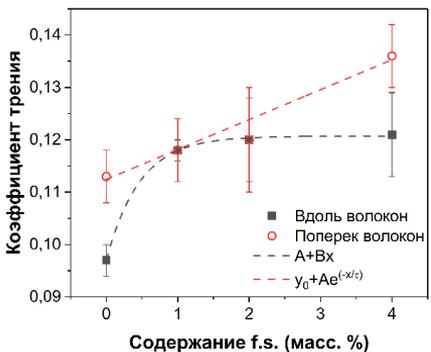
Зависимость кажущегося коэффициента трения от скорости скольжения



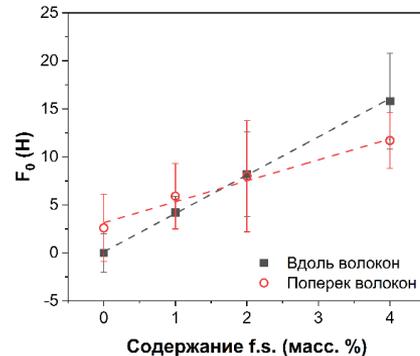
Экстраполяция экспериментальных данных с использованием двухчленного закона трения при трении вдоль и поперек оси армирования



Зависимость истинного коэффициента трения от содержания наночастиц

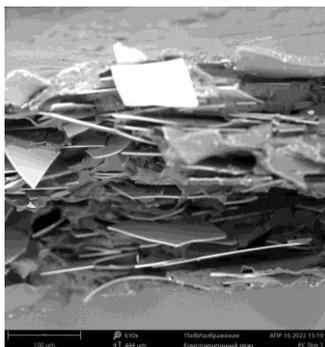


Зависимость адгезионной составляющей трения от содержания наночастиц



Разработка оптически прозрачных композитов на основе термопластичного полиуретана

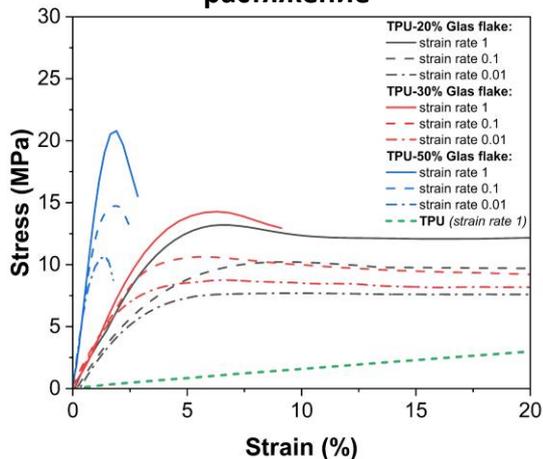
СЭМ снимок ТПУ-30%GF после испытания на растяжение



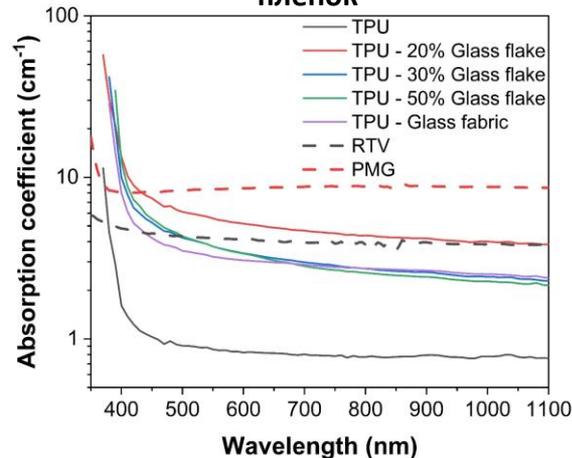
Фотография образцы ТПУ-30%Glass Flakes (толщина 300 мкм)



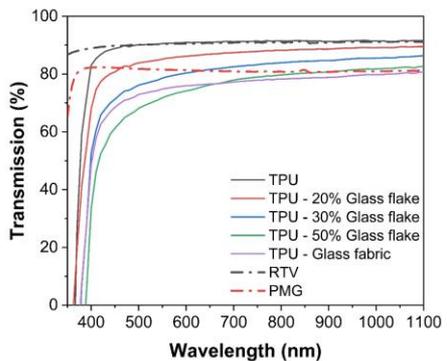
Испытание композитов на растяжение



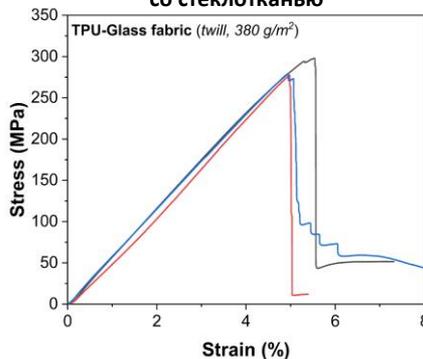
Коэффициент поглощения (λ_{10}) композитных пленок



