

Проектирование изделий из композиционных материалов с использованием Digimat

М.Н. Коледов, технический консультант

8 Октября 2014

Цели аэрокосмической промышленности сосредоточены на снижении затрат и вредных выбросов

- **Цели на 2050, ACARE (Консультационный совет по авиационным исследованиям и инновациям в Европе):**

- Снизить выбросы CO₂ на 75%
- Снизить выбросы NO_x на 90%
- Снизить шум на 65%

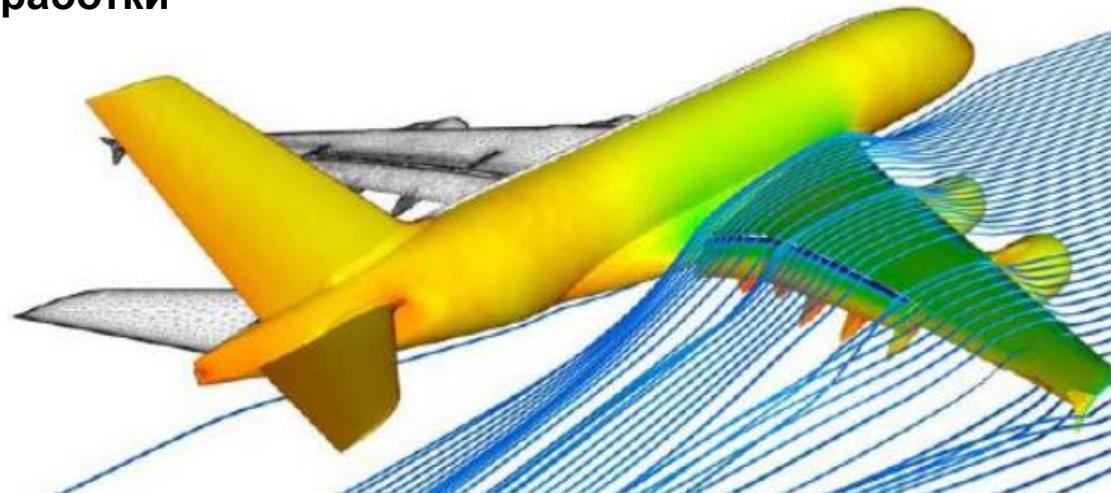


ACARE

- **Снизить потребление топлива и другие операционные расходы**

- **Снизить стоимость и время разработки**

- Материалов
- Двигателей
- Самолетов

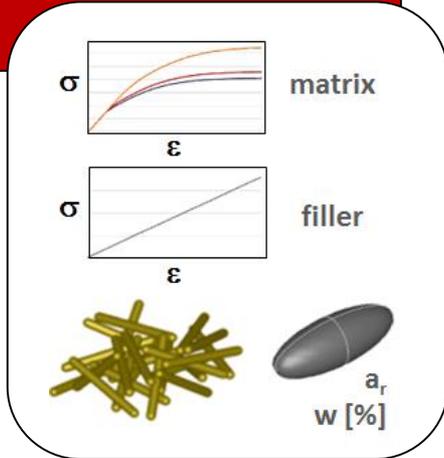


Сложности при разработке материалов

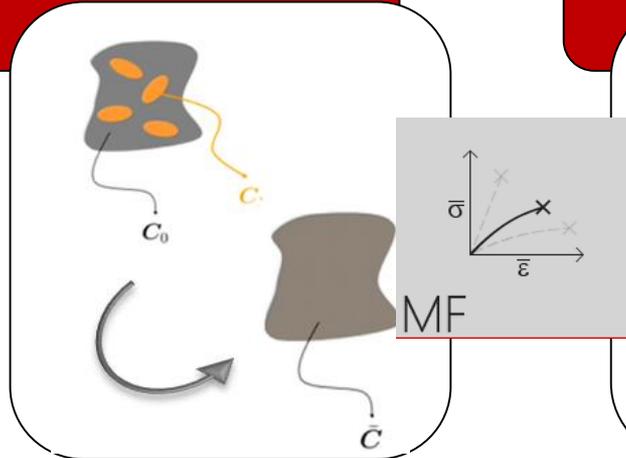
- **Нужно управлять данными по материалам**
 - Собирать и хранить
 - Управлять, отслеживать, защищать
 - Предоставлять сертифицирующим органам
- **Модель композитного материала характеризуется:**
 - Нелинейность, прогрессивное накопление повреждений и разрушение
 - Анизотропия
 - Гетерогенность
 - Зависимость от технологии изготовления
- **Создание модели композита как оптимальной смеси компонентов**
 - Создание материала с заданными свойствами
 - Соответствие оптимальному процессу изготовления

Моделирование свойств многофазного материала

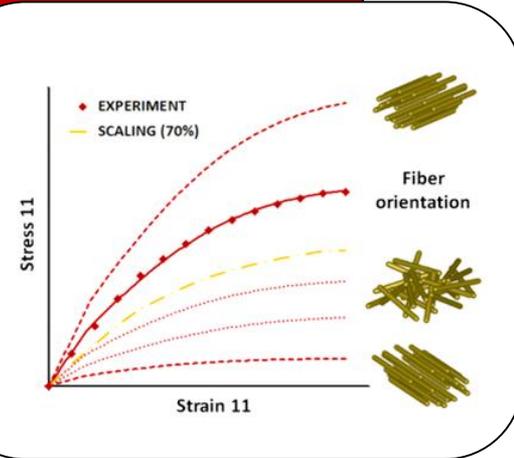
Входные данные



Гомогенизация



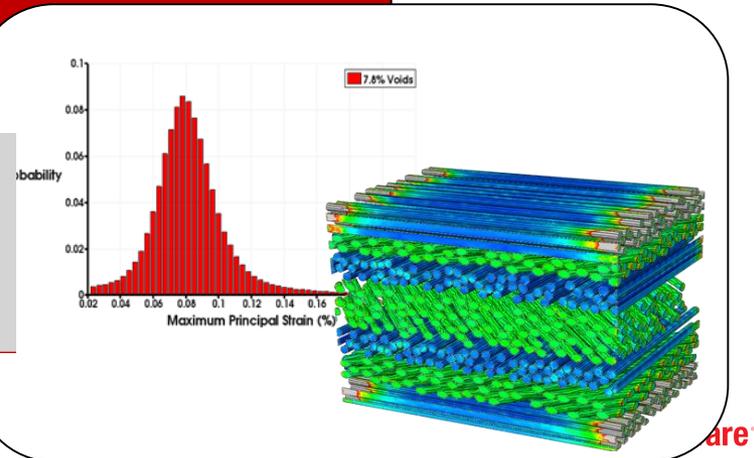
Результаты



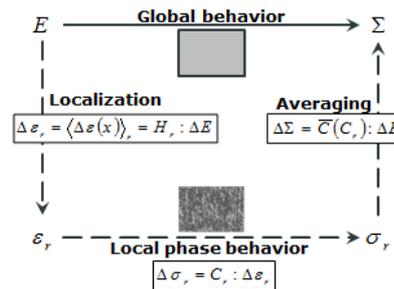
Представительный элемент объема



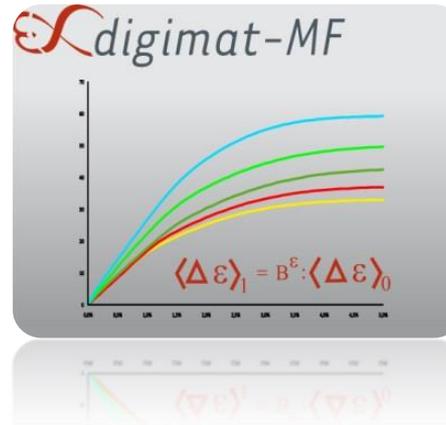
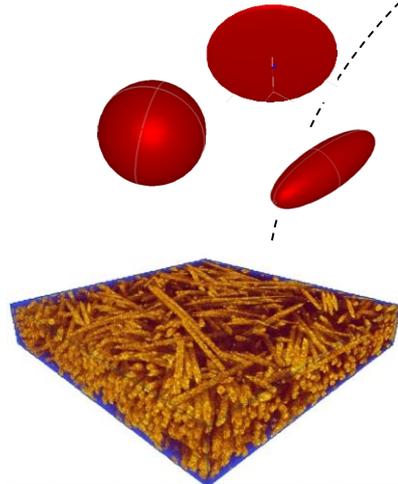
Результаты



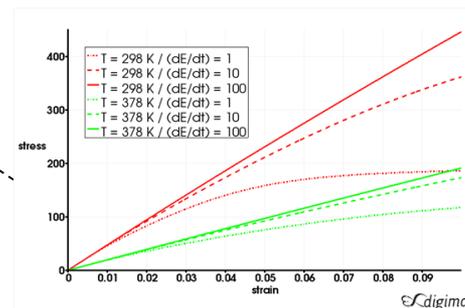
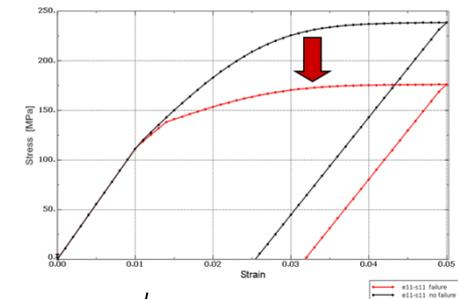
Digmat-MF: Разработка модели материала



Гомогенизация методом самосогласованного поля



Критерии разрушения

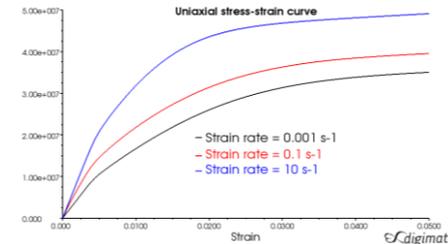


Нелинейная модель материала

Digimat: Основные возможности

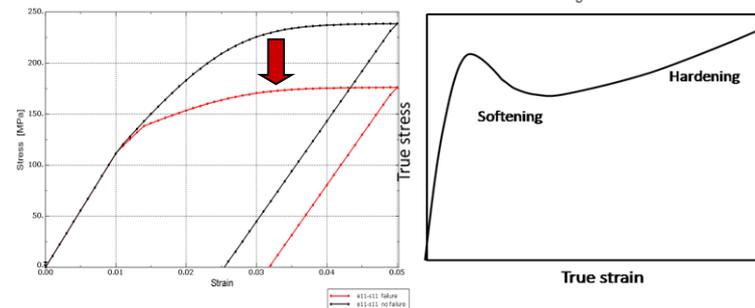
- **Модели материала (для каждой фазы композита)**

