

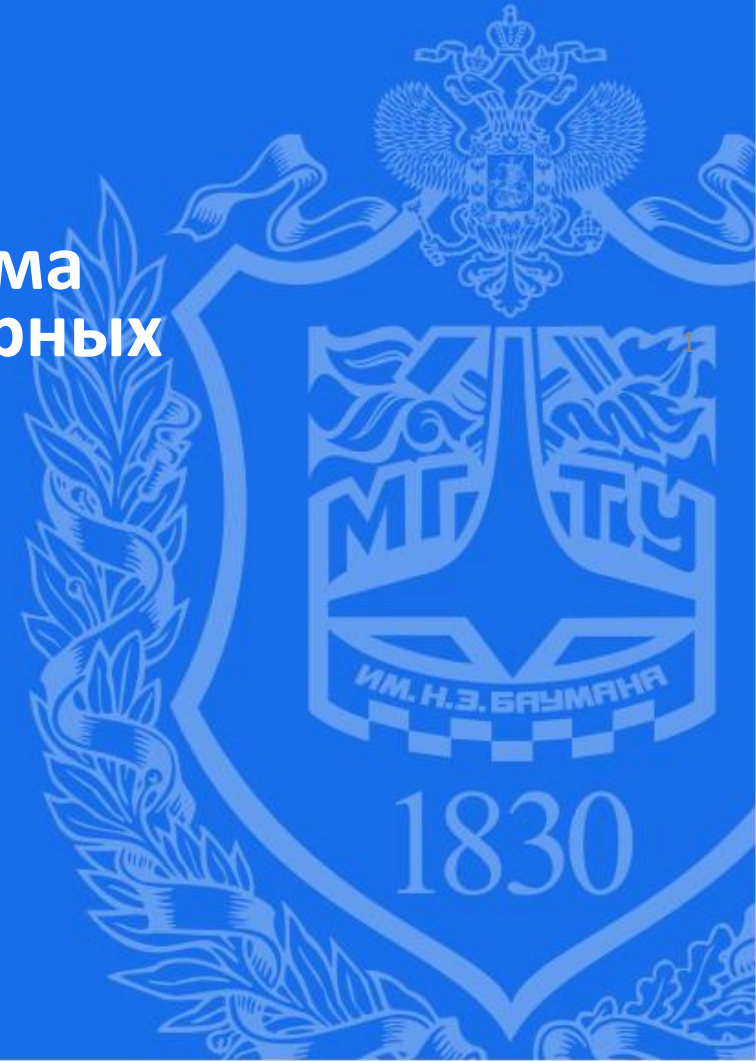
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Импортонезависимые база данных и платформа для ускоренной разработки изделий из полимерных композиционных материалов

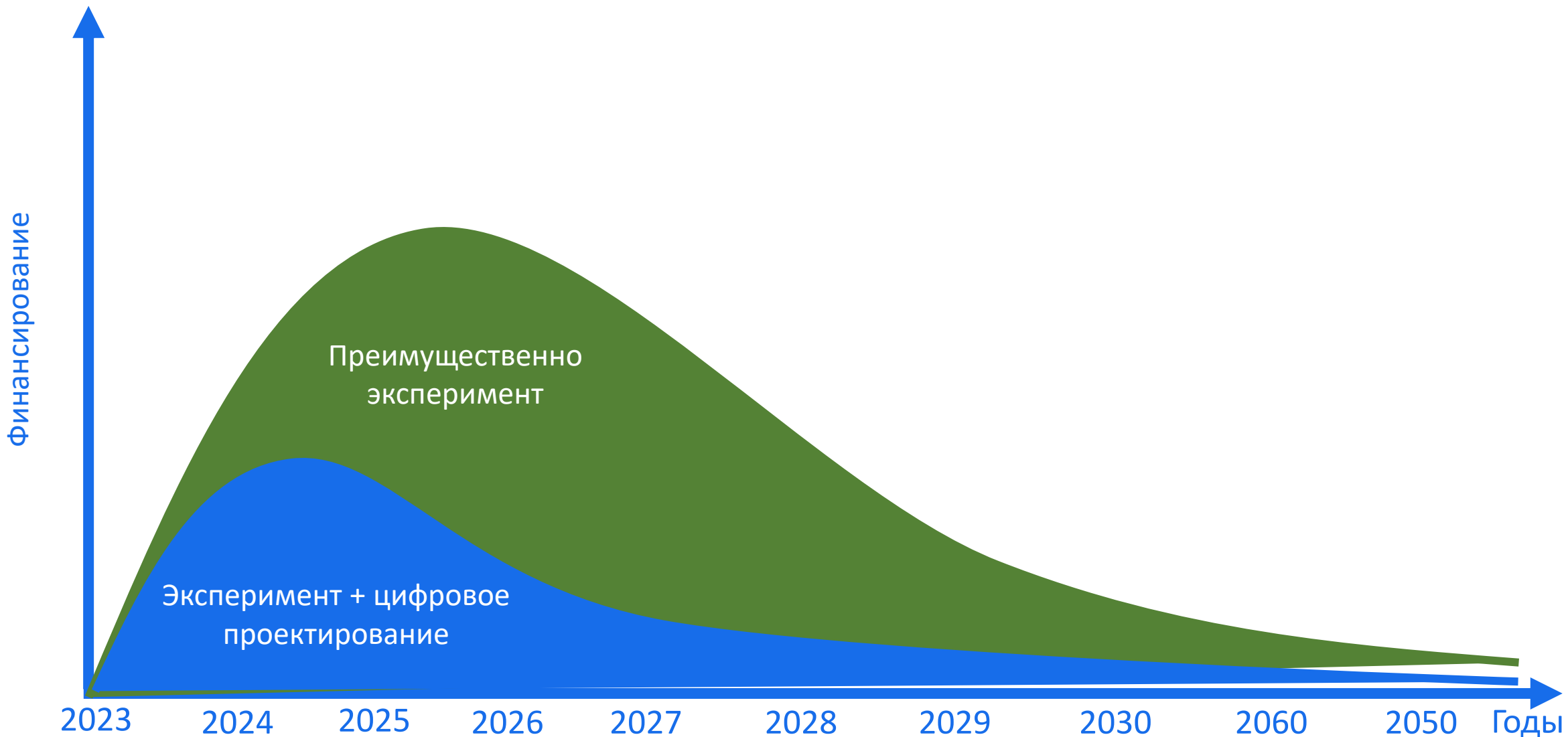
Александров Евгений Викторович
Д.х.н., директор
aleksandrov@bmstu.ru

Центр НТИ

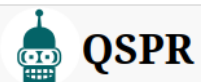
«Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества»



Цифровизация



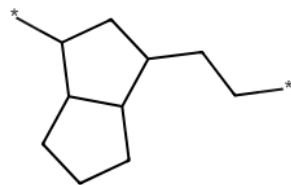
Модель машинного обучения для предсказания физических свойств полимеров



Averochkin2025

SMILES

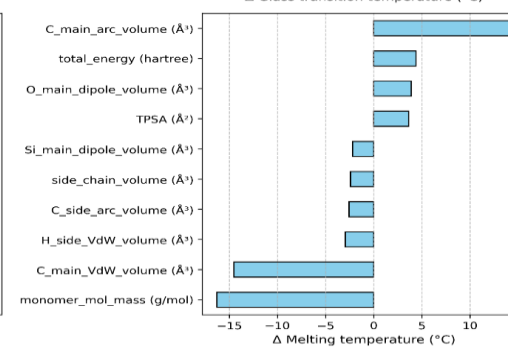
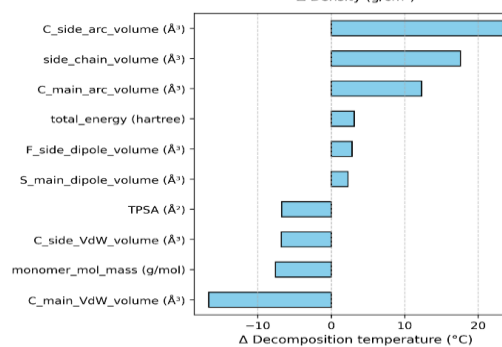
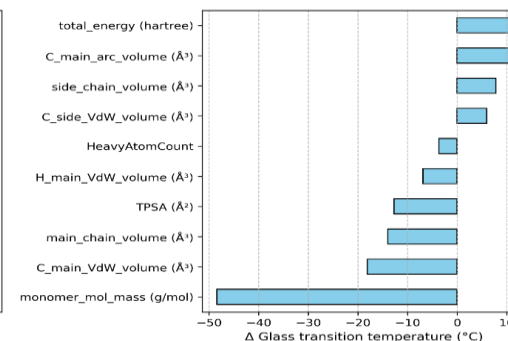
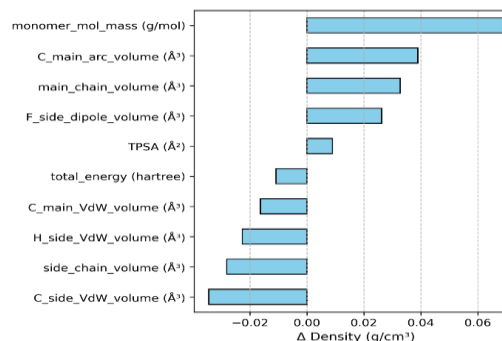
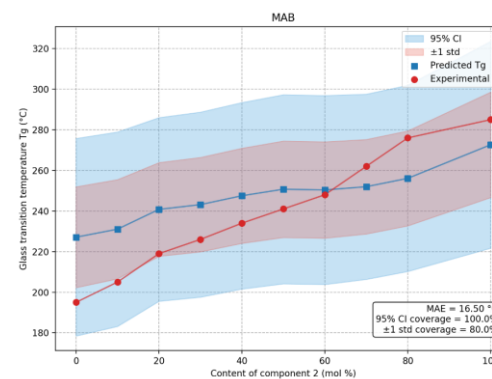
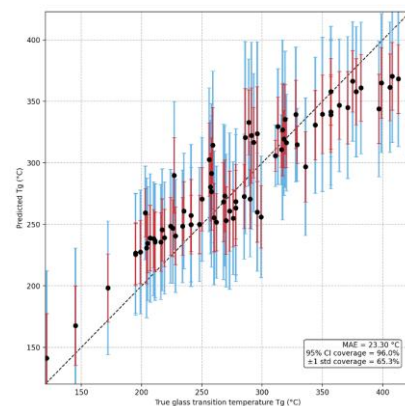
CCC1CC(C2C1CCC2)



Polymer properties Polymer descriptors

	Mean	Stddev
Density	1.00	0.04
Glass transition temperature	148.04	30.14
Thermal decomposition temperature	406.65	42.74
Melting temperature	266.69	48.13

Math It



БАЗА ДАННЫХ: содержит информацию о композитах и их компонентах, предназначенную для материаловедов, технологов и конструкторов, решающих задачи создания композиционных материалов и изделий на их основе, позволяющую значительно сократить время проектирования, обеспечивающую снижение финансовых, материальных, и иных ресурсных затрат, за счет использования данных по уже существующим полимерным композиционным материалам, полученным в результате натуральных испытаний

БЛОК ПКМ

БД ПКМ ▾ Прямая задача Обратная задача Профиль

Прочность при растяжении по основе	ПКМ	<input type="text"/>	МПа	Стойкость к соленой воде	<input type="text"/>	▼
Прочность при изгибе по основе	Связующие	<input type="text"/>	МПа	Стойкость к УФ	<input type="text"/>	▼
Модуль упругости по основе	Армирующие наполнители	<input type="text"/>	МПа	Стойкость к горению	<input type="text"/>	▼
Модуль сдвига по основе	Режимы отверждения	<input type="text"/>	ГПа	Стойкость к грибам и плесени	<input type="text"/>	▼
Температура размягчения		<input type="text"/>	- <input type="text"/>	Стойкость к химическим веществам	<input type="text"/>	▼
ТКЛР		<input type="text"/>	- <input type="text"/>	Стойкость к биологической коррозии	<input type="text"/>	▼
Плотность		<input type="text"/>	- <input type="text"/>	Стойкость к стандартным растворителям	<input type="text"/>	▼
			°C	Стойкость к воде	<input type="text"/>	▼
			*10 ^{^-6} , К ^{^-1}			
			кг/м ³			

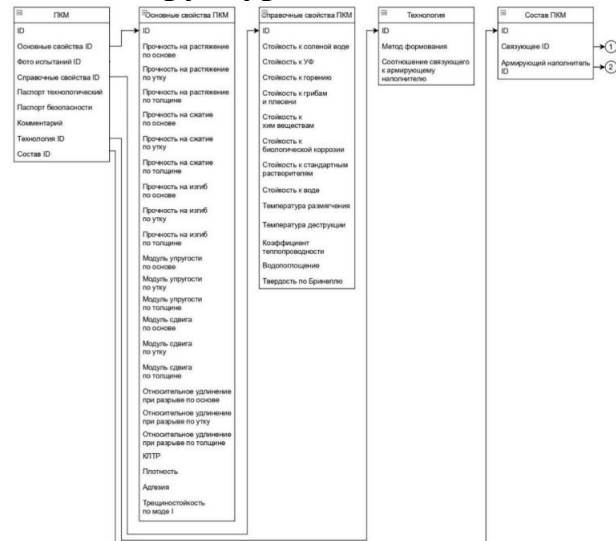
Свойства	Связующие	Армирующий наполнитель	Метод формирования	Соотношение связующего к армирующему наполнителю	Паспорта	Комментарий	
Посмотреть	1 Araldite LV 556 + изо-ИМТФФА	1 ТКК-100	Горячее прессование	40/60	-	1	Найти
Посмотреть	1 Araldite LV 556 + изо-ИМТФФА	1 ТКК-100	RTM/Lite RTM	50/50	-	2	Добавить
Посмотреть	1 Araldite LV 556 + изо-ИМТФФА	1 ТКК-100	Вакуумная инфузия	55/45	-	3	Редактировать
Посмотреть	2 ENVDYNE I 69475 A - Буланокс	1 ТКК-100	Горячее прессование	40/60	-	4	Удалить
Посмотреть	2 ENVDYNE I 69475 A - Буланокс	1 ТКК-100	Вакуумная инфузия	55/45	-	5	
Посмотреть	1 Araldite LV 556 + изо-ИМТФФА	2 Т-10 (92)	Вакуумная инфузия	55/45	-	6	