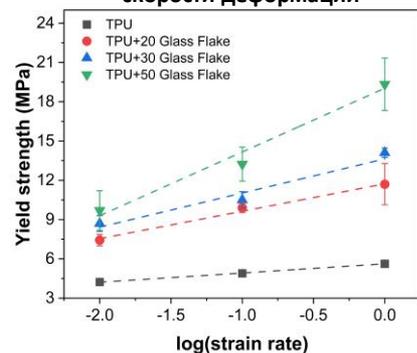
Исходные спектры пропускания образцов



Испытания на растяжение композитов со стеклотканью

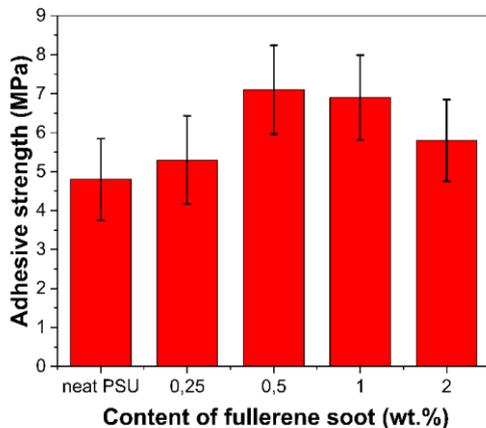


Зависимость предела текучести от скорости деформации

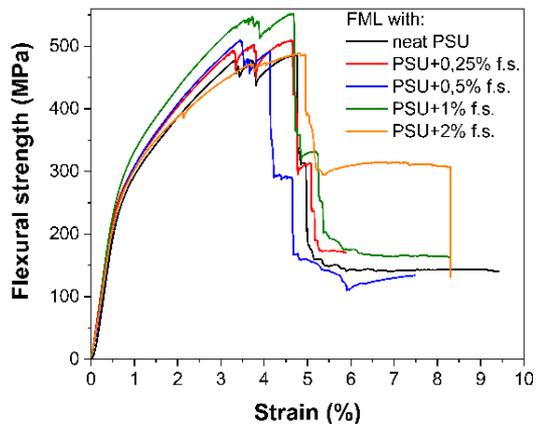


Разработка Fiber metal laminate (FML) на основе термопластичных препрегов

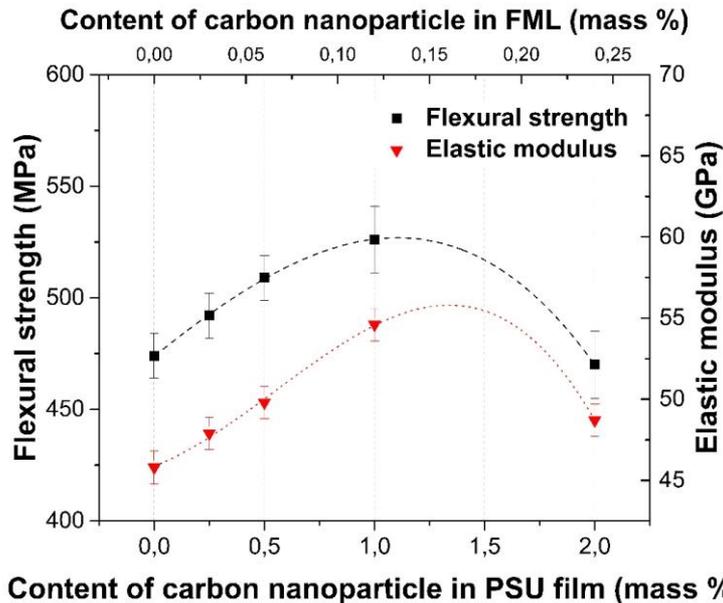
Адгезия полимера к алюминию



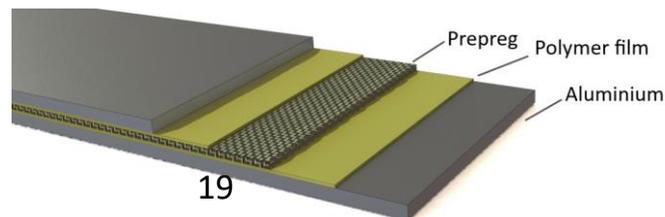
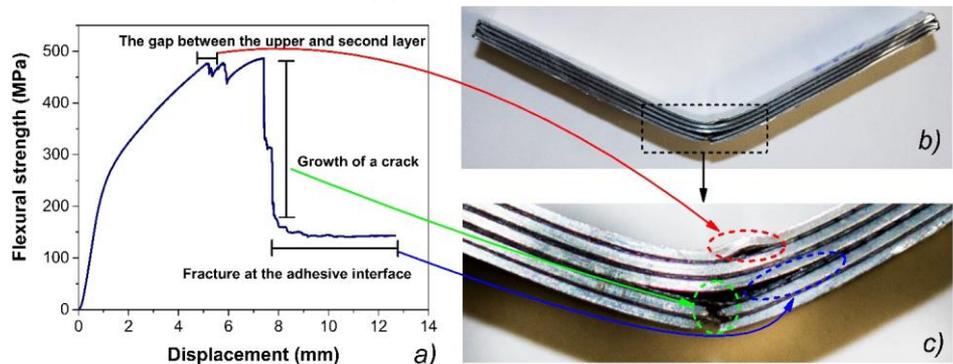
Испытания FML на изгиб