- Механические характеристики
 - Линейные, нелинейные, зависящие от скорости деформаций
 - Малые/большие деформации
- Тепловые характеристики
- Тепломеханические характеристики
- Электрические характеристики



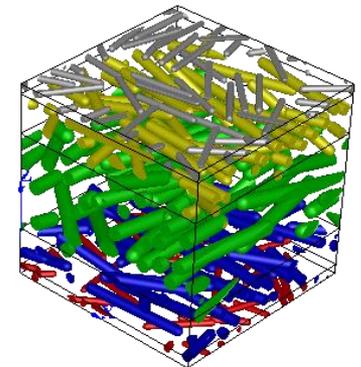
- **Критерии разрушения**

- Максимальных напряжений/деформаций, Цая-Хилла, Цая-Ву...
- Уровни моделей разрушения: микро (волокно/матрица), псевдозерна, макро (композит)

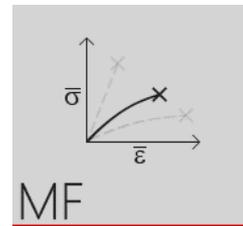


- **Микроструктуры**

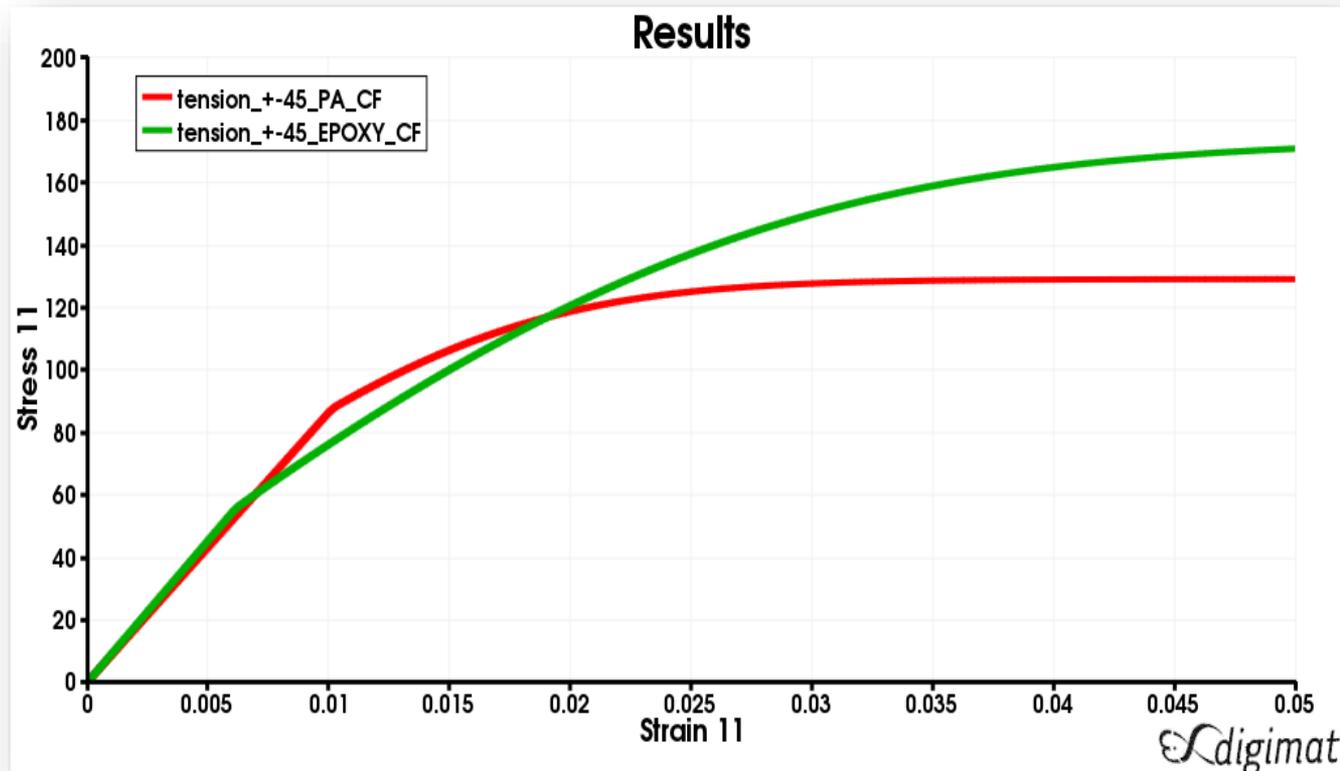
- Многофазные материалы (2 и более фазы)
- Типы армирующих добавок: волокна/[различные наполнители]/пустоты
- Длина волокон: короткие/длинные/непрерывные
- Ориентация волокон: постоянная/случайная/закон распределения



Пример - Пластик, усиленный углеродными волокнами. Влияние свойств матрицы



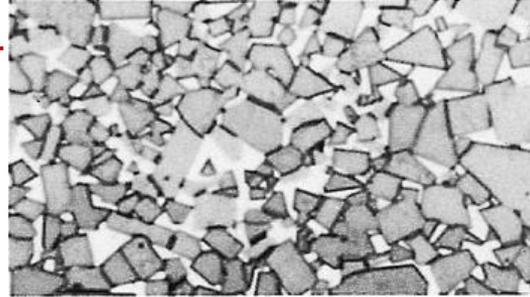
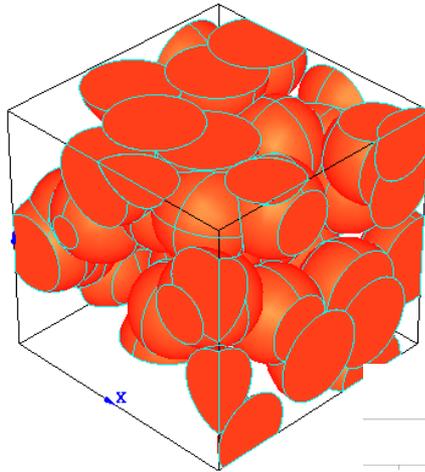
- **Материал: Однонаправленная ткань с углом ориентации 45 градусов**
 - Матрица: Полиамидная или Эпоксидная
 - Закон поведения: Упруго-пластический
 - Волокно: Углеродное
 - Закон поведения: Упругий, в поперечно-изотропный



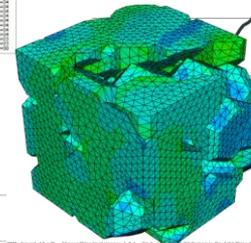
Разработка инструментальной металлокерамики