Обеспечивает возможность просмотра информации из БД ПКМ, поиска по ней, добавления новых записей, редактирования и удаления существующих записей через графический интерфейс модуля серверной части

Общий состав информации:

- состав ПКМ
- основные свойства
- справочные свойства
- технические паспорта
- паспорта безопасности
- технология изготовления

Структура блока



Свойства ПКМ

БД ПКМ ▾ Прямая задача Обратная задача Профиль

Свойства ПКМ Назад

Основные свойства	Значение	Размерность
Прочность при растяжении по основе	460	МПа
Прочность при растяжении по утку	462	МПа
Прочность при растяжении по толщине		МПа
Прочность при сжатии по основе	250	МПа
Прочность при сжатии по утку	256	МПа
Прочность при сжатии по толщине		МПа
Прочность при изгибе по основе	492	МПа
Прочность при изгибе по утку	472	МПа
Прочность при изгибе по толщине		МПа
Модуль упругости по основе	24	ГПа
Модуль упругости по утку	25	ГПа
Модуль упругости по толщине		ГПа
Модуль сдвига по основе	3807	МПа
Модуль сдвига по утку		МПа
Модуль сдвига по толщине		МПа
Относительное удлинение при разрыве по основе	4.5	%
Относительное удлинение при разрыве по утку	4.6	%
Относительное удлинение при разрыве по толщине		%

БЛОК СВЯЗУЮЩЕЕ

Связующие

Смолы

Отвердители

Ускорители

Модификаторы

Растворители

Название:

CAS-No:

Тип:

Стоимость: -

Производитель:

Доступность:

Температура размягчения: - °C

Время гелеобразования: - мин

Время полимеризации: - мин

Название	Тип	Состав	Режим отверждения	Стоимость	Производитель	Доступность	Паспорта	Комментарий
		Посмотреть	Посмотреть					
1 Araldite LV 556 + изо-ИМТФА	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					
2 ENVDYNE I 69475 A + Бутанокс	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					
3 Araldite LV 556 + ПЭПА	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					
4 Araldite LV 8615 + Aradur	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					
5 ЭТо (100) + ДЭГ-1 (12) + Со-340А	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					
6 T107 (Эпоксидный препрег)	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					
7 T107 (Автоклавный препрег)	Реактопласт	Посмотреть	Посмотреть					

[Найти](#)

[Добавить](#)

[Редактировать](#)

[Удалить](#)

Обеспечивает возможность просмотра информации о связующих, их составах и свойствах их компонентов, поиска по БД, добавления новых записей, их редактирования и удаления существующих записей

Позволяет ускорить получение исчерпывающей технологической карты (включая производственные параметры: давление, температурные профили и пр.) производства изделий из ПКМ

Общий состав информации

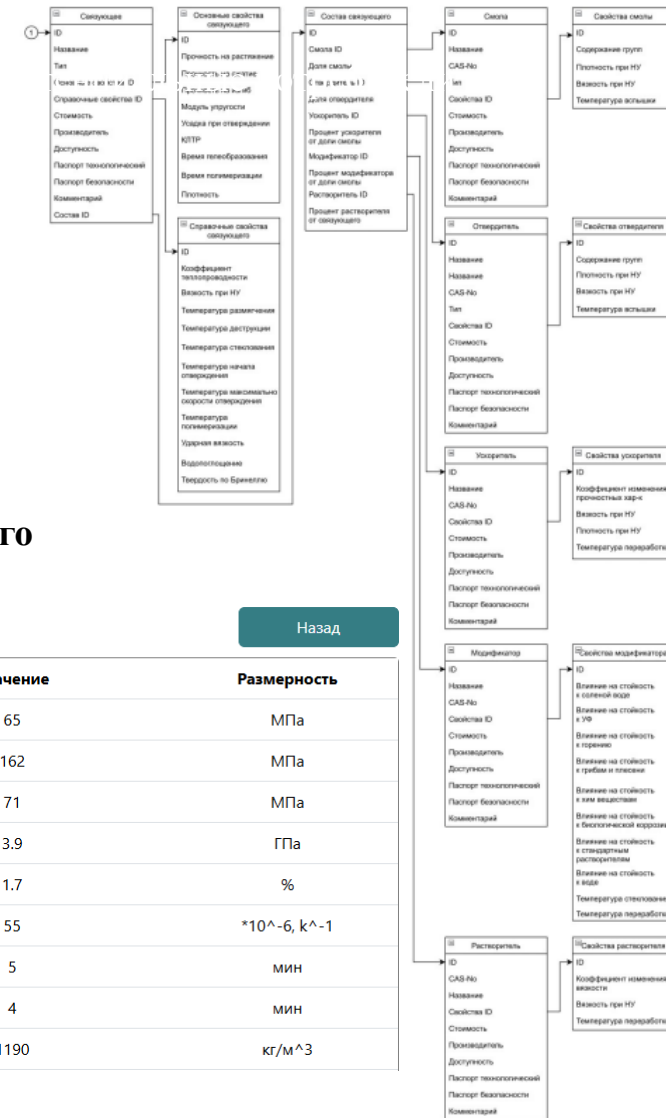
- состав связующих
- основные свойства
- справочные свойства
- технические паспорта
- паспорта безопасности
- технологии применения
- свойства смол, отвердителей, ускорителей, модификаторов, растворителей
- информация о производителях связующих и их компонентов

Свойства связующего

Свойства связующего

Основные свойства	Значение	Размерность
Прочность при растяжении	65	МПа
Прочность при сжатии	162	МПа
Прочность при изгибе	71	МПа
Модуль упругости	3.9	ГПа
Усадка при отверждении	1.7	%
КЛТР	55	*10 ⁻⁶ , К ⁻¹
Время гелеобразования	5	МИН
Время полимеризации	4	МИН
Плотность	1190	кг/м ³

Структура блока



БЛОК АРМИРУЮЩИЕ НАПОЛНИТЕЛИ

Дисперсные наполнители

Ткани

Нити

Замасливатели

Название:

CAS-No:

Тип:

Стоимость: -

Производитель:

Доступность:

Насыпная плотность: - г/см³

Мах температура применения: - °C

Диаметр частиц: - мкм

Диаметр волокна: - мм

Длина волокна: - мм

КЛТР: - x10⁻⁶, K⁻¹

Название	CAS-No	Тип	Замасливатель	Стоимость	Производитель	Доступность	Паспорта	Комментарий
Улопок		Порошок				Не доступно	.	
Базальтовая фибра		Фибра					.SDS	
Стеклофибра		Фибра					.	
Углефибра		Фибра					.	

Найти

Добавить

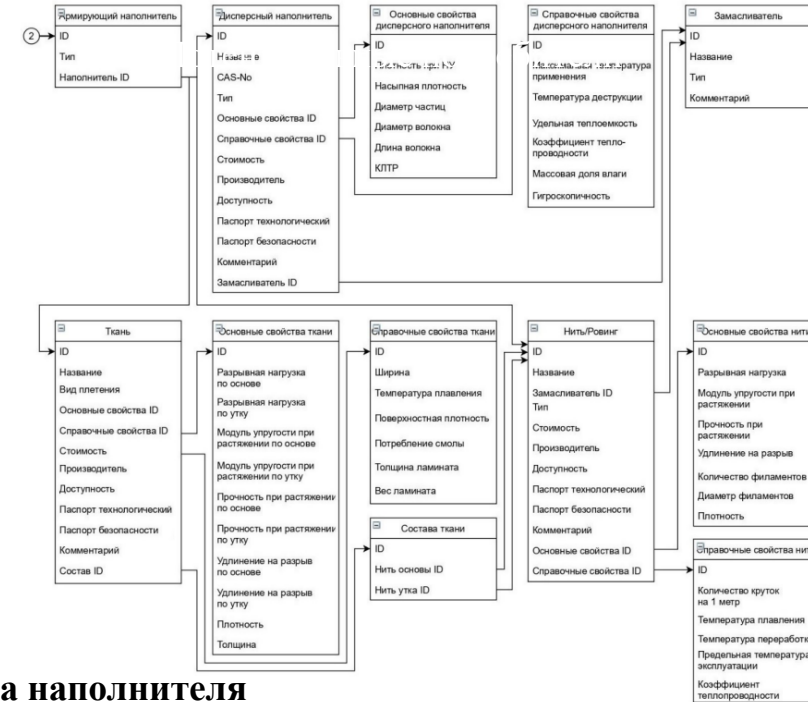
Редактировать

Удалить

Общий состав информации:

- виды армирующих наполнителей
- основные свойства
- справочные свойства
- технические паспорта
- паспорта безопасности
- свойства дисперсных наполнителей
- свойства тканей
- вид плетения тканей
- нити основы и нити утка
- свойства нитей
- свойства замасливателей
- информация о производителях армирующих наполнителей

Структура блока



Свойства наполнителя

Свойства дисперсного наполнителя

[Назад](#)

Основные свойства	Значение	Размерность
Плотность при ну	2.6	г/см ³
Насыпная плотность	0.8	г/см ³
Диаметр частиц	15	мкм
Диаметр волокна		мм
Длина волокна	6	мм
КЛТР	4	*10 ⁻⁶ , k ⁻¹

Обеспечивает возможность просмотра информации об армирующих наполнителях и их свойствах, добавления новых записей, их редактирования и удаления;

Содержит информацию о дисперсных наполнителях, тканях, нитях, замасливателях.

Оценка эффективности решения ПЗ

На основе выбранных компонентов ПКМ, которые использовались для получения данных системой автоматизированного принятия решений были изготовлены образцы ПКМ и проведены их испытания.

Оценка эффективности решения ОЗ

На основе выбранных системой автоматизированного принятия решений компонентов ПКМ были изготовлены образцы ПКМ и проведены их испытания.

Для оценки эффективности работы системы проведено сравнение данных о свойствах ПКМ полученных системой в результате расчета и данных полученных в результате испытания ПКМ изготовленных с использованием рекомендаций системы.

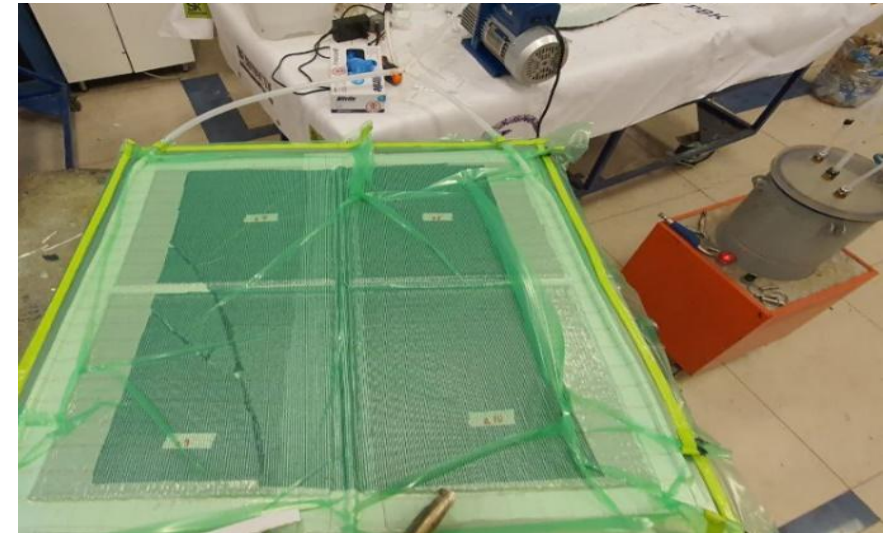
Оценку эффективности проводили на основании расчета относительной ошибки прогнозирования и точности прогнозирования для каждого из свойств ПКМ

Точность прогноза ПЗ

При решении прямой задачи средняя относительная ошибка для всех данных о свойствах ПКМ составила 8,6 %, а **точность прогноза 91,4 %**

Образцы для испытаний изготавливали следующими методами:

- RTM (Resin Transfer Moulding) - методом инъекции связующего в закрытую форму
- вакуумной инфузии
- горячего прессования



Точность прогноза ОЗ

При решении обратной задачи средняя относительная ошибка для всех данных о свойствах ПКМ составила 10,5 %, а **точность прогноза 89,5 %**

Результаты

№	Наименование мероприятия или работы	Срок исполнения	Результаты
7	Изготовление разнообразных по составу и способам производства ПКМ для проведения испытаний с целью получения данных об их свойствах для формирования расширенной БД в рамках разрабатываемой цифровой платформы.	07.2025	Изготовлено 3552 образцов согласно актам изготовлений с применением 4 типов технологий, 4 типов плетения, 4 типов волокон и 3 типов связующих.
8	Испытания ПКМ и их компонентов в соответствии с разработанной ПМИ.	09.2025	Испытано 3552 образцов согласно протоколам испытаний. Количество исследуемых параметров 66.

Результаты испытаний образцов углепластика, полученных различными методами

Метод изготовления	σ_p , МПа	E_p , ГПа	ϵ_p , %	ρ , г/см ³	КЛТР, 10 ⁻⁶ К ⁻¹
Прессование	894.4 ± 56.0	68.3 ± 5.4	3.1 ± 0.2	1.50 ± 0.01	1.1 ± 0.3
Инжекция	820.1 ± 45.3	66.1 ± 4.7	2.2 ± 0.2	1.48 ± 0.02	1.2 ± 0.4
Инфузия	469.8 ± 18.0	38.5 ± 1.6	1.7 ± 0.5	1.48 ± 0.02	1.6 ± 0.4
Ручная выкладка	563.2 ± 48.2	57.9 ± 8.3	1.2 ± 0.3	1.44 ± 0.03	2.2 ± 0.5

Межслойная прочность при отрыве 0,15-0.25 кДж/м² - низкая для лицевых слоёв и силовых элементов рефлекторных панелей.

Для суперпластиков трещиностойкость 0.6-1.5 кДж/м².

Цифровое решение для управления жизненным циклом изделий из композиционных материалов

ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ >>>

- ❖ **Предназначен** для проектирования, анализа и технологической подготовки производства изделий из композиционных материалов.
- ❖ **Обладает** интуитивно понятным интерфейсом.
- ❖ **«Бесшовно»** интегрирован в **SAPUS.PLM**.
- ❖ **Позволяет** обеспечивает сквозную работу с композитами — от подбора материала до готового изделия.