Зависимость свойств FML от содержания наночастиц



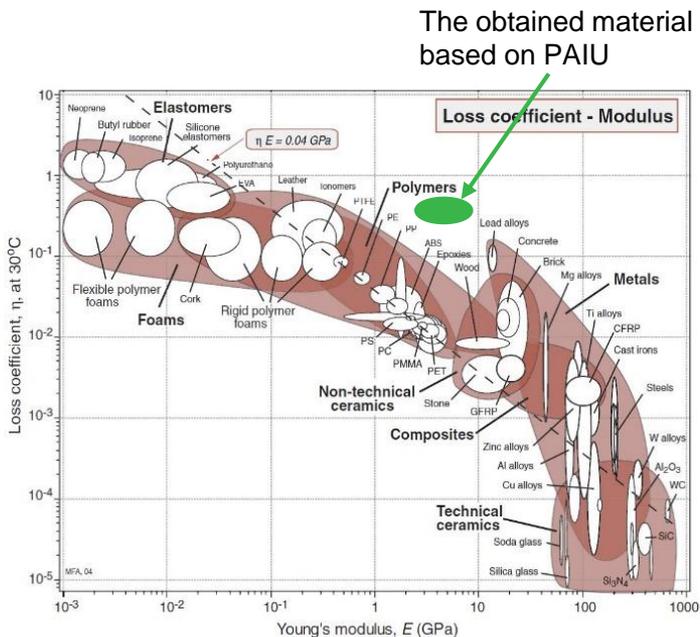
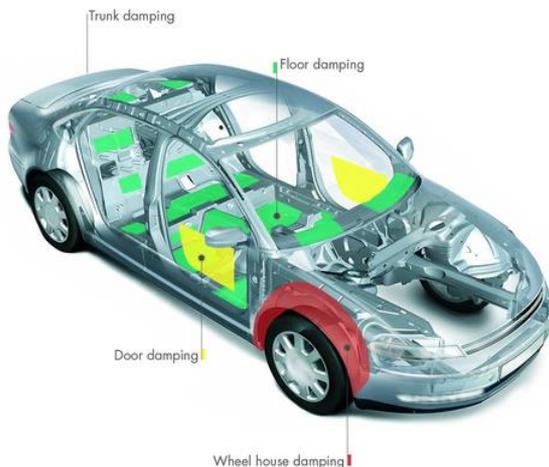
Механизм разрушения FML



FML с высокими демпфирующими свойствами

Композиционный материал на основе препрега базальтовая ткань-PUAI и алюминиевого сплава 5083

Перспективы применения



For PSU based

$$E' * \tan \delta = 0,5$$

$$\sigma * \tan \delta = 7,65$$

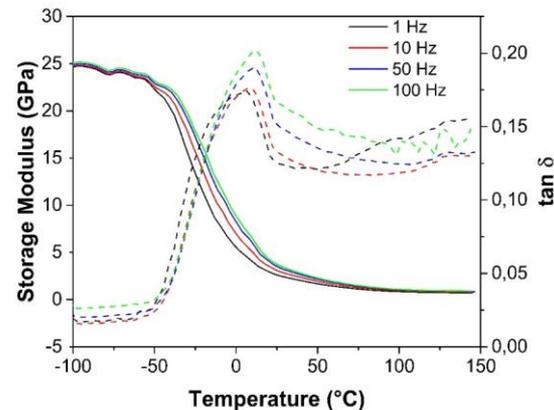
For PUAI based

$$E' * \tan \delta = 0,75$$

$$\sigma * \tan \delta = 12$$

(at a $T=25^\circ\text{C}$)

DMA на разных частотах



Достоинства:

- 1 – высокий тангенс потерь и модуль упругости;
- 2 – широкий температурный интервал возможного использования;
- 3 – слабая зависимость от частоты.



Научно-промышленного форум «Техническое перевооружение машиностроительных предприятий России»

Секция «Наука-производству. Композитные и полимерные материалы»

18 октября 2022 года, Екатеринбург



Спасибо за внимание!

Кобыхно Илья
м.н.с. лаборатории «МТПиПЭО»
Центр НТИ СПбПУ

Тел: +7 (905) 260-51-32
E-mail: ilya.kobykhno@gmail.com