Сплав карбид вольфрама/кобальт

DIGIMAT-MF

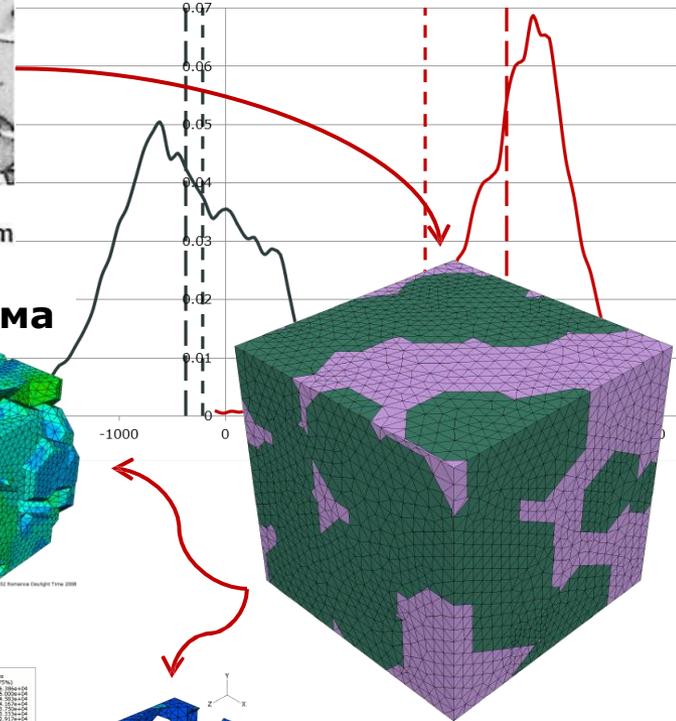


Карбид вольфрама

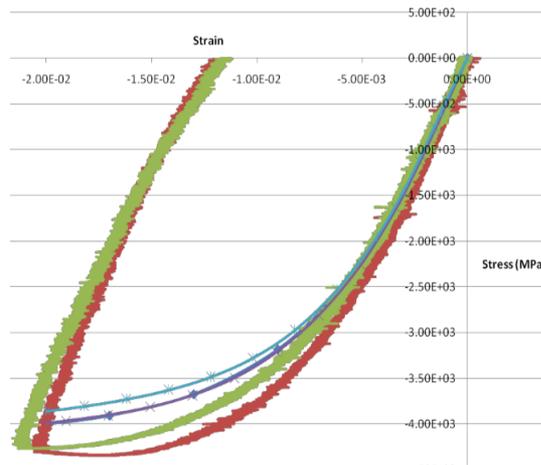


DIGIMAT-FE

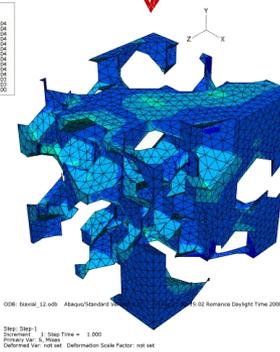
Распределение напряжений по фазам



MacroStress - Strain curves



Кобальт

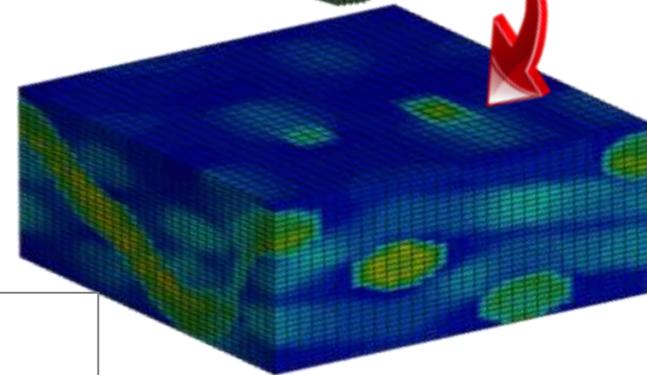
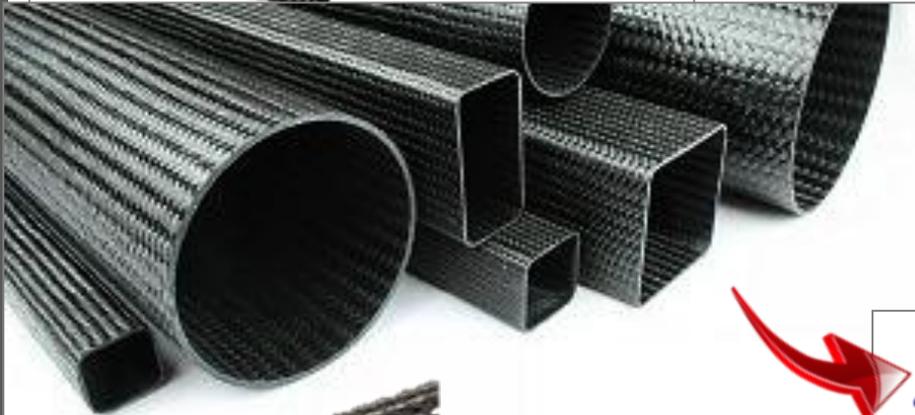
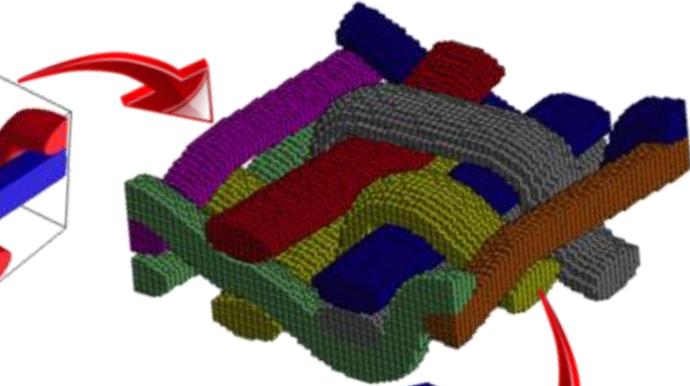
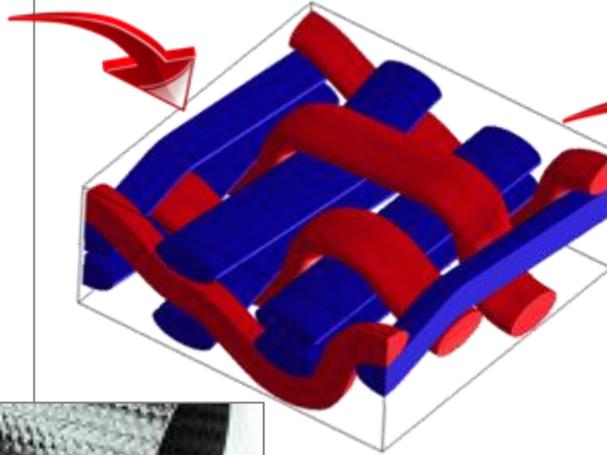
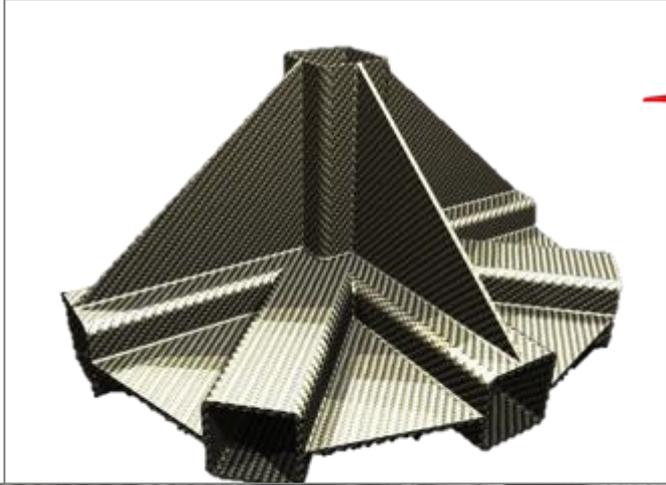
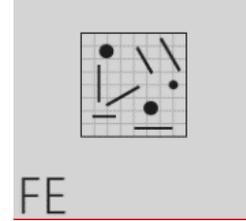
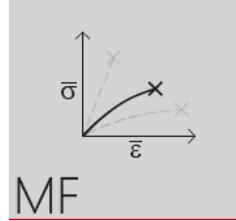


КЭ расчет:
Распределение
напряжений по
ПЭО

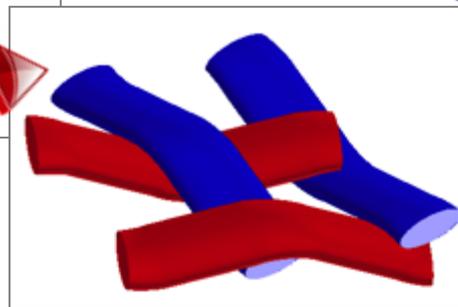
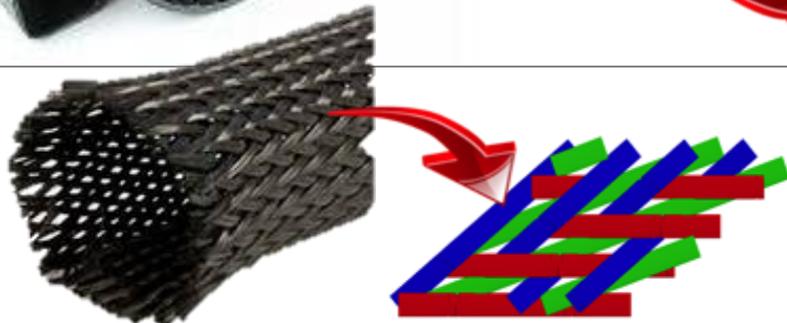
Расчет средних
напряжений по
ПЭО



Моделирование различных видов плетения

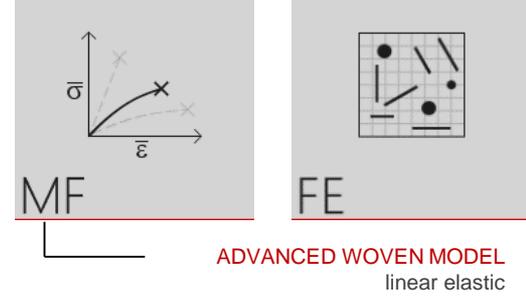


Напряжения по Мизесу

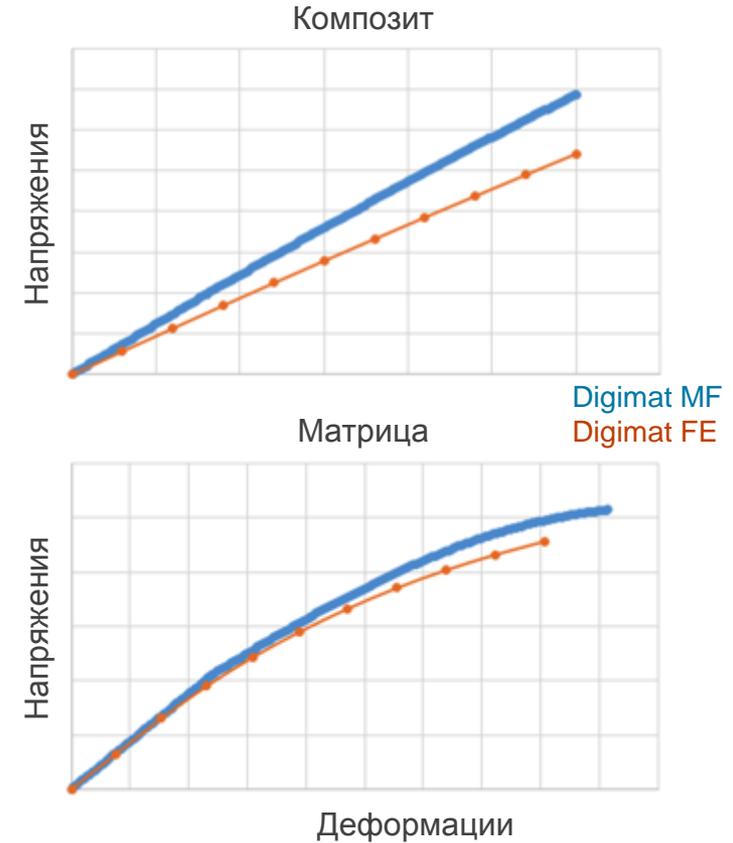
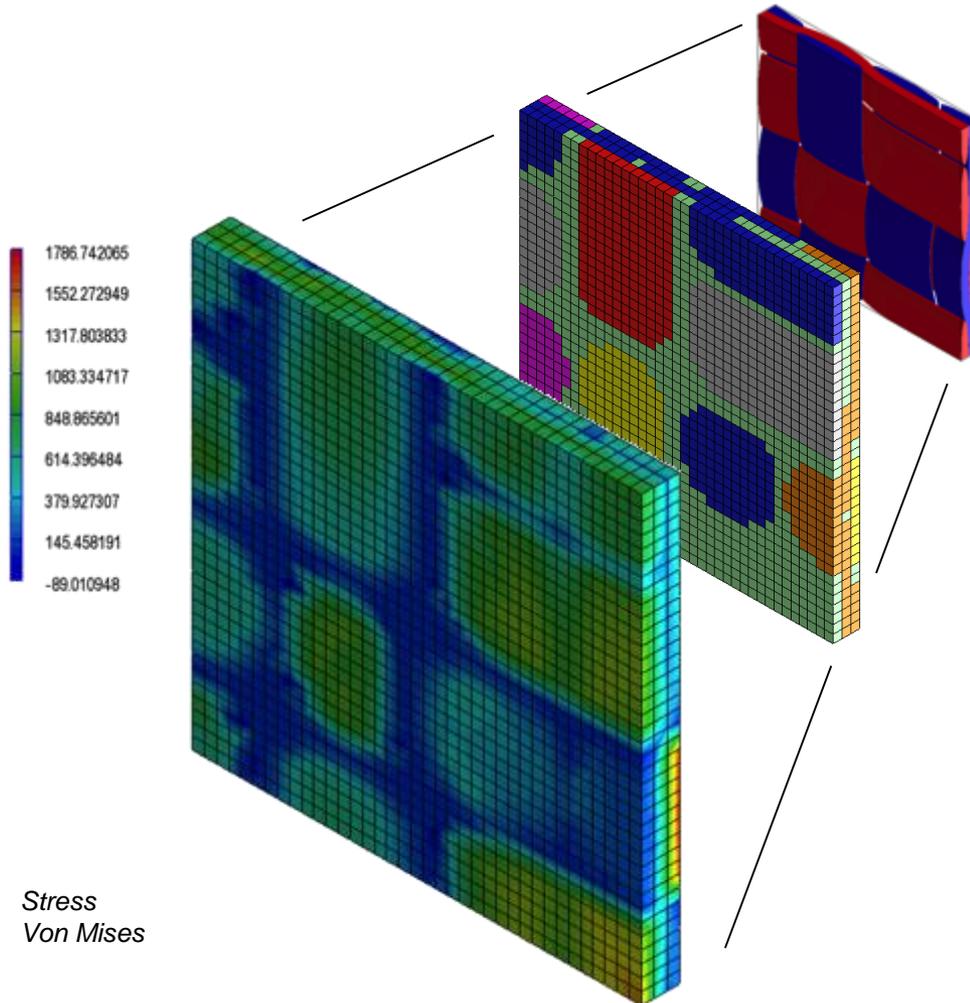