ПРЕИМУЩЕСТВА >>>

- ❖ **Сокращение времени** вывода изделий на рынок
- ❖ **Минимизация брака** за счет имитации укладки
- ❖ **Кроссплатформенность**
- ❖ **Импортонезависимость**

БИЗНЕС-ЗАДАЧИ >>>

- ❖ **Использование композиционных материалов** при проектировании и производстве изделий;
- ❖ **Создание облегченных конструкций из композиционных материалов** (например, БПЛА и др.);
- ❖ **Повышение эксплуатационных характеристик** создаваемых изделий;
- ❖ **Подбор альтернативных материалов** без потери прочности;
- ❖ **Оптимизация производственных операций** (выкладка, раскрой, подготовка данных для оборудования);
- ❖ **Расширение возможностей производства** изделий.

Реализованный функционал

Навигатор композитов
Управление

Создать пакет
Послойное проектирование

Композитная система координат

Создать слой

Сечение плоскостью
Анализ пакета

Драпировка

Развертка

Вырез

Тонкий надрез

Линия ширины материала

Разделение слоёв

Создать пакет

Имя пакета: Новый пакет_2

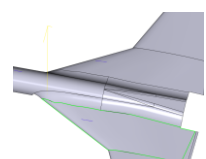
Тип укладки: Восходящая

Поверхность: Выберите поверхность укладки

Собрать границу

Граница по номиналу | Граница с припуском

Выберите границу по номиналу



Композитная система координат

Имя СК: Новая СК

Поверхность: Поверхность <362>

Точка: Выберите точку

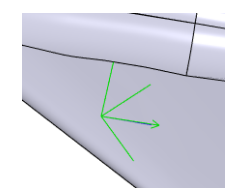
Направление: Выберите кривую

Тип: Стандартная

Параметры

Длина вектора: 100 мм

Ориентация: Правая



Создать слой

Имя: P

Пакет: Новый пакет

Композитная СК: Новая СК

Материал: PPG-PL-3K

Начало выкладки: Выберите поверхность

Тип: Технологический

Граница по номиналу | Граница с припуском

Выберите границу по номиналу

Шаг: 100

Ориентация: 0

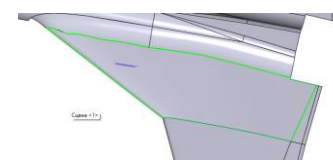
Относительный | Абсолютный

Коэффициент: 1

Отображать: Драпировка

Создать несколько слоёв

Количество: 5



Сечение плоскостью

Композитный пакет: Новый пакет

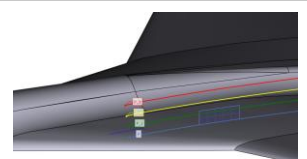
Плоскость: Выберите плоскость сечения

Тип сечения: Схематичное

Масштаб: 30

Начальная точка: 0

Конечная точка: 100



Линия ширины материала

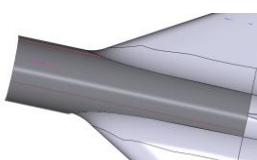
Пакет: Новый пакет_1

Слой: P_4

Ширина материала: 150 мм

Смещение

Значение: 0 мм



Разделение слоёв

Пакет: Новый пакет_1

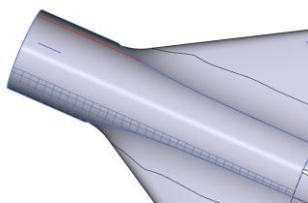
Слой: P_4

Кривые разреза

Выберите кривые

Перехлест

Значение: 0 мм



Навигатор композитов

Тип	Наименование	Родитель	Поверхность
Пакет	Пакет <411> (Нов...)	-	Поверхность <384>
Пакет	Пакет <446> (Нов...)	-	Поверхность <384>
Пакет	Пакет <449> (Нов...)	-	Поверхность <384>

Навигатор композитов

Тип	Наименование	Тип отображе	Поверхность	Точка поверхнос	Кривая направле
Система координат	Композитная СК <425> (Но...)	Стандартная	Поверхность <384>	Точка <387>	Кривая <389>
Система координат	Композитная СК <451> (Но...)	Стандартная	Поверхность <384>	Точка <395>	Кривая <405>

Навигатор композитов

Тип	Наименование	Шаг	Ориентация	Материал	Система координат	Родитель	Статус
Слой	Слой <427> (P)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...>	Пакет <411> (Но...)	Технологический слой
Слой	Слой <430> (P_1)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...>	Пакет <411> (Но...)	Технологический слой
Слой	Слой <432> (P_2)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...>	Пакет <411> (Но...)	Технологический слой
Слой	Слой <434> (P_3)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...>	Пакет <411> (Но...)	Технологический слой

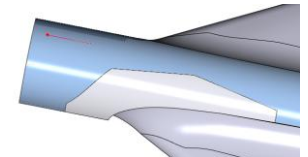
Вырез

Слой: Выберите поверхность

Точки первой кривой: Выберите точки

Точки второй кривой: Выберите точки

Предварительный просмотр



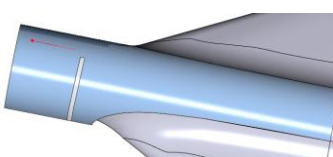
Тонкий надрез

Слой: Слой <450> (P_4_b)

Точки: Укажите точки для создания тонкого надреза

Ширина: 0.2 мм

Предварительный просмотр



Массо-инерционные характеристики пакета [10]

Масса 0.05 кг

X центра масс 0.973 м

Y центра масс 0.283 м

Z центра масс -0.024 м

Момент инерции отн. оси X 0.017 кг*м²

Момент инерции отн. оси Y 0.196 кг*м²

Момент инерции отн. оси Z 0.213 кг*м²

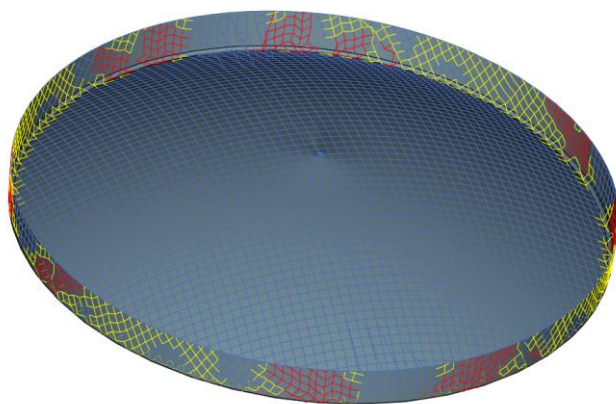
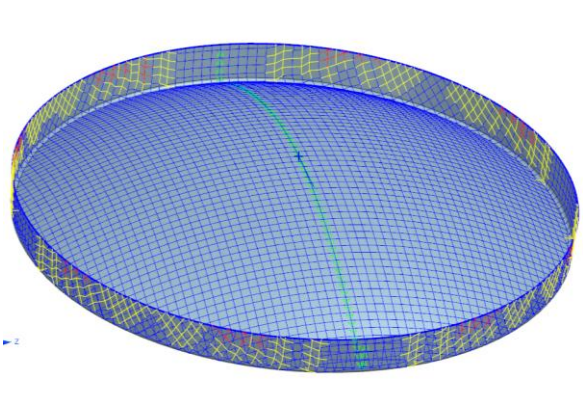
Момент инерции отн. плоскости XY -0.001 кг*м²

Момент инерции отн. плоскости YZ 0.056 кг*м²

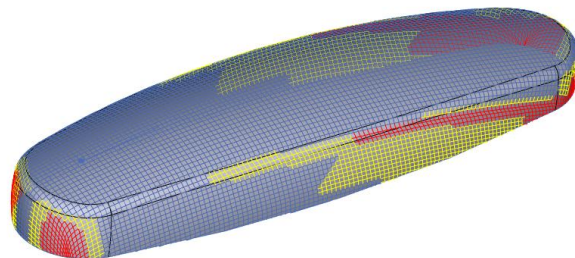
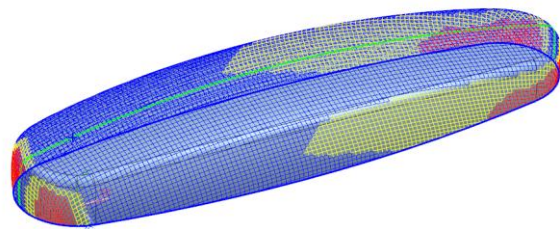
Момент инерции отн. плоскости ZX -0.005 кг*м²

Реализованные проекты

Рефлектор



Звено робота-манипулятора



FiberSim

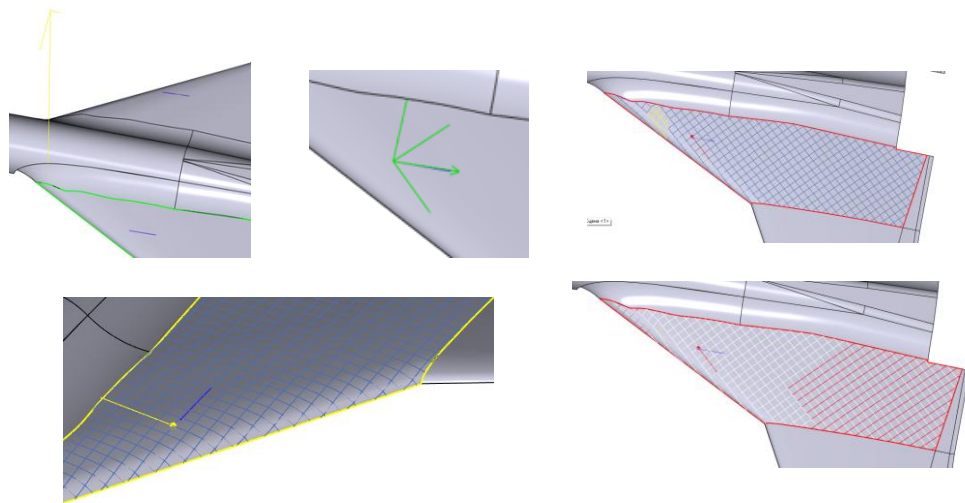
Прототип

Благодарю за внимание!

Александров Евгений
aleksandrov@bmstu.ru

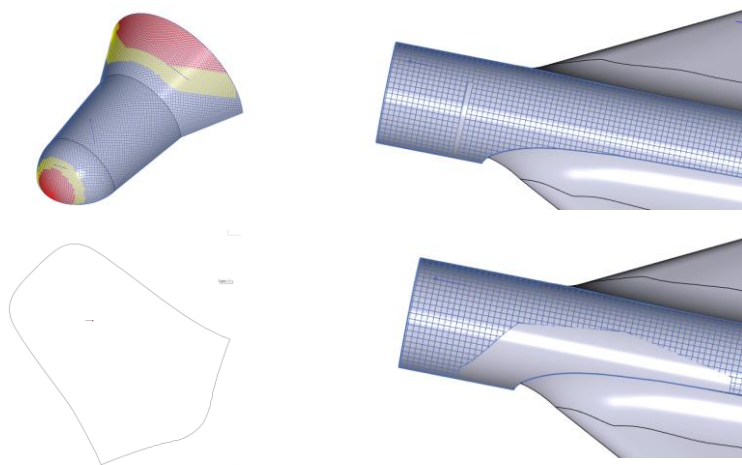


ПОСЛОЙНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ



- Создание композитного пакета
- Создание композитной системы координат
- Создание слоев
- Выбор материала
- Выбор шага
- Настройка сетки-драпировки
- Выбор типа укладки
- Выбор направления выкладки и точки укладки
- Выбор угла выкладки
- Выбор поверхности выкладки
- Выбор границ: для пакета, для слоя
- Выбор границ пакета/слоя с припуском

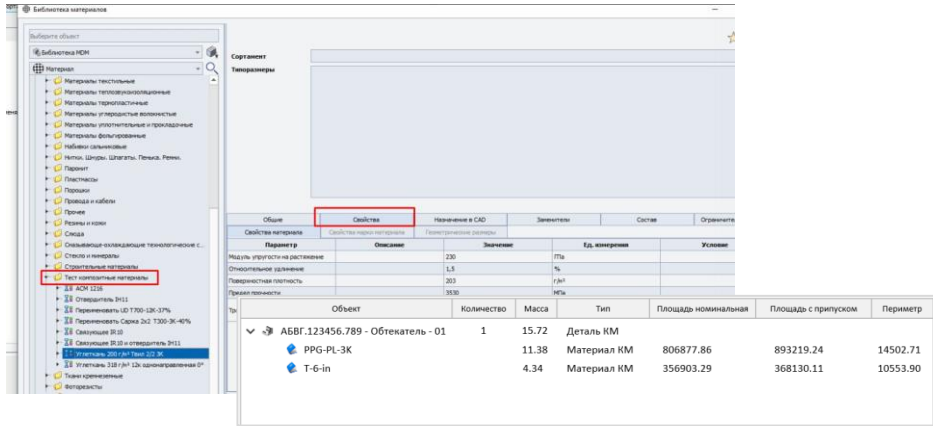
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА



- Имитация выкладки материала
- Отображение зон деформации материала
- Получение контуров разверток
- Расчет масс-инерционных характеристик пакета
- Расчет суммарных периметров по каждому материалу
- Расчет суммарной площади по каждому материалу
- Создание тонких надрезов
- Создание вырезов
- Создание сечений
- Выбор зоны сечения
- Настройка сечения: масштаб, точки разреза

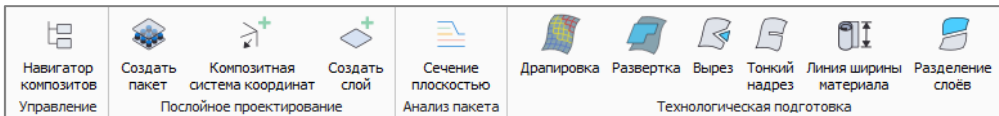
Реализованный функционал

УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ, УПРАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛАМИ



- Возможность создания композиционного материала в SAPUS.MDM
- Возможность применения композиционного материала в SAPUS.CAD
- Возможность описания структуры композитной детали в SAPUS.PDM
- Синхронизация изменений о составе и атрибутах композитной детали между SAPUS.CAD и SAPUS.PDM
- Выгрузка данных о материалах в электронную модель детали и хранение данных по используемым материалам в модели
- Выгрузка данных о результатах расчета МИХ композитной детали
- Выгрузка данных в SAPUS.PDM о результатах расчета суммарных периметров по каждому материалу
- Выгрузка данных в SAPUS.PDM о результатах расчета суммарной площади по каждому материалу

ИНТЕРФЕЙС

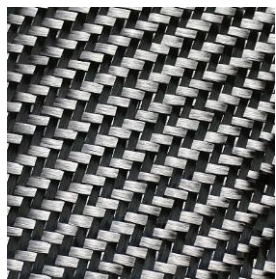


Тип	Наименование	Шаг	Ориентация	Материал	Система координат	Родитель	Статус
Слой	Слой <427> (P)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...	Пакет <411> (Но...	Технологический слой
Слой	Слой <430> (P_1)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...	Пакет <411> (Но...	Технологический слой
Слой	Слой <432> (P_2)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...	Пакет <411> (Но...	Технологический слой
Слой	Слой <434> (P_3)	100	0°	PPGPL3K	Композитная СК <...	Пакет <411> (Но...	Технологический слой

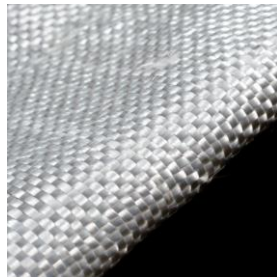
- Бесшовная интеграция с SAPUS.PLM
- Интуитивно-понятный интерфейс
- Навигатор композитов
- Послойная структура композитной детали в навигаторе композитов
- Фильтрация компонентов композитной детали
- Массовые операции с компонентами композитного пакета (слои): создание, редактирование, удаление
- Возможность внесения изменений в структуру композитного пакета в навигаторе
- Возможность визуализации соответствующих связанных объектов в навигаторе и на 3D-сцене
- Возможность сортировки компонентов композиционного пакета
- Возможность выполнения поиска по навигатору композитов

Выбор армирующих наполнителей

В рамках работы были выбраны армирующие материалы, охватывающие четыре ключевые группы волокон:
углеродные, стеклянные, арамидные и базальтовые.