Digmat FE и MF

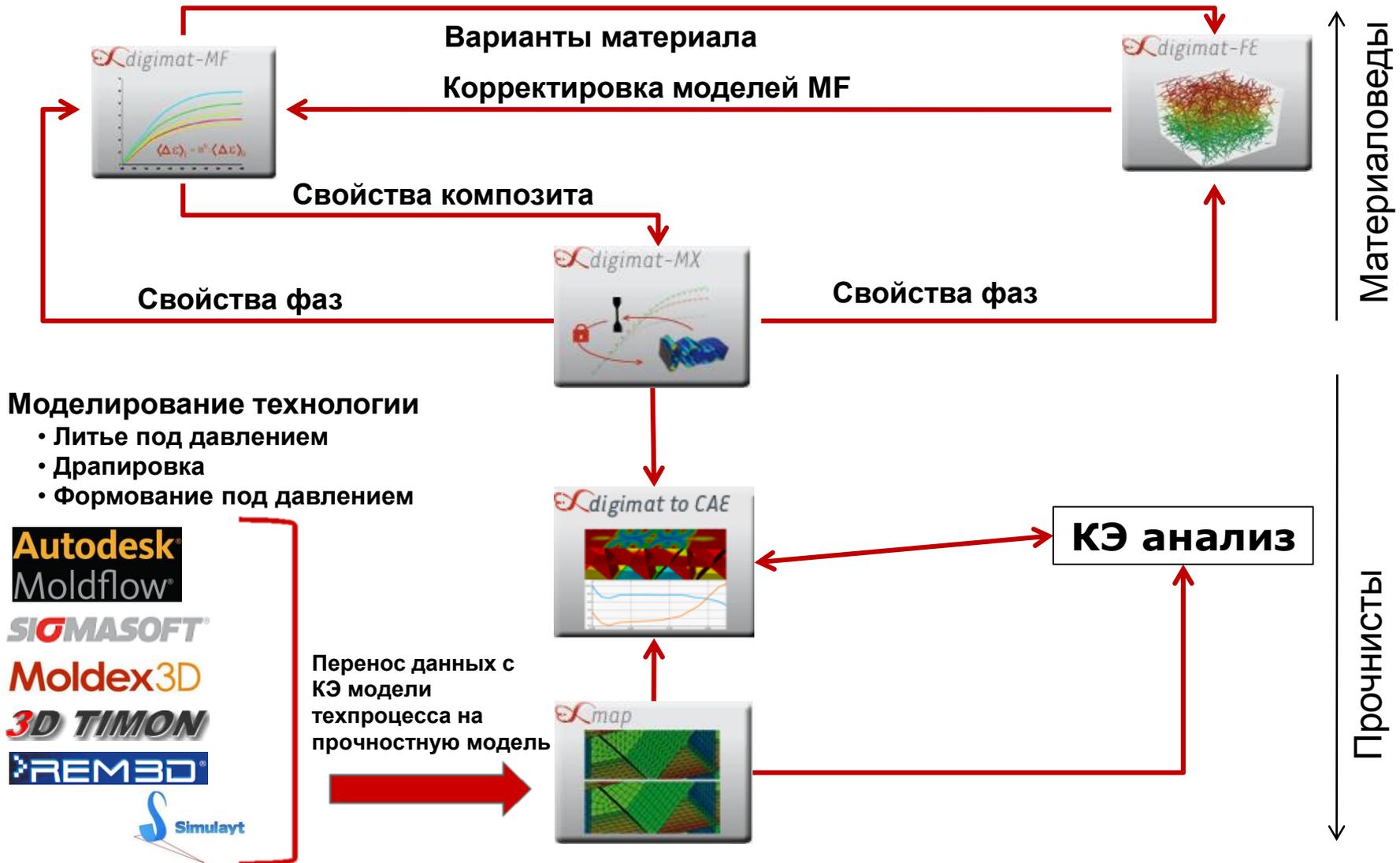
Для плетеных композитов



Свойства на макроуровне



Разработчики материалов и прочнисты



Digmat-MX

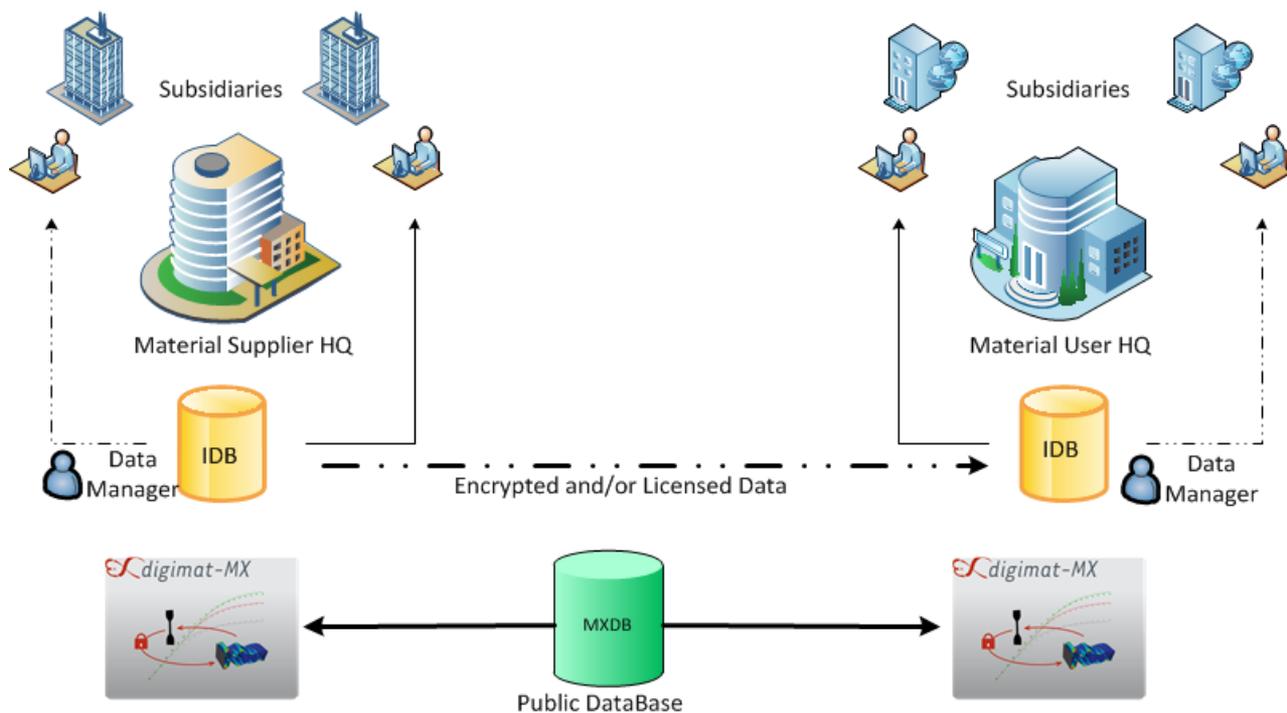


База данных материалов

- Экспериментальные данные при
 - Различные скорости деформации
 - Температуры
 - Уровни влажности

✓ Передача данных

- Незашифрованная
- Зашифрованная



Digmat-MX



MX

Database Tools Settings Help Disclaimers

Number of grades: 66 / 66

FILTER

- Data type
 - Private data
 - Shared data
 - Public data
- Grade
 - Trade Name
 - Supplier
 - Type
 - Matrix
 - Filler
 - Filler Amount
- Content
 - Type

Grades

	Trade Name	Data Type	Author	Type	Matrix	Filler	FA	Supplier	DIGIMAT Analysis Files
1	Grivory HTV-4H1	Public data	mxdh	composite	PA6T/6I	GF	0.4	EMS-GRIVORY	
2	Grivory HTV-5H1	Public data	mxdh	composite	PA6T/6I	GF	0.5	EMS-GRIVORY	
3	Grivory HTV-6H1	Public data	mxdh	composite	PA6T/6I	GF	0.6	EMS-GRIVORY	
4	Grivory HTV-3F						3	EMS-GRIVORY	
5	Valox 4512						1	SABIC	1
6	TECHNYL STAF						5	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
7	TECHNYL STAF						6	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
8	TECHNYL A 218G1 V25 Black 34 N	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.25	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
9	TECHNYL A 218 V50 Natural	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.5	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
10	TECHNYL A 218 V50 Black 21 N	Public data	mxdh						192
11	TECHNYL A 216 V30 Black 21 N	Public data	mxdh						lastics 192
12	TECHNYL A 218G V30 Natural	Public data	mxdh						lastics 192
13	TECHNYL A 216 V15 Natural	Public data	mxdh						lastics 192
14	TECHNYL A 216 V20 Natural	Public data	mxdh						lastics 192
15	TECHNYL A 218 V40 Natural	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.4	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
16	TECHNYL A 218 V35 Natural	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.35	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
17	TECHNYL A 218 V35 Black 34 NG	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.35	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
18	TECHNYL A 218 V35 Black 21 N	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.35	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
19	TECHNYL A 218 V30 Natural	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.3	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
20	TECHNYL A 218G V30 Black 34 NG	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.3	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
21	TECHNYL A 218 V30 Black 21 NS	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.3	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
22	TECHNYL A 218 V25 Natural	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.25	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
23	TECHNYL A 218 V25 Black 21 N	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.25	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
24	TECHNYL A 218 V20 Natural	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.2	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
25	TECHNYL A 218G2 V30 Black 34 N	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.3	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192
26	TECHNYL A 218G V30 Black 21 N	Public data	mxdh	Composite	PA66	GF	0.3	SOLVAY RHODIA Engineering Plastics	192