Углеткани



Стеклоткани



Арамидные
ткани

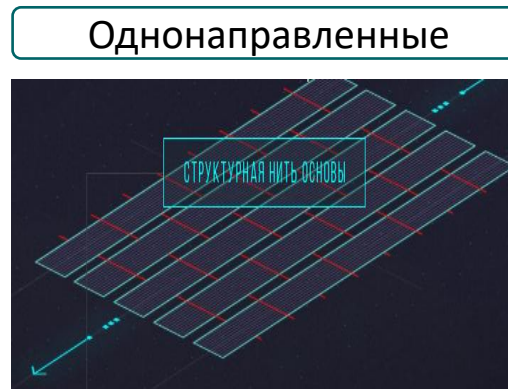
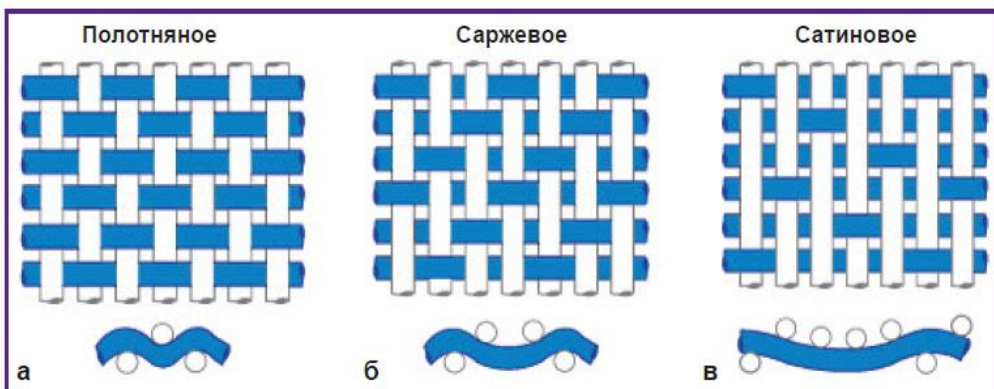


Базальтовые
ткани

Учтены основные типы плетений:

полотняное, саржевое, сатиновое, а также **однаправленные ткани**

Учтены ключевые **производители** и **марки волокон**:



Учтена поверхностная плотность:
от 80 до 1200 г/м²

- Баутекс
- Махачкалинский завод стекловолокна
- АО «Стеклонит»
- Юматекс
- ООО «Базкорд»
- ООО «Каменный век
- Utec Composite
- Aksa
- Toray
- Tenax
- DuPont
- Twaron
- Toray Composite Materials Americ

Выбор связующих систем

Разнообразие типов – эпоксидные, винилэфирные, полиэфирные;

Разный диапазон вязкости — от 200 сПз до 1400 сПз;

Разные условия отверждения — холодное и горячее;

Разнообразие физико-механических характеристик — прочность, модуль упругости, теплостойкость;

Разные производители — для обеспечения доступности материалов;

Доступность на рынке.



АО ЭНПЦ ЭПИТАЛ



АО «ХИМЭКС Лимитед»



ООО «ДУГАЛАК»



ООО «НПП Макромер»



Sika Limited

POLYMER SYSTEM

Polymer System



Turkuaz Polyester



Sino Polymer co. Ltd

KUMHO P&B
CHEMICALS

Kumho Petrochemical Co.

Решение прямой и обратной задачи

ПРЯМАЯ ЗАДАЧА. Решение прямой задачи создания ПКМ заключается в прогнозировании свойств ПКМ на основе анализа свойств его компонентов и технологических условий его производства

Для решения прямой и обратной задачи используется модуль машинного обучения, способный к поиску гипотезы решения задачи и оценке погрешности гипотезы решения

В качестве входных параметров для решения прямой задачи модуль машинного обучения использует:

- набор основных свойств компонентов ПКМ (введение данных осуществляется посредством выбора компонентов ПКМ)
- технологию формования

В качестве решения прямой задачи модуль машинного обучения возвращает:

- гипотезу решения прямой задачи, которая представляет собой набор основных свойств ПКМ

Состав

Связующее	Армирующий наполнитель																								
Тип: <input type="text"/>	Тип: <input type="text"/>																								
Наименование: <input type="text"/>	Наименование: <input type="text"/>																								
Технология																									
Технология формования: <input type="text"/>																									
Соотношение связующего к армирующему наполнителю:																									
Режим отверждения																									
<table><thead><tr><th>Этап</th><th>Время, мин</th><th>Температура, °C</th><th>Давление, МПа</th></tr></thead><tbody><tr><td>I</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>II</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>III</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>IV</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>V</td><td></td><td></td><td></td></tr></tbody></table>		Этап	Время, мин	Температура, °C	Давление, МПа	I				II				III				IV				V			
Этап	Время, мин	Температура, °C	Давление, МПа																						
I																									
II																									
III																									
IV																									
V																									
<input type="button" value="Решить прямую задачу"/>																									

Смола	
Доля смолы	
Отвердитель	
Доля отвердителя	
Ускоритель	
Процент ускорителя от смолы	
Модификатор	
Процент модификатора от смолы	
Растворитель	
Процент растворителя от связующего	

Связующее

Наименование: 5 ЭТФ (100) + ДЭГ-1 (12) + СФ-340А
Тип: Реактопласт

Армирующий наполнитель

Наименование: 1 ТБК-100
Тип: Ткань

Результат

Прочность при растяжении по основе:	507.87 МПа
Прочность при растяжении по утку:	458.77 МПа
Прочность при сжатии по основе:	223.81 МПа
Прочность при сжатии по утку:	243.12 МПа
Прочность при изгибе по основе:	479.54 МПа
Прочность при изгибе по утку:	482.25 МПа
Модуль упругости при растяжении по основе:	22.78 ГПа
Модуль упругости при растяжении по утку:	21.42 ГПа
Модуль межслоевого сдвига:	3400.98 МПа
Относительное удлинение при разрыве по основе:	3.91 %
Относительное удлинение при разрыве по утку:	3.92 %
ТКЛР по основе:	7.14 *10 ⁻⁶ , К ⁻¹
Плотность:	2012.44 кг/м ³

Решение прямой и обратной задачи

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА. Решение обратной задачи заключается в прогнозировании свойств компонентов ПКМ и технологических условий его производства на основе анализа свойств ПКМ

В качестве **входных параметров** для решения обратной задачи модуль машинного обучения использует:

- набор основных свойств полимерных композиционных материалов (вводятся пользователем системы)

Основные свойства ПКМ					
Прочность при растяжении по основе	<input type="text"/>	МПа	Модуль межслоевого сдвига	<input type="text"/>	МПа
Прочность при растяжении по утку	<input type="text"/>	МПа	Относ. удлинение при разрыве по основе	<input type="text"/>	%
Прочность при сжатии по основе	<input type="text"/>	МПа	Относ. удлинение при разрыве по утку	<input type="text"/>	%
Прочность при сжатии по утку	<input type="text"/>	МПа	КЛТР по основе	<input type="text"/>	$\cdot 10^{-6}, K^{-1}$
Прочность при изгибе по основе	<input type="text"/>	МПа	Плотность	<input type="text"/>	кг/м ³
Прочность при изгибе по утку	<input type="text"/>	МПа	Адгезия	<input type="text"/>	МПа
Модуль упругости при растяжении по основе	<input type="text"/>	ГПа	Трещиностойкость по моде 1	<input type="text"/>	кДж/м ²
Модуль упругости при растяжении по утку	<input type="text"/>	ГПа			

В качестве **решения** обратной задачи модуль машинного обучения возвращает:

- гипотезу решения обратной задачи, которая представляет собой технологию формования и состав полимерного композиционного материала

Основные свойства ПКМ

Прочность при растяжении по основе, МПа:	700
Прочность при растяжении по утку, МПа:	700
Прочность при сжатии по основе, МПа:	60
Прочность при сжатии по утку, МПа:	900
Прочность при изгибе по основе, МПа:	900
Прочность при изгибе по утку, МПа:	70
Модуль упругости при растяжении по основе, :	350
Модуль упругости при растяжении по утку, :	350
Модуль межслоевого сдвига, :	14
Относ. удлинение при разрыве по основе, %:	5
Относ. удлинение при разрыве по утку, %:	4
КЛТР по основе, :	2
Плотность, кг/м ³ :	1600
Адгезия, МПа:	50
Трещиностойкость по моде 1, МПа:	250

Основные свойства нити

Тип, :	Арамид
Прочность при растяжении волокна, :	3995.73
Модуль упругости волокна при растяжении, :	576.27
Удлинение на разрыв, %:	3.98
Количество филаментов, тыс. шт.:	18
Диаметр филаментов, мкм:	21
Тип.Нить утка, :	Стекло
Прочность при растяжении волокна.Нить утка, :	10702.69
Модуль упругости волокна при растяжении.Нить утка, :	528.85
Удлинение на разрыв.Нить утка, %:	1.66
Количество филаментов.Нить утка, тыс. шт.:	2
Диаметр филаментов.Нить утка, мкм:	13

Основные свойства ткани

Вид плетения, :	Полотняная
Модуль упругости при растяжении по основе, ГПа:	325.98
Модуль упругости при растяжении по утку, ГПа:	148.18
Прочность при растяжении по основе, МПа:	930.43
Прочность при растяжении по утку, МПа:	157.91
Удлинение на разрыв по основе, %:	3.91
Удлинение на разрыв по утку, %:	2.37

Основные свойства связующего

Прочность при растяжении, МПа:	33.84
Прочность при сжатии, МПа:	134.44
Прочность при изгибе, МПа:	10.22
Модуль упругости при растяжении, :	4.08
Плотность, кг/м ³ :	2.49

Рекомендация для ткани

Название ткани, :	18 Лента из волокна IMS65
id, :	89
Модуль упругости при растяжении по основе, :	138
Модуль упругости при растяжении по утку, :	0.1
Прочность при растяжении по основе, :	940
Прочность при растяжении по утку, :	0.1
Удлинение на разрыв по основе, :	2.1
Удлинение на разрыв по утку, :	1.8

Технология

Технология формования: Пултура/ Вытяжка : 30/70

Суперконструкционные термопласты

Области применения:

- Авиакосмическая промышленность
- Автомобилестроение
- Приборостроение
- Медицинское оборудование
- 3Д печать,
- Композиционные материалы

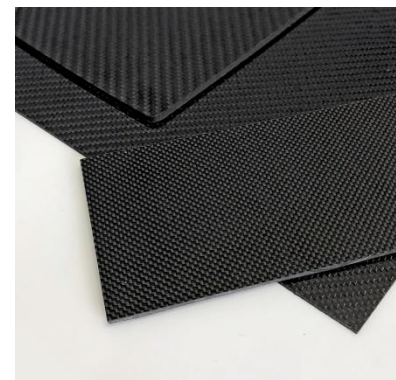
К суперконструкционным термопластам относятся:

- полиэфирсульфоны (ПЭС),
- полиэфиримиды (ПЭИ),
- полиарилаты (ПАР) и др.

Разрабатываемые марки: клеевые, литьевые, мембранные.



Корпуса оборудования



Композиционные материалы

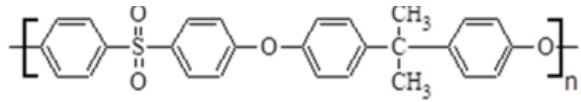
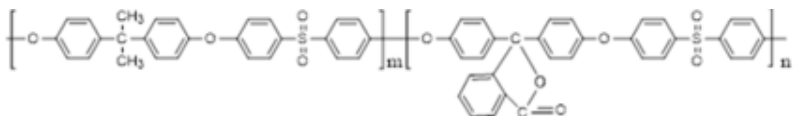
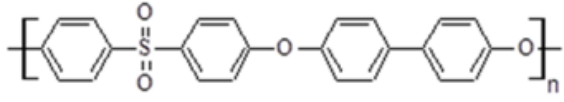
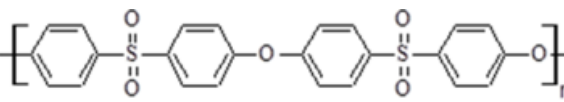
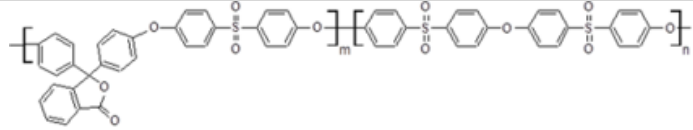
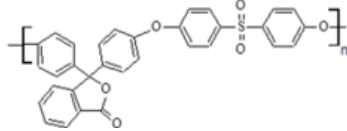


Мембраны

Суперконструкционные термопласты:

- обладают устойчивостью к радиоактивному излучению
- огнестойки
- имеют высокую химическую стойкость
- устойчивы к алифатическим углеводородам, моторным и дизельным топливам, растительным и нефтяным маслам
- температура начала активного термического разложения выше 400°C

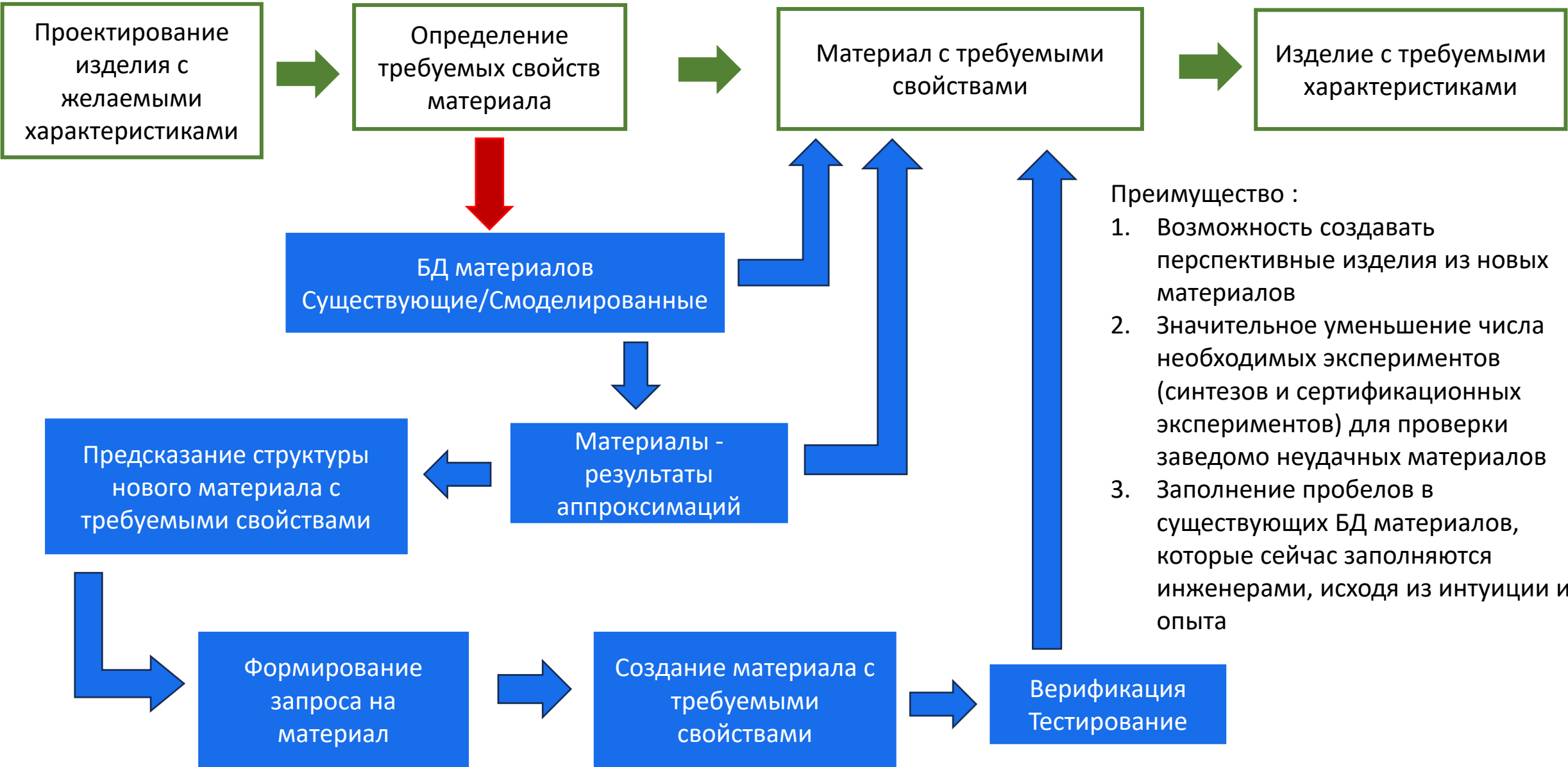
Полиэфирсульфоны, разработанные в МГТУ им. Н.Э.Баумана

№	Марка ПЭС	Структурная формула ПЭС	T _с , °C	Аналоги
1	ПЭС -185 К		185	S2010 (BASF) ПСК-1
2	ПЭС -210 К -235 К		210 235	ПСФФ-30 ПСФФ-70К Сополимеры
3	ПЭС -220 К -220 Л		220	ПФС Virantage 10200 (Solvay)
4	ПЭС -230 Л -230 Э		230	Е-2010 Е-3010 (BASF)
5	ПЭС -240 Л -250 К		240 250	Сополимеры
6	ПЭС -255 Р		255	ПСФ-Ф100

Всего 10 марок ПЭС.

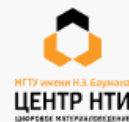
Где: К – клеевой; Л – литьевой; Э – экструзионный; Р – растворный.

Предлагаемый подход



- Преимущество :
- 1. Возможность создавать перспективные изделия из новых материалов
 - 2. Значительное уменьшение числа необходимых экспериментов (синтезов и сертификационных экспериментов) для проверки заведомо неудачных материалов
 - 3. Заполнение пробелов в существующих БД материалов, которые сейчас заполняются инженерами, исходя из интуиции и опыта

Модель машинного обучения №2 для предсказания физических свойств полимеров

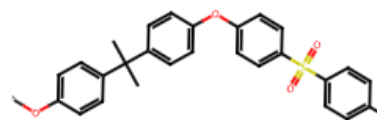


PolymerAi

ИГТУ имени Н.З. Баумана
ЦЕНТР НТИ
ЦИФРОВЫЕ МАТЕРИАЛОБРАЗОВАНИЕ

SMILES

Oc(ccc1C(C)(C)c(ccc2Oc(ccc3S(=O)(=O)c(ccc4)cc4)cc3)cc2)cc1



Polymer properties

	Predicted median	Interval
Intrinsic viscosity, dl/g	0.43	[0.15 : 0.91]
Tensile stress strength at break, GPa	0.06	[0.04 : 0.10]
Melting temperature, °C	272.86	[196.38 : 318.54]
Density, g/cm3	1.22	[1.17 : 1.29]
Specific volume, cm3/g	0.80	[0.75 : 0.83]
Thermal decomposition temperature, °C	492.39	[417.54 : 530.74]
Glass transition temperature, °C	182.63	[135.55 : 217.00]
Elongation at break, %	7.77	[2.97 : 22.93]
Thermal decomposition weight loss, %	7.28	[4.16 : 13.49]
Tensile modulus, GPa	1.99	[1.05 : 3.07]

Math It

Выбор марок суперконструкционных термопластов для обработки технологии их изготовления

Полукристаллические :






- Замечательная устойчивость к агрессивным средам
- Отличные реологические свойства расплава
- Рабочая температура > Температуры стеклования
- Низкая трещиностойкость
- Слабая устойчивость к циклическим нагрузкам

Аморфные :

- Высокая вязкость расплава
- Рабочая температура < Температуры стеклования
- Высокая трещиностойкость
- Высокая ударная прочность
- Высокая усталостная прочность

Критерии оценки:

- Коммерческая привлекательность
- Технологическая реализуемость
- Экологичность производства
- Доступность сырья

Полимер/Свойство	Полиэфиркетон (ПЭК)	Полифениленсульфид (ПФС)	Полиэфиримид (ПЭИ)	Полиэфирсульфон (ПЭС)	Полиарилат (ПАР)
					
Структура	Полукристаллическая	Полукристаллическая	Аморфная	Аморфная	Аморфная
Температура стеклования	143	90	215	230	260
Температура плавления	343	283	-	-	-
Температура переработки	390	315	360	360	360
Химическая стойкость	высокая	высокая	средняя	высокая	средняя
Ударная прочность	средняя	средняя	высокая	высокая	высокая
Устойчивость к циклическим нагрузкам	средняя	средняя	высокая	высокая	высокая
Вязкость расплава	средняя	низкая	высокая	высокая	высокая
Температура долгосрочной эксплуатации	230	220	200	215	200
Недостатки	Очень высокая стоимость	Слабая трещиностойкость	Низкая доступность сырья	-	Низкая термостойкость

Разработка и производство суперконструкционных термопластов в России

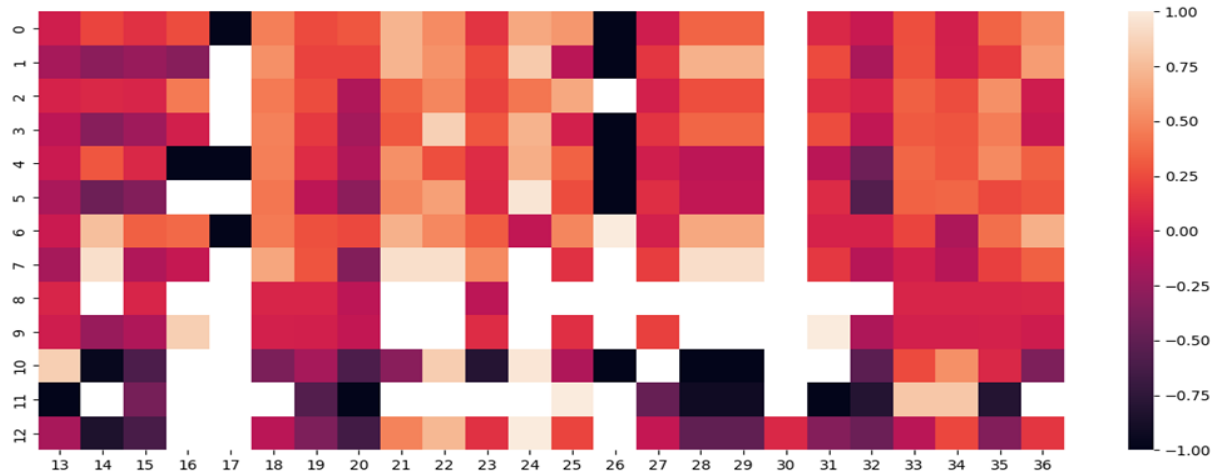
№	Формула	Название	T _c , °C	T _{пл} , °C	Производство, НИОКР	Потребность, т/год
1		ПЭКК	142	343	НИИПМ, КБГУ	100
2		ПЭКК	155	350	СИБУР г. Томск	20
3		ПФС	90	280	НТЦ «Ахмадуллины» г.Казань	200
4		ПА Фенилон	270	430	ООО «Унипласт» г.Владимир	20
5		10 марок ПЭС «Баупласт»	195-255	-	МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИПМ	До 150
6		8 марок ПЭИ «Баумид»	205-260	-	МГТУ им. Н.Э. Баумана	До 100

- Производство суперконструкционных термопластов в России не закрывает потребности промышленности.
- Доля импорта в структуре рынка 93-98%.

Свойства разработанных полиэфирсульфонов

№	Наименование показателя, размерность	Марка полиэфирсульфона			
		ПЭС-220Л	ПЭС-230Л	ПЭС-250К	ПЭС-255К
1	Внешний вид товарного продукта	Гранулы	Гранулы	Порошок	Порошок
2	Размер частиц порошка, мкм	50-150	50-150	50-150	50-150
3	Насыпная плотность порошка, г/л	570	570	110	110
4	Температура стеклования, °С (ДСК)	220	230	250	255
5	Температура 5% потерь массы расплава полимера (ТГА)	459	466	475	477
6	Приведенная вязкость 0,5% раствора в ДМФА при 25°С, дл/г	0,38	0,35	0,31	0,32
7	Показатель текучести расплава, г/10мин при 340°С	11	18	-	-
8	Прочность при разрыве, МПа	50-70	50-70	40-50	40-50
9	Относит. удлинение при разрыве, %	4,0-5,5	4,5-5,7	5,0-6,5	6,0-7,3
10	Модуль упругости при разрыве, ГПа	2,9-3,3	2,8-3,2	2,7-3,0	2,6-2,9

Применение в системе методов машинного обучения позволяет выстраивать алгоритмы способные предсказывать искомые значения свойств материалов на основе взаимозависимостей между числовыми значениями свойств ПКМ и их компонентов.



Матрица корреляций основных свойств ПКМ с основными свойствами связующего и его компонентов

Формирование данных для МО

В ходе литературного анализа и испытаний были получены данные о свойствах ПКМ. Были собраны данные о составе и технологии изготовления ПКМ, данные о составе и свойствах связующих, включая информацию о смолах и отвердителях, составах и основных свойствах армирующих наполнителей и другие данные.

Полученные данные были очищены от неинтересных со статистической точки зрения сведений. Категориальные признаки были преобразованы в числовые. В результате обработки данных была получена числовая матрица величиной порядка 100 строк и 86 столбцов

- Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80 на 20. Для прогнозирования основных характеристик ПКМ применен метод регрессии* LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator), реализованный в библиотеке scikit-learn (sklearn). Scikit-learn предоставляет программный интерфейс для применения различных методов машинного обучения, включая линейную регрессию с L1-регуляризацией, реализованную в алгоритме Lasso. Особенность алгоритма LASSO заключается в том, что помимо предсказания зависимой переменной, он также выполняет отбор наиболее важных признаков.
- Полученная модель демонстрировала высокую точность: **точность модели составила 96 %**

ЦЕЛЬ – изготовление и испытания разнообразных по составу и способам производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) для получения достоверных данных об их физико-механических и теплофизических свойствах с целью формирования расширенной базы данных в рамках разрабатываемой цифровой платформы по выбору и прогнозированию свойств ПКМ.

Основные задачи:

1. Определить и обосновать выбор армирующих наполнителей и связующих систем, обеспечивающих получение репрезентативной выборки ПКМ различного состава и технологии изготовления.
2. Разработать программу и методики испытаний, обеспечивающие получение комплекса характеристик ПКМ, достаточного для корректного применения в расчетных модулях CAE-системы.
3. Изготовить партии элементарных образцов ПКМ и их компонентов в соответствии с разработанной программой и методиками испытаний.
4. Провести испытания образцов ПКМ и их компонентов, обеспечив требуемую точность измерений для последующей интеграции результатов в цифровую платформу.