**DIGIMAT 5.0.1:
112 моделей материалов**

**DIGIMAT 5.1.1:
151 модель материала**

Copyright 2012 © e-Xstream engineering SA. All Rights Reserved

Ready. Connected to: localhost as manager OK

Digmat-MX



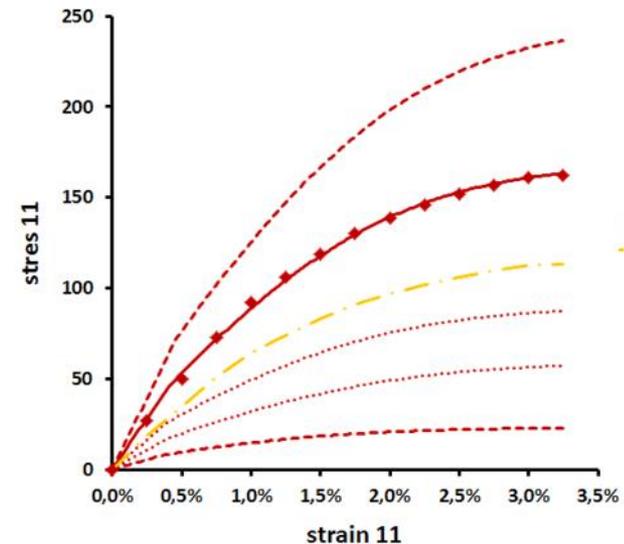
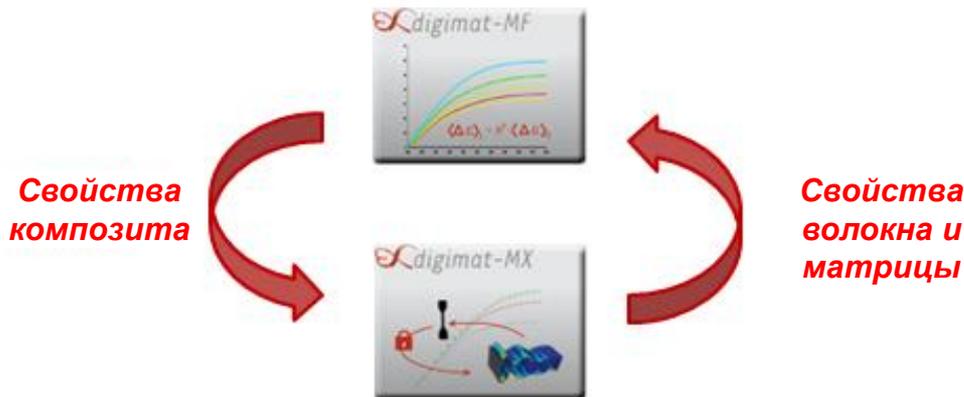
Инструмент обратного инжиниринга:

- Упругая модель
- Упругопластическая модель
- Упруговязкопластическая модель
- Вязкоупругие модель
- Индексы разрушения
- Зависимость от температуры
- Отношение длины к диаметру

Исходные данные:

- ✓ Экспериментальные данные (кривая напряжение-деформация композита)
- ✓ Набор кривых напряжение-деформация (для разных скоростей деформаций и ориентаций)

Автоматизированная калибровка моделей DIGIMAT



Силовой элемент – анализ жесткости и вибраций

Материал:

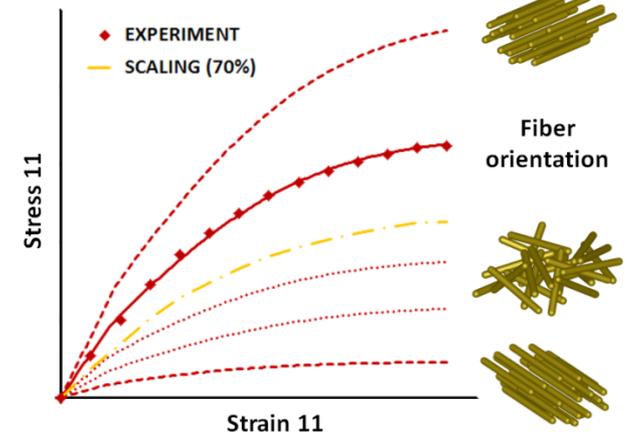
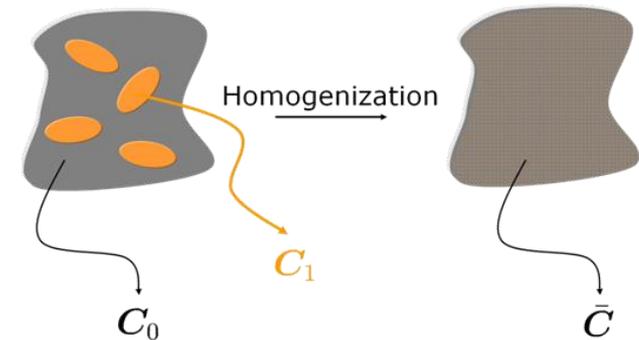
- ✓ Матрица: полипропилен,
 - $E = 1500$ МПа
 - $\nu = 0.3$
- ✓ Наполнитель: стекловолокно
 - $E = 72000$ МПа
 - $\nu = 0.22$
- Объемная доля = 19.46 %
(весовая доля - 40 %)
- Отношение длины к диаметру: 100
- Расчет литья под давлением: MOLDFLOW 5.1



Силовой элемент – анализ жесткости и вибраций

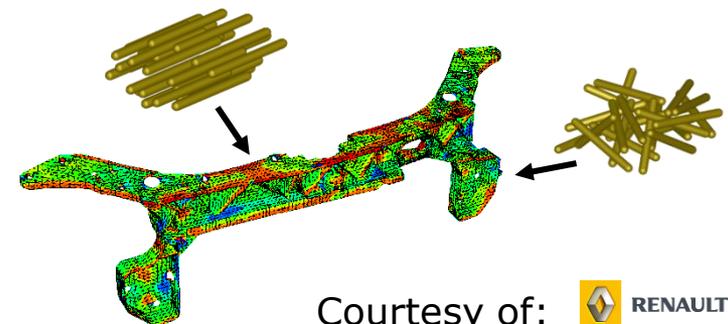
digimat-MF

- Основа технологии
- Гомогенизация методом самосогласованного поля
 - Исходные данные
 - Свойства волокон и матрицы
 - Информация о микроструктуре
 - Результат
 - Модель материала, чувствительная к микроструктуре



digimat-CAE

- Интерфейс Digimat к КЭ решателю
 - Чтение информации о микроструктуре
 - Связь модели материала Digimat-MF с КЭ решателем

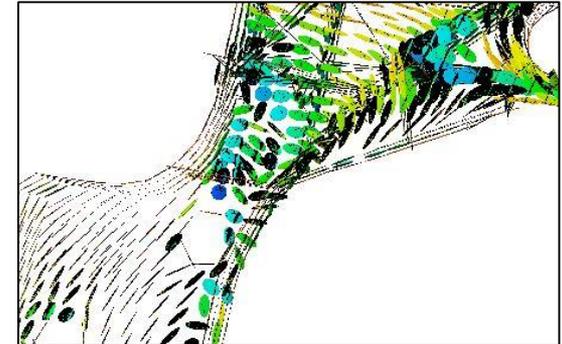


Силовой элемент – анализ жесткости и вибраций

 digimat-MAP

- Инструмент для переноса данных с технологической модели на прочностную

Местная ориентация волокон



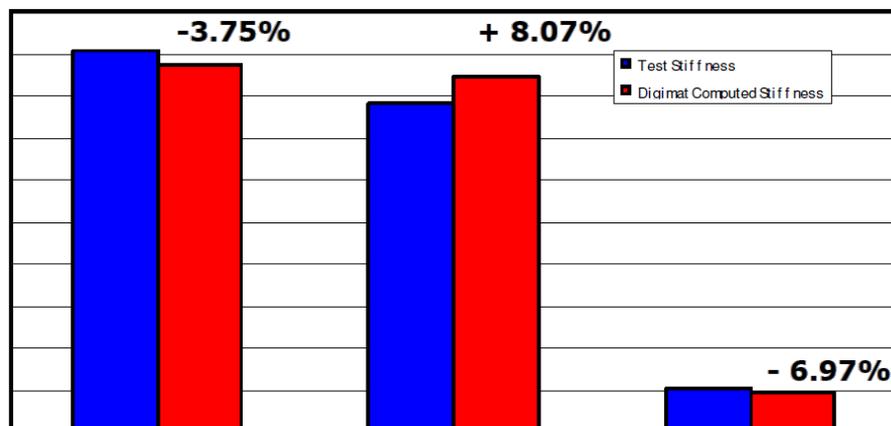
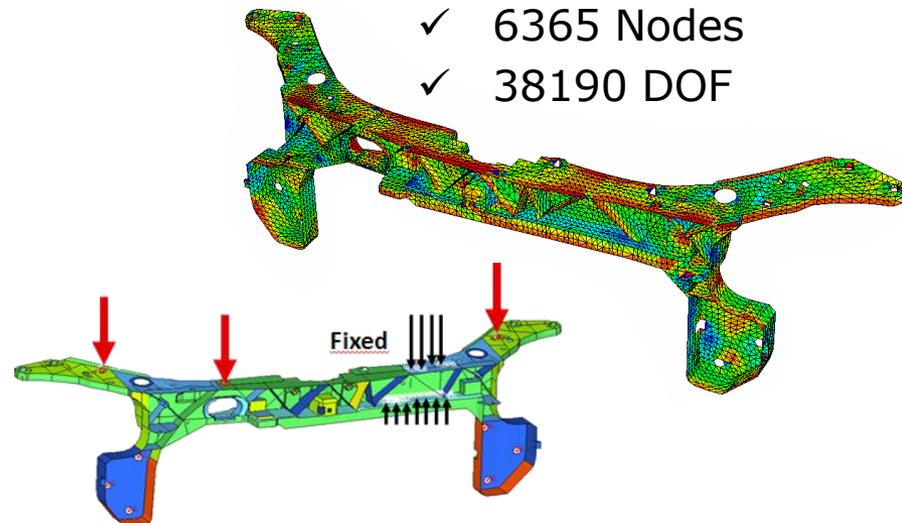
Силовой элемент – анализ жесткости и вибраций

Связанный анализ для литья под давлением и расчета жесткости

- ✓ Статическая нагрузка
- ✓ Результаты расчета при помощи DIGIMAT хорошо сходятся с экспериментом

КЭ Модель

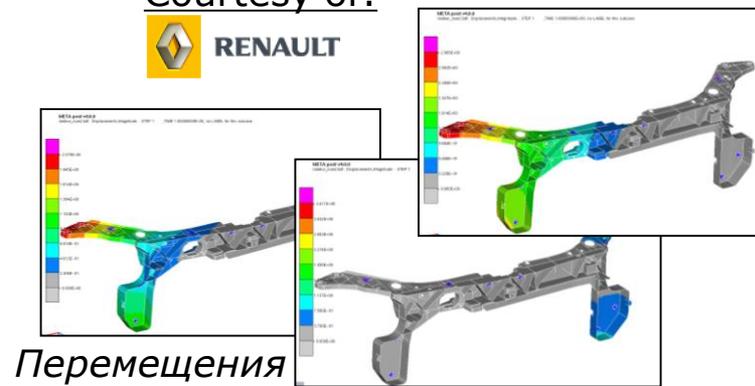
- ✓ 12632 элементов
- ✓ 6365 Nodes
- ✓ 38190 DOF



Courtesy of:



RENAULT

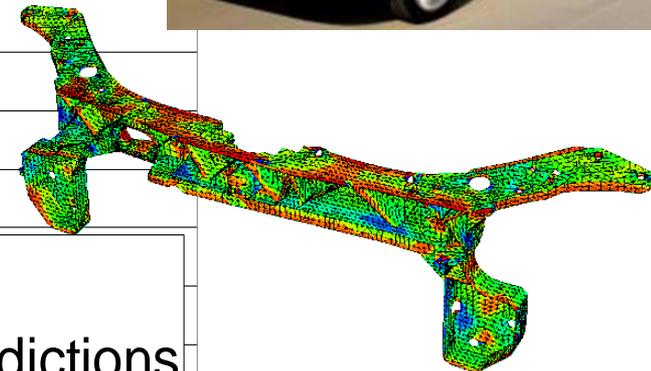
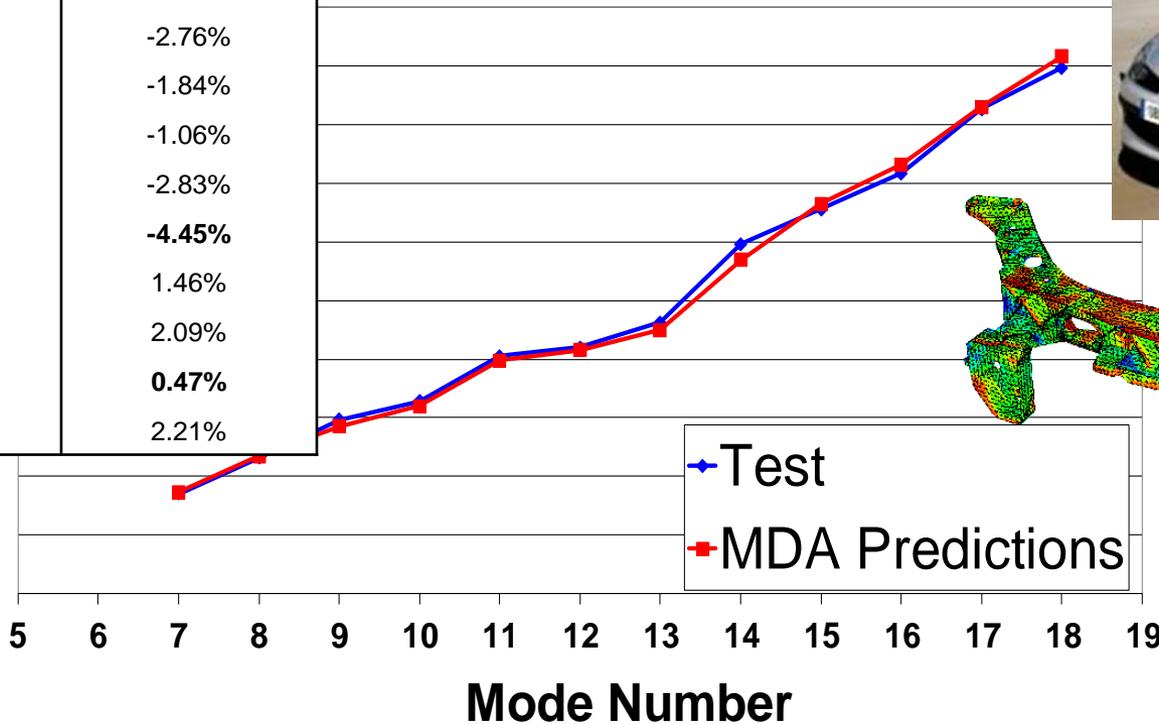