Разработка программы и методик испытаний (ПМИ)

1.

- Определение перечня характеристик ПКМ, достаточного для корректного применения в расчетных модулях САЕ-системы;

2.

- Анализ стандартов (ГОСТ, ISO, ASTM) по механическим, термическим и физическим испытаниям;

3.

- Разработка ПМИ в соответствии с требованиями стандартов и специфики проекта, включая методики для испытаний по толщине с использованием образцов толщиной 20 мм;

4.

- Формирование итоговой ПМИ для всех групп материалов (ПКМ, ткани, нити/жгуты, связующие).

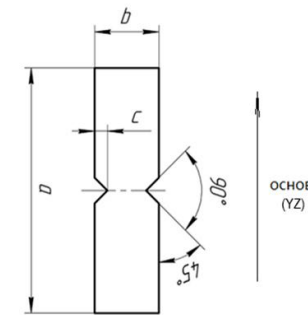


Схема образцов для определения упруго-прочностных свойств при сдвиге в плоскости YZ

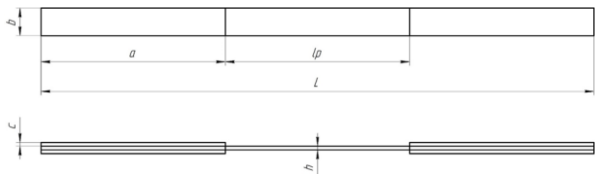


Схема образца из материала экспериментальных образцов по направлению основы и утка

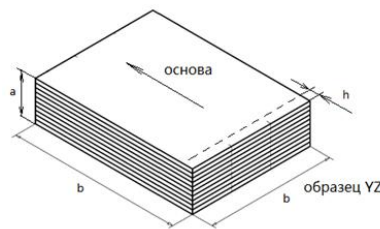


Схема образца из материала экспериментальных образцов в направлении оси Z (по толщине)

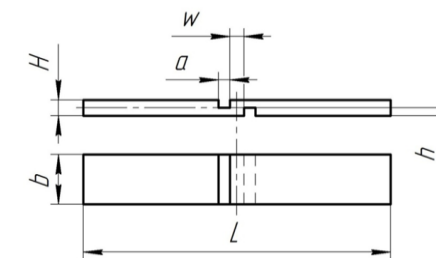
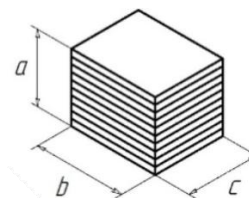
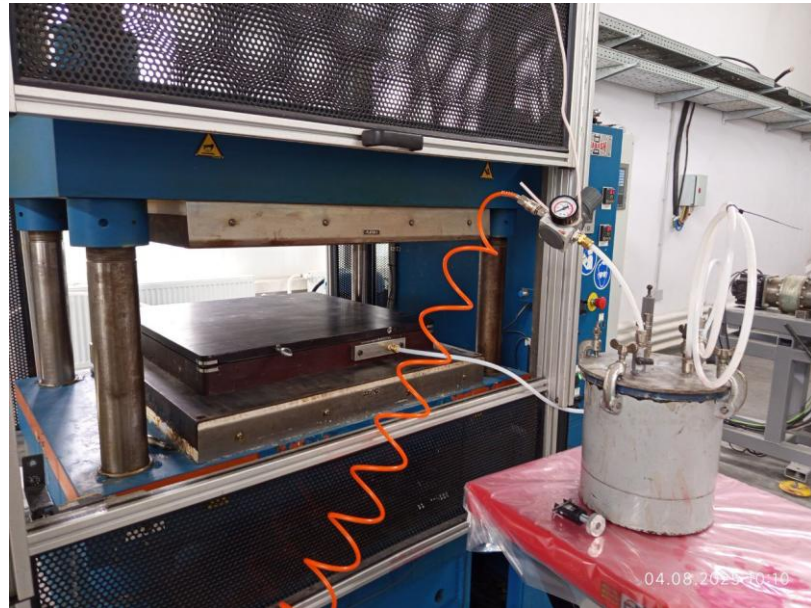


Схема образцов для определения упруго-прочностных свойств при сдвиге в плоскости XY

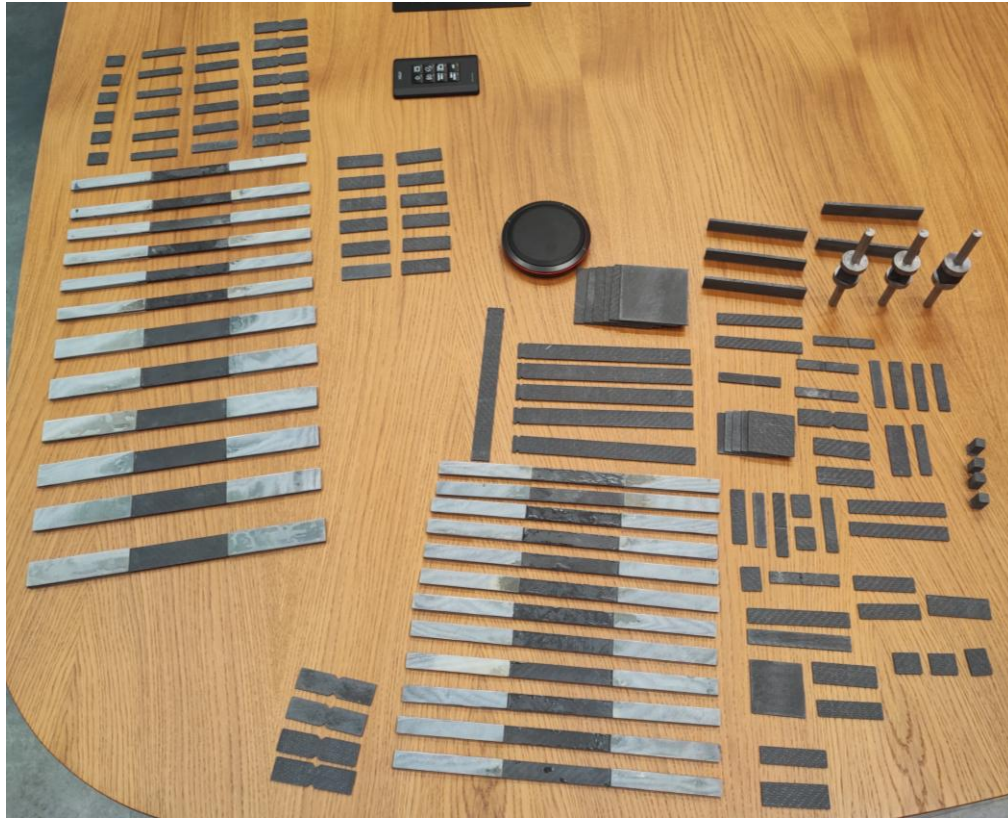
Изготовление образцов ПКМ. Инжекция под давлением, прессование.



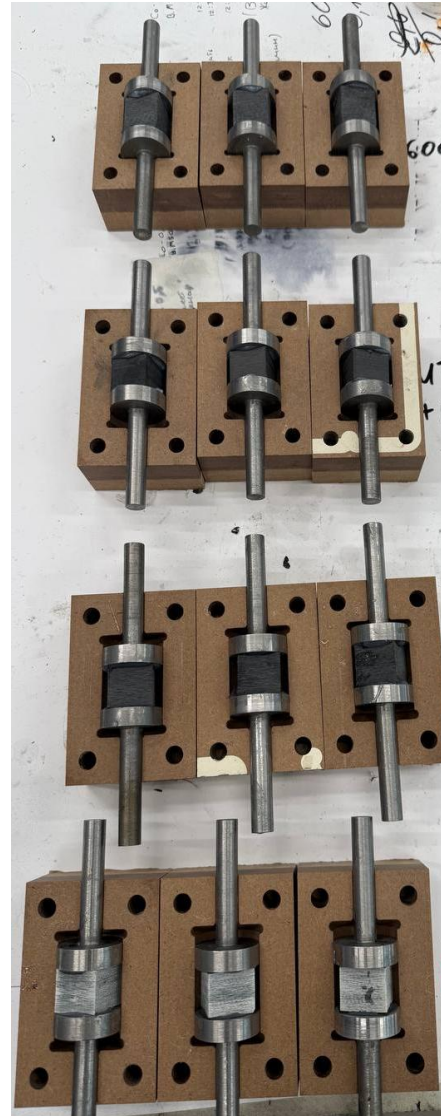
Изготовление ПКМ методом
инжекции под давлением



Изготовление ПКМ методом
прессования



Набор элементарных образцов одного комплекта ПКМ для испытаний

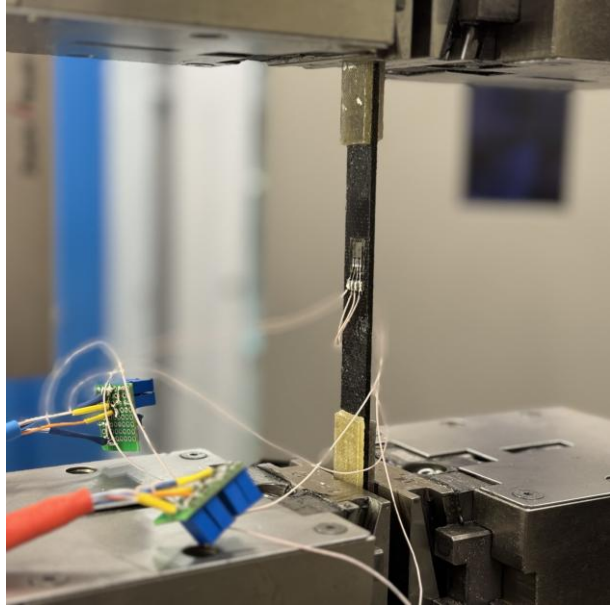


Образцы ПКМ для испытаний по толщине



Подготовка образцов ПКМ для испытаний





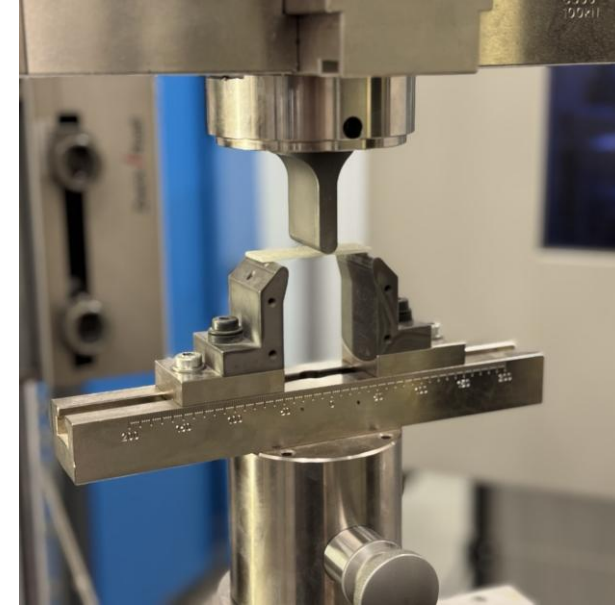
Процесс испытания образца
ПКМ на коэффициент
Пуассона



Процесс испытания образца
ПКМ на сдвиг



Процесс испытания образца
ПКМ на сжатие



Процесс испытания образца
ПКМ на изгиб

Номенклатура материалов и перечень определяемых характеристик

№	Вид испытаний	Параметр	Номер пункта методики
ПКМ			
1	Растяжение	Прочность при растяжении по основе	6.1
2		Модуль упругости при растяжении по основе	6.1
3		Относительное удлинение при разрыве по основе	6.1
4		Прочность при растяжении по утку	6.1
5		Модуль упругости при растяжении по утку	6.1
6		Относительное удлинение при разрыве по утку	6.1
7		Прочность при растяжении по толщине	6.1
8		Модуль упругости при растяжении по толщине	6.1
9		Относительное удлинение при растяжении по толщине	6.1
10	Изгиб	Прочность при изгибе по основе	6.2
11		Модуль упругости при изгибе по основе	6.2
12		Прочность при изгибе по утку	6.2
13		Модуль упругости при изгибе по утку	6.2
14	Сжатие	Прочность при сжатии по основе	6.3
15		Модуль упругости при сжатии по основе	6.3
16		Предельная деформация при сжатии по основе	6.3
17		Прочность при сжатии по утку	6.3
18		Модуль упругости при сжатии по утку	6.3
19		Предельная деформация при сжатии по утку	6.3
20		Прочность при сжатии по толщине	6.3
21		Модуль упругости при сжатии по толщине	6.3
22		Предельная деформация при сжатии по толщине	6.3

Номенклатура материалов и перечень определяемых характеристик

№	Вид испытаний	Параметр	Номер пункта методики
23	Сдвиг (ASTM)	Прочность при сдвиге в плоскости XY	6.4
24	Сдвиг	Модуль упругости при сдвиге в плоскости XY	6.4
25		Предельная деформация при сдвиге в плоскости XY	6.4
26		Прочность при сдвиге в плоскости YZ	6.5
27		Модуль упругости при сдвиге в плоскости YZ	6.5
28		Предельная деформация при сдвиге в плоскости YZ	6.5
29		Прочность при сдвиге в плоскости XZ	6.6
30		Модуль упругости при сдвиге в плоскости XZ	6.6
31		Предельная деформация при сдвиге в плоскости XZ	6.6
32		Коэффициент Пуассона при растяжении	Коэффициент Пуассона в плоскости XY
33	Коэффициент Пуассона в плоскости YZ		6.8
34	Коэффициент Пуассона в плоскости XZ		6.9
35	КЛТР	КЛТР по основе	6.10
36		КЛТР по утку	6.10
37		КЛТР по толщине	6.10
38	Методы определения плотности	Плотность	6.11