Силовой элемент – анализ жесткости и вибраций

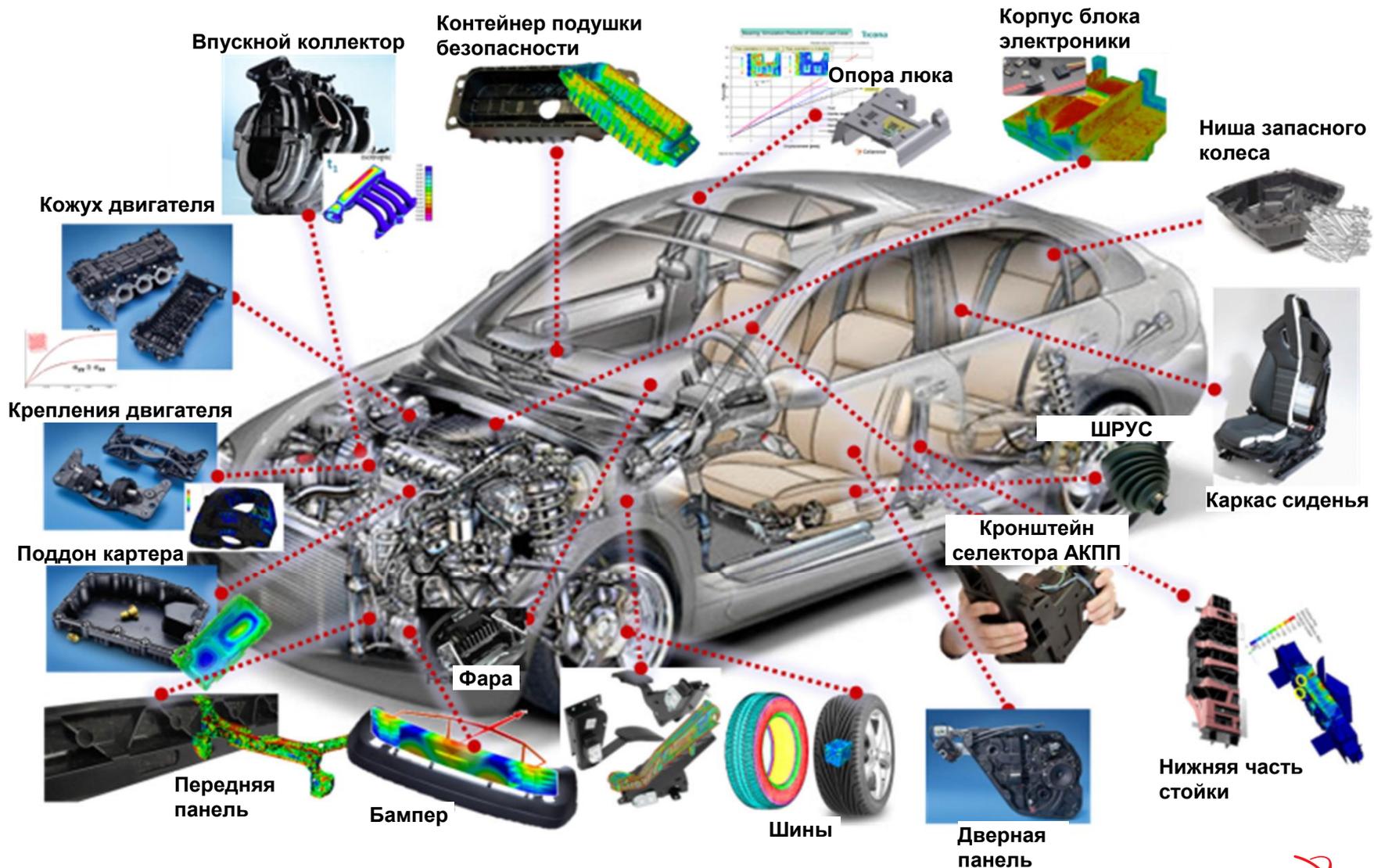
– Анализ собственных частот



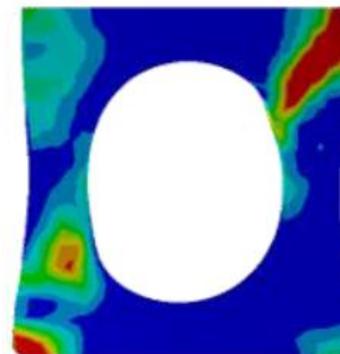
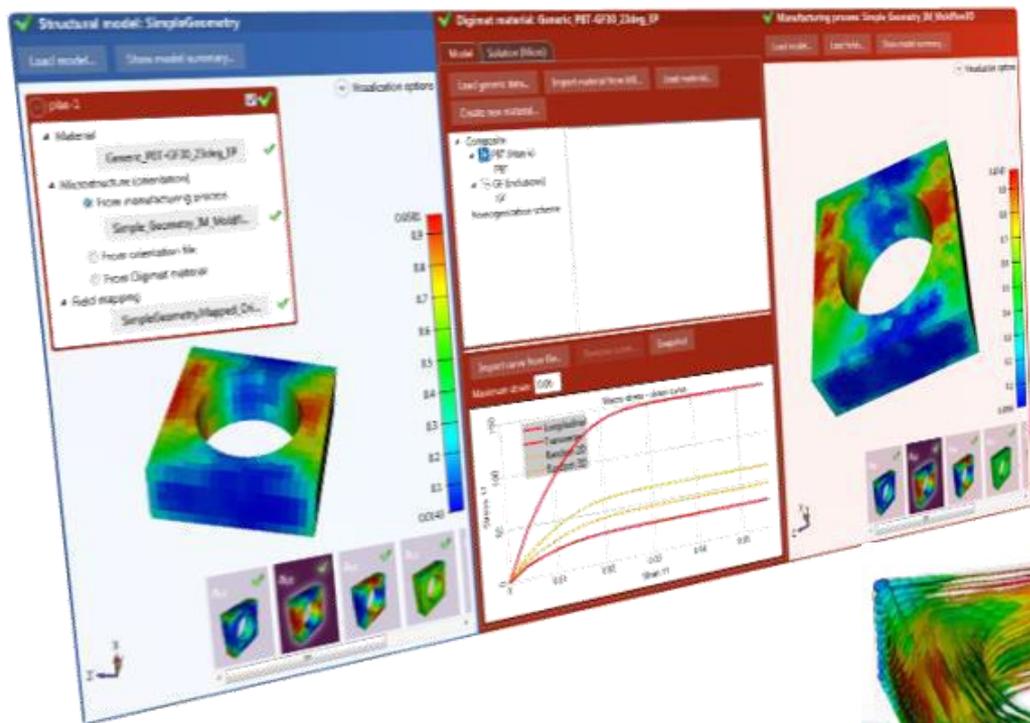
Собственные частоты	Расхождение с тестом
7	1.68%
8	0.96%
9	-3.66%
10	-2.76%
11	-1.84%
12	-1.06%
13	-2.83%
14	-4.45%
15	1.46%
16	2.09%
17	0.47%
18	2.21%



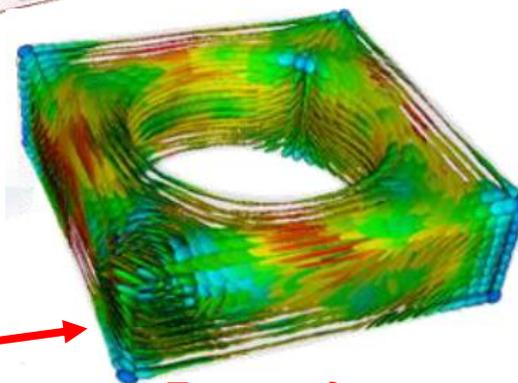
Применение армированных пластиков в автомобилестроении



Интегрированная среда для проектирования армированных пластиков



Результаты

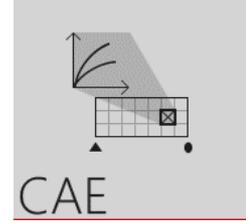
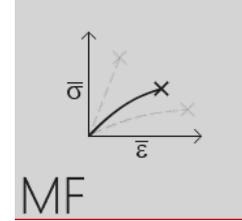


КЭ модели

Задание материала

Перенос данных с технологической модели на прочностную

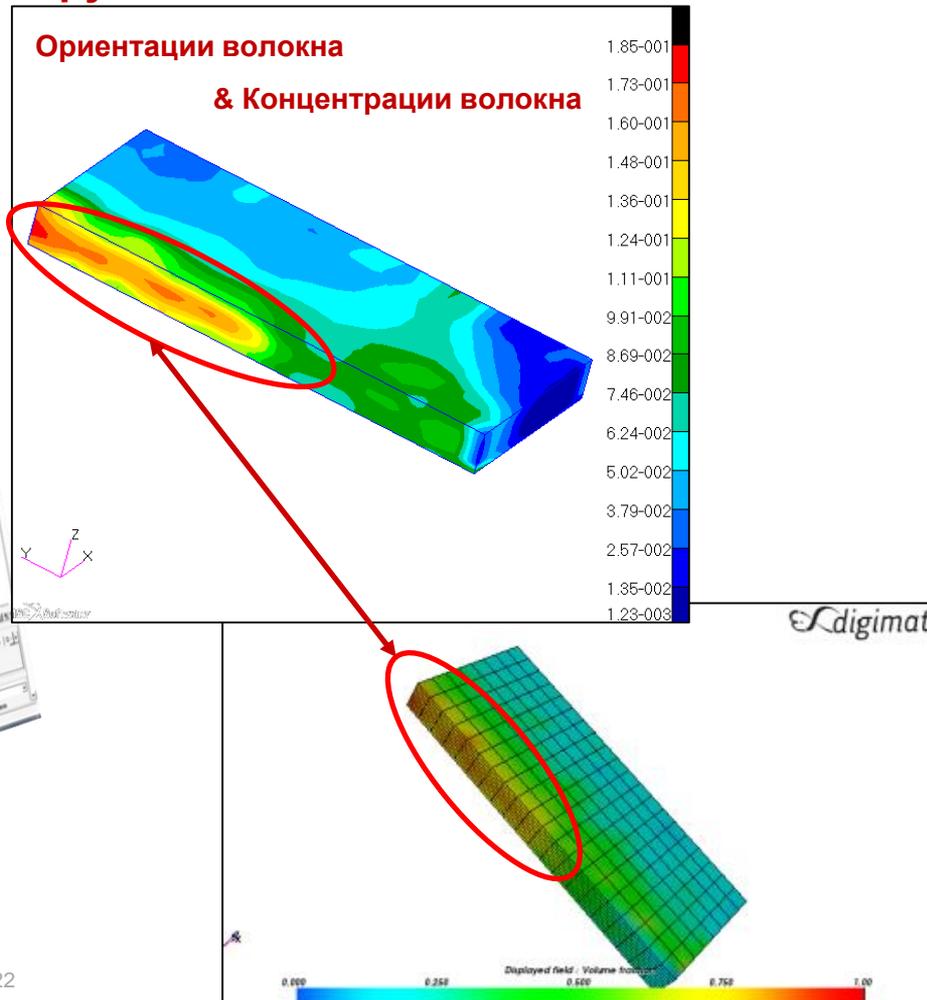
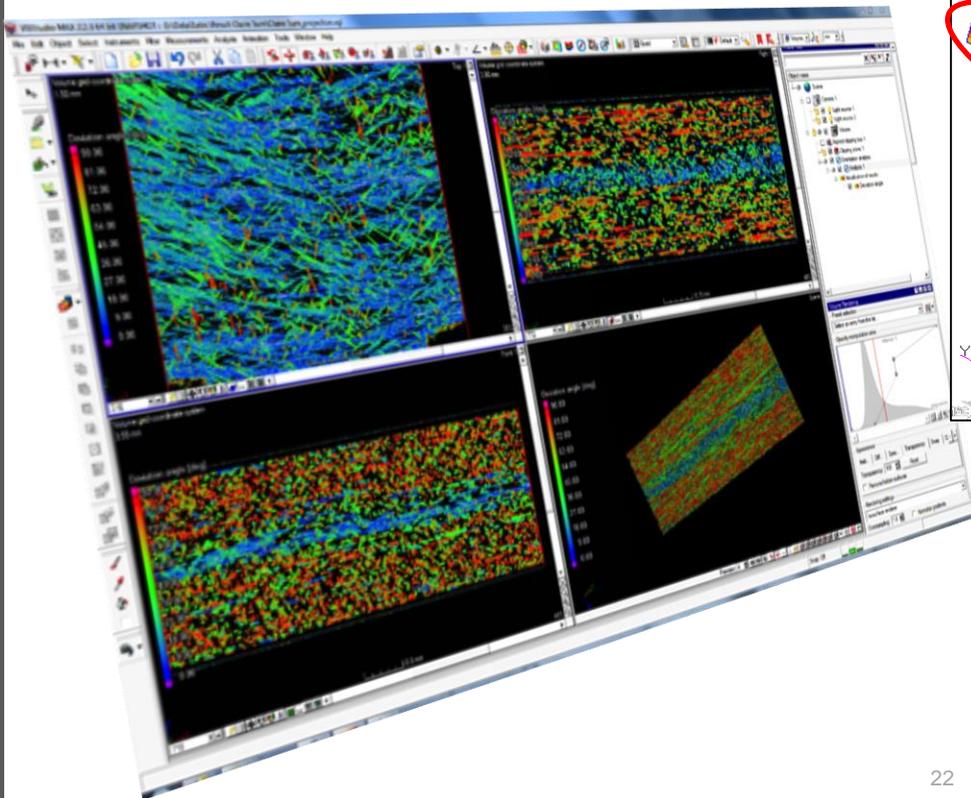
Использование компьютерной томографии