Номенклатура материалов и перечень определяемых характеристик

Ткани			
40	Растяжение	Прочность при растяжении по основе	6.13
41		Модуль упругости при растяжении по основе	6.13
42		Удлинение при разрыве по основе	6.13
43		Прочность при растяжении по утку	6.13
44		Модуль упругости при растяжении по утку	6.13
45		Удлинение при разрыве по утку	6.13
Нити/жгуты на основе стеклянных, базальтовых, углеродных и арамидных волокон			
46	Растяжение нитей/жгутов	Прочность при растяжении	6.14
47		Модуль упругости при растяжении	6.14
48		Относительное удлинение при разрыве	6.14
49	Растяжение микропластиков	Прочность волокон при растяжении в микропластике	6.15
50		Модуль упругости волокон при растяжении в микропластике	6.15
51		Относительное удлинение волокон при разрыве в микропластике	6.15
52	Растяжение волокон	Прочность волокон при растяжении (прочность моноволокна)	6.16
53		Модуль упругости волокон при растяжении (модуль упругости моноволокна)	6.16
54		Относительное удлинение волокон при разрыве (относительное удлинение моноволокна)	6.16
55		Определение объемной плотности волокон	Плотность

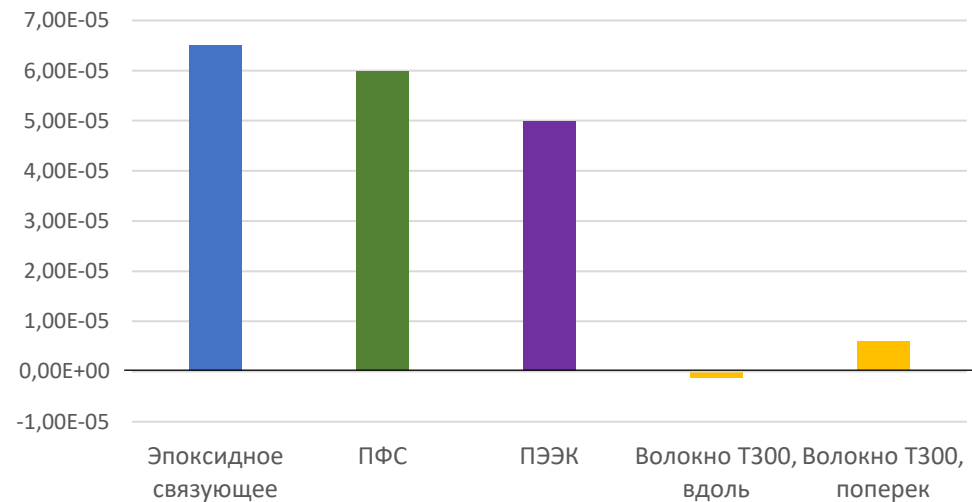
Номенклатура материалов и перечень определяемых характеристик

Связующие (полимерные матрицы)			
56	Растяжение	Прочность при растяжении	6.18
57		Модуль упругости при растяжении	6.18
58		Относительное удлинение при разрыве	6.18
59	Изгиб	Прочность при изгибе	6.19
60		Модуль упругости при изгибе	6.19
61	Сжатие	Прочность при сжатии	6.20
62		Модуль упругости при сжатии	6.20
63		Предельная деформация при сжатии	6.20
64	ТКЛР	ТКЛР	6.21
65	Плотность	Плотность в отвержденном состоянии	6.22
66	Теплостойкость	Теплостойкость по Мартенсу или температура стеклования	6.23

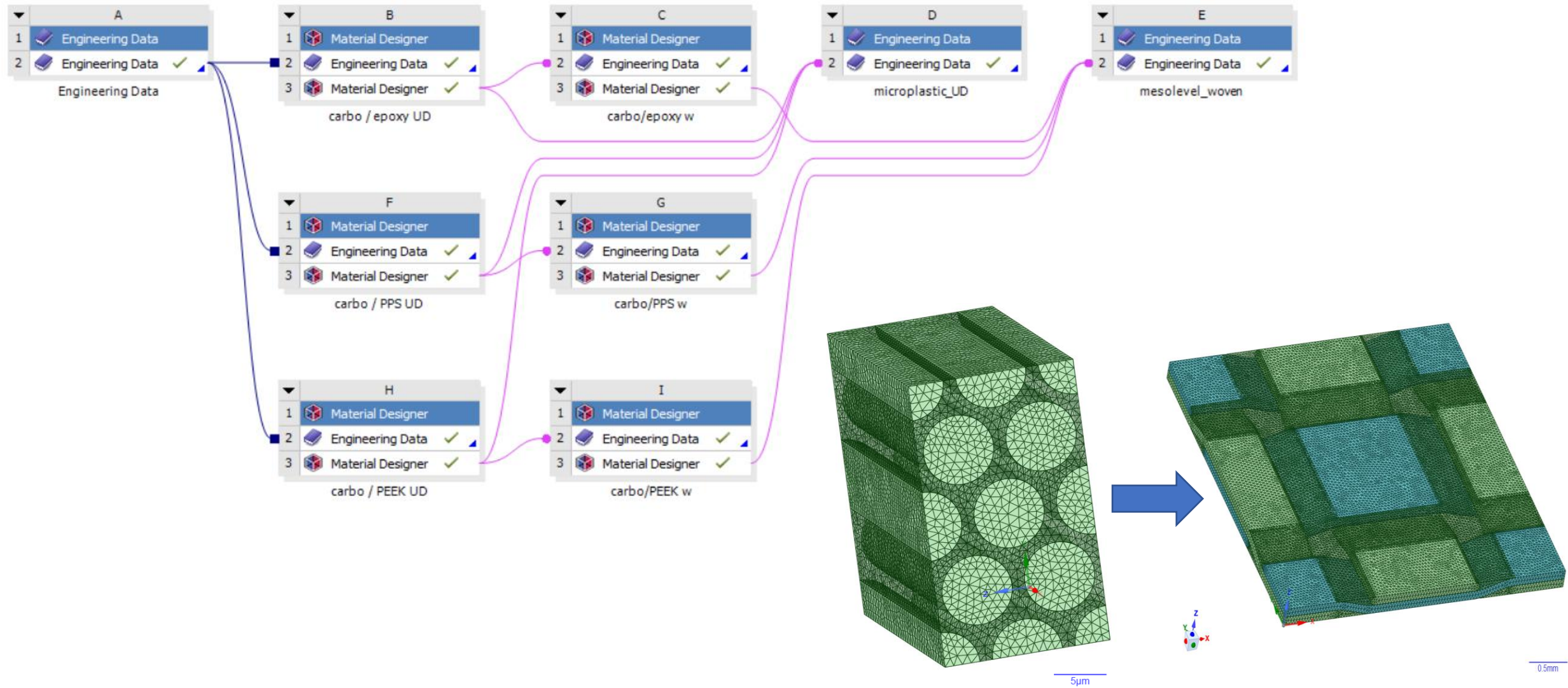
Исходные данные компонентов ПКМ

	Волокно углеродное класса T300	Смола эпоксидная (средний уровень КТЛР)	Полифенил-сульфид Techtron 1000	Полиэфирэфир-кетон KetaSpire KT-880
КТЛР x	-1,20E-06	6,50E-05	6,00E-05	5,00E-05
КТЛР y, z	6,00E-06			
Плотность	1800	1160	1350	1300
Модуль упругости x	2,30E+11	3,78E+09	4,00E+09	3,85E+09
Модуль упругости y, z	2,30E+10			
Модуль сдвига xy, xz	9,00E+09	1,40E+09	1,46E+09	1,41E+09
Модуль сдвига yz	8,21E+09			

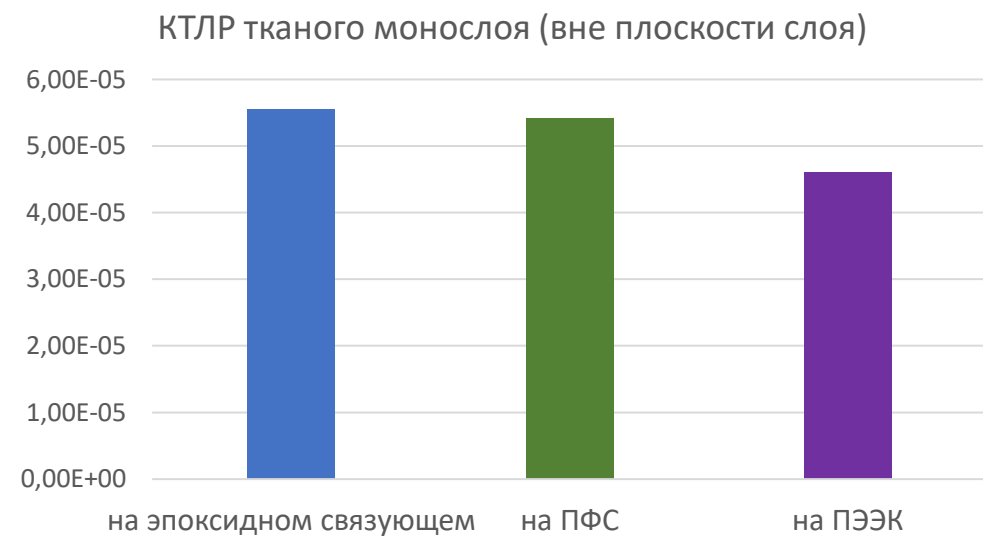
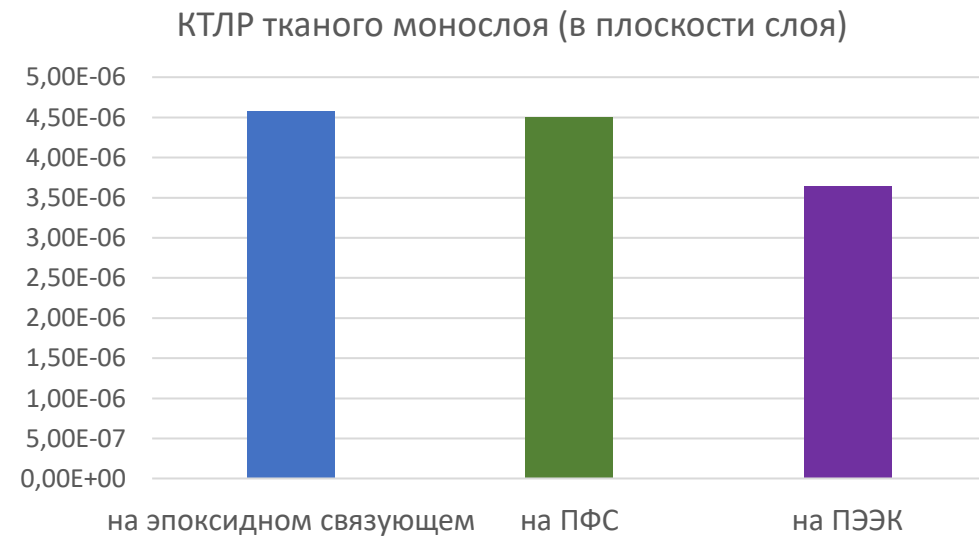
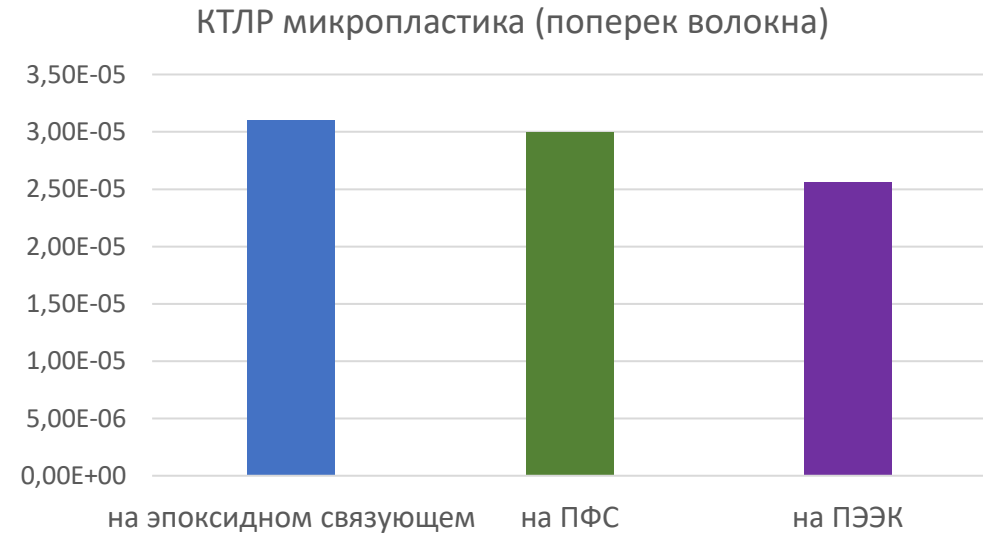
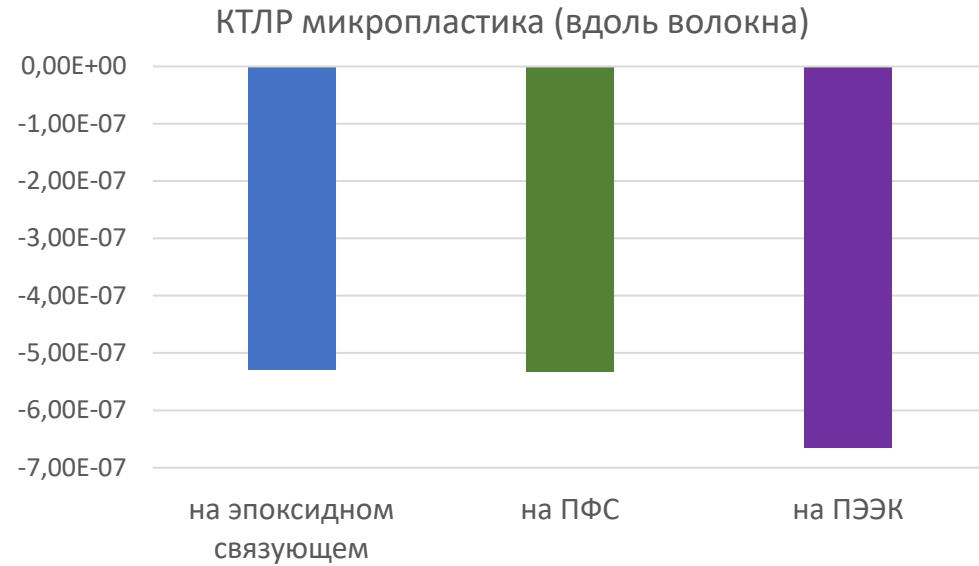
КТЛР исходных материалов



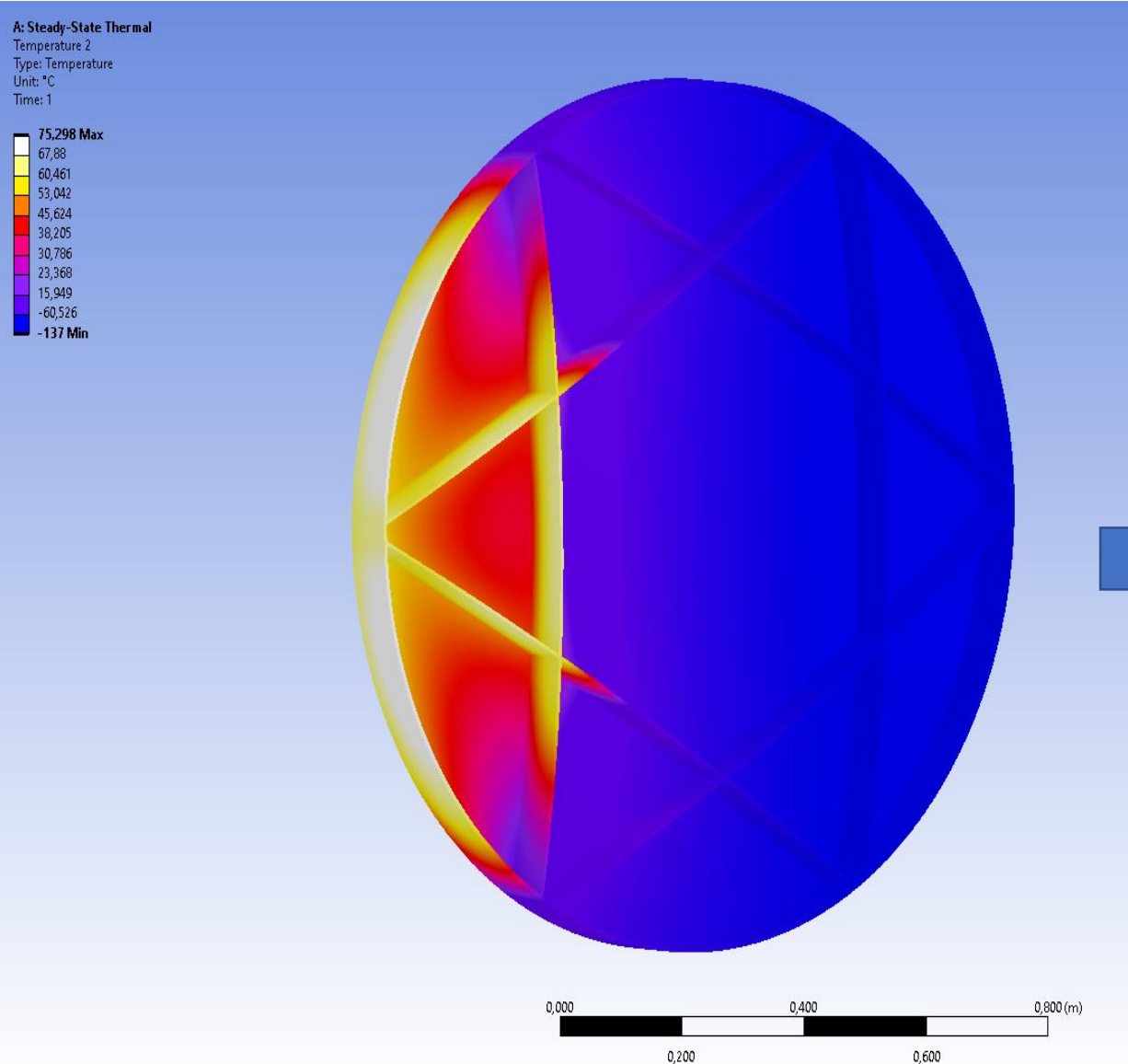
Определение характеристик ПКМ



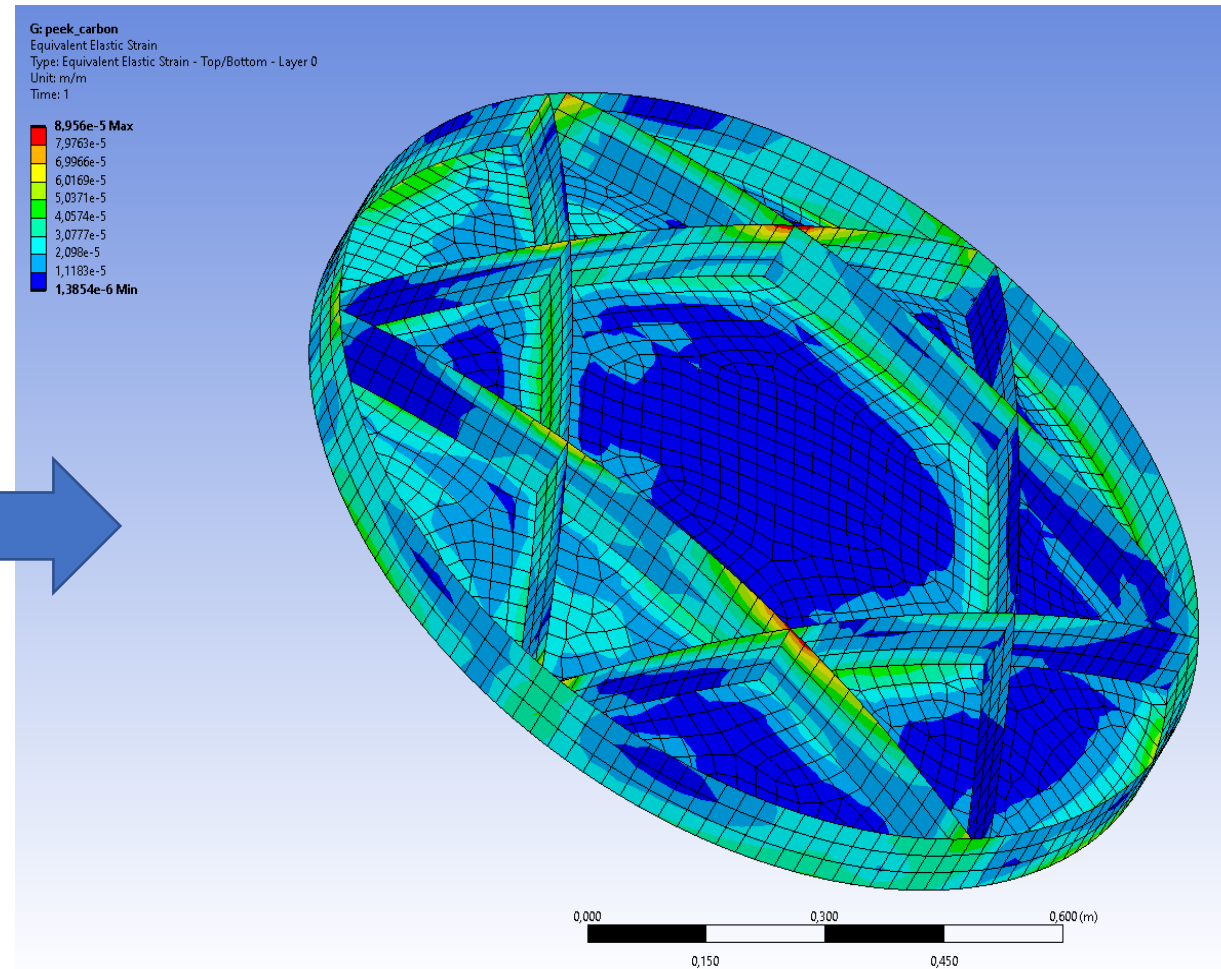
Определение характеристик ПКМ



Термопрочностной анализ конструкции



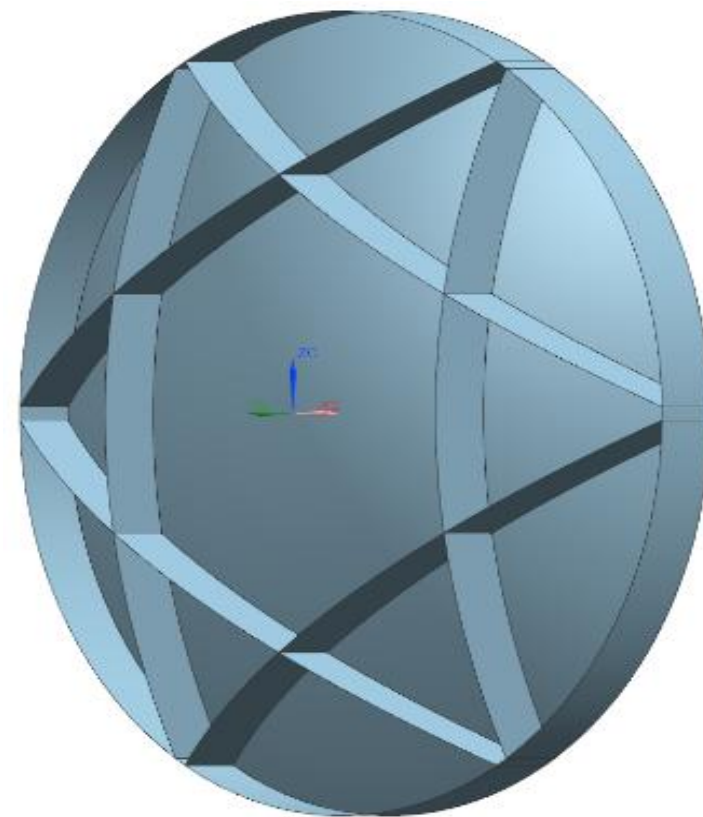
Поле температуры в конструкции (-137 °C .. 75 °C)



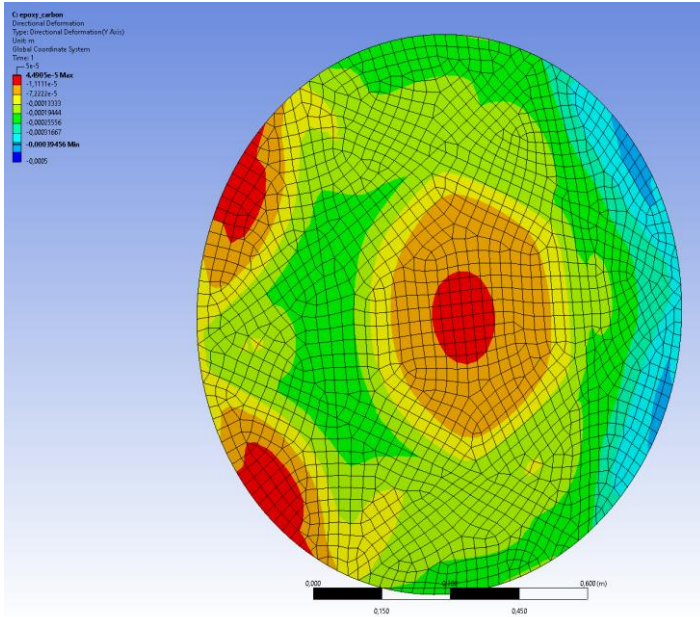
Поле деформаций в конструкции (max < 0,01%)

Практическая задача

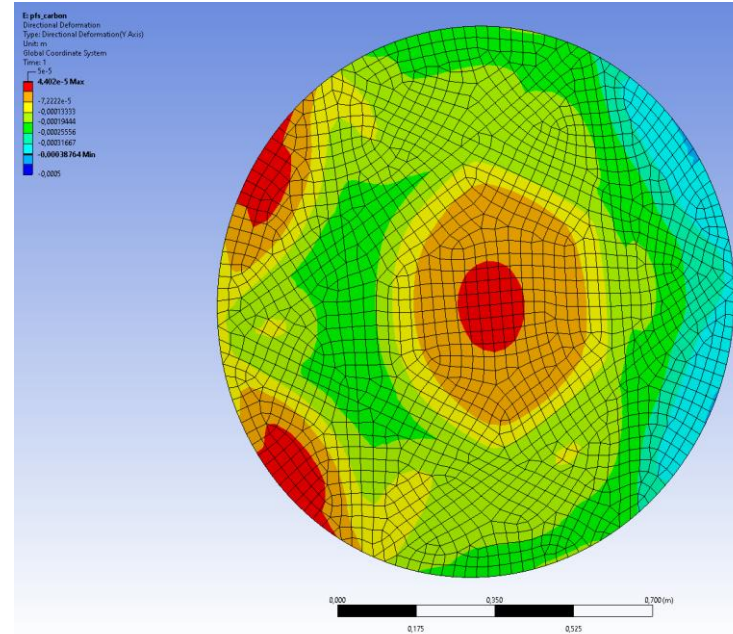
Расчет параболического рефлектора системы космической связи



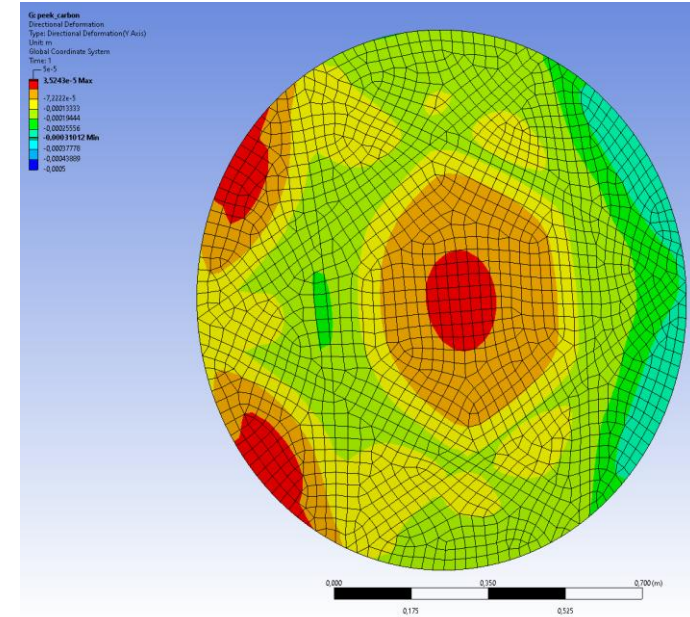
Термопрочностной анализ конструкции



Поле перемещений (эпокси)



Поле перемещений (ПФС)



Поле перемещений (ПЭЭК)

Перемещения (max - min), мм