✓ Интерфейс к Volume Graphics **VGStudio MAX**

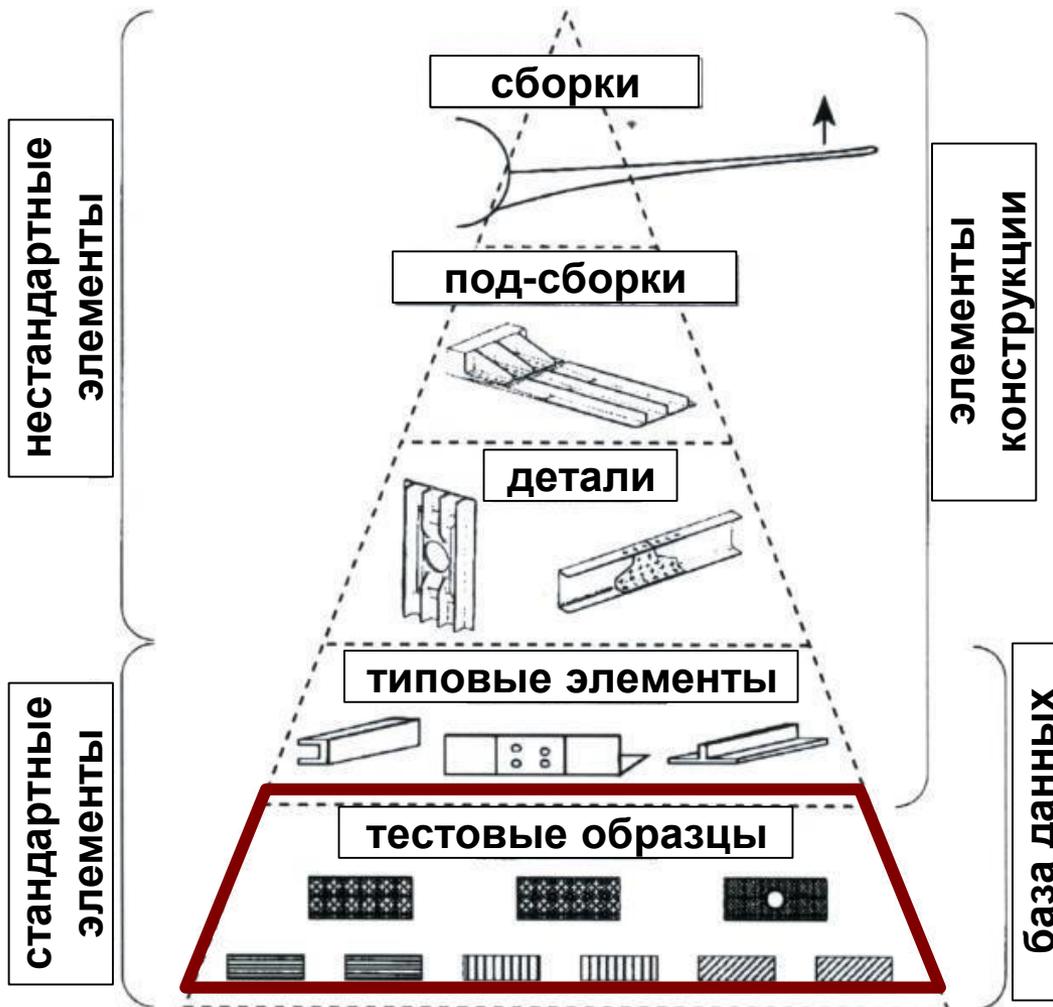
Анализ композитного материала на основе рубленного волокна

- Учет ориентации волокна
- Учет концентрации волокна



Испытания материалов

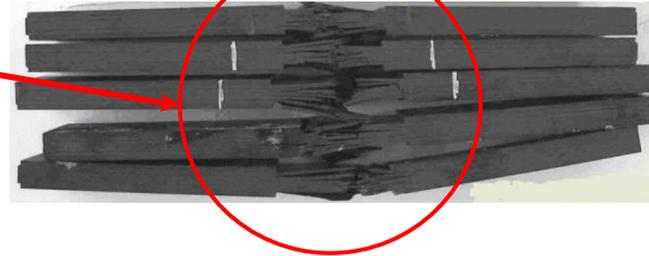
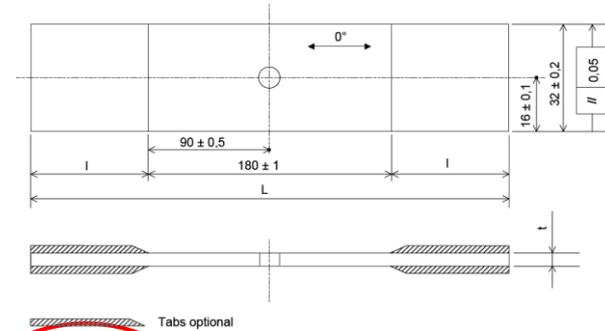
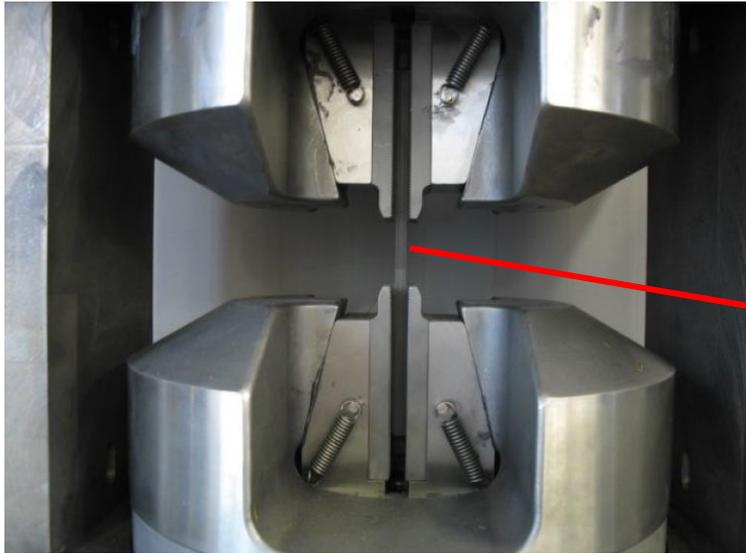
Испытания занимают от 1 до 2 лет и стоят до 2 миллионов долларов!



Испытания композитов для Boeing 777

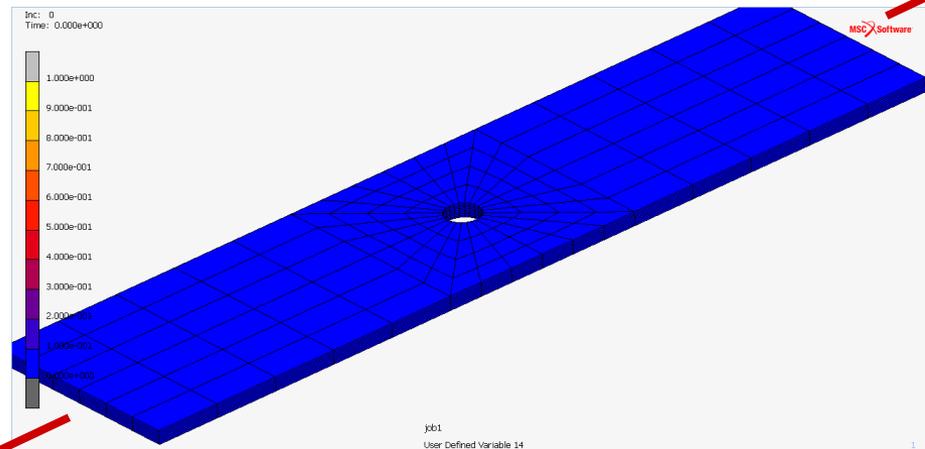
Тип испытания	Количество тестов
Свойства слоя	235
Воздействие внешней среды	200
Прочность укладок	2334
Межслоевая прочность	574
Радиус-эффекты	184
Ползучесть	271
Концентраторы напряжений	118
Влияние дефектов	494
Болтовые соединения	3025
Долговечность	385
Ремонтопригодность	239
В сумме	8059

Испытания материалов



Цель – уменьшить количество испытаний

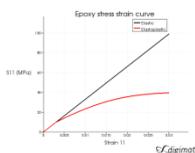
- Ускорить сертификацию материалов
- Снизить стоимость испытаний



Концепция определения виртуальных пределов прочности – замена физических тестов на виртуальные

Испытания образцов

Матрица



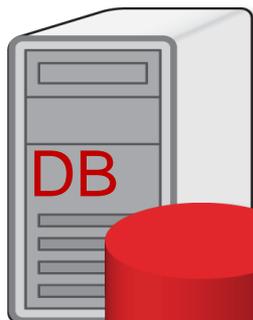
Волокно



Слой

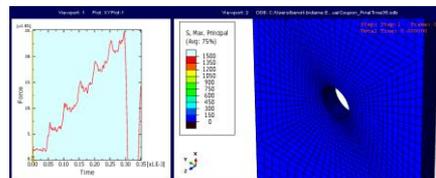


Сервер



Построение модели Digimat-MF

Расчет образца Digimat-CAE: NHC, OHT, OHC, ...

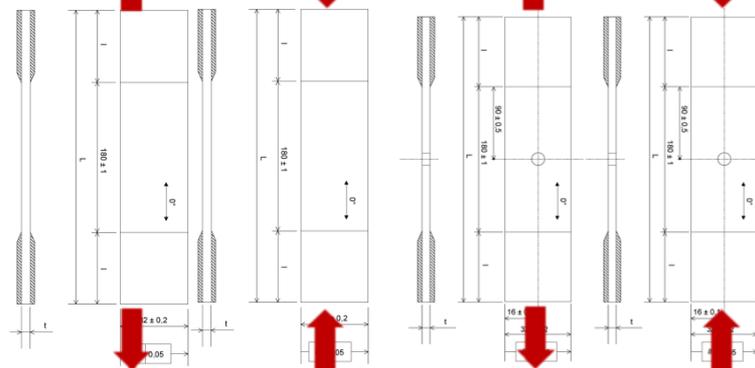


UT

UC

OHT

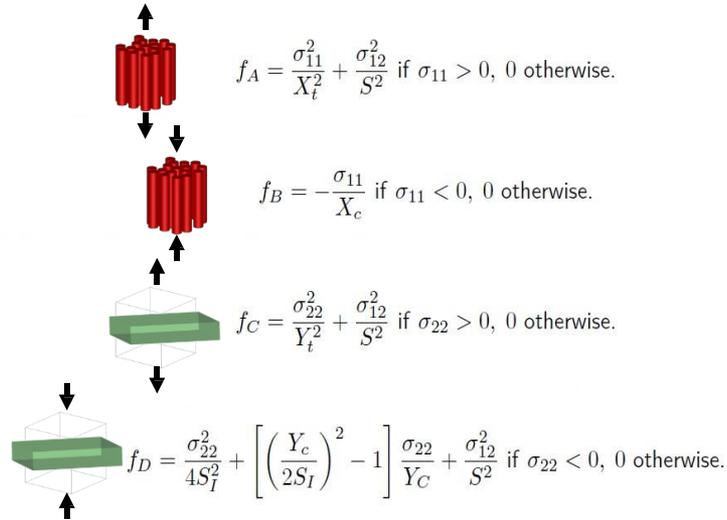
OHC



Выгрузка результатов в базу данных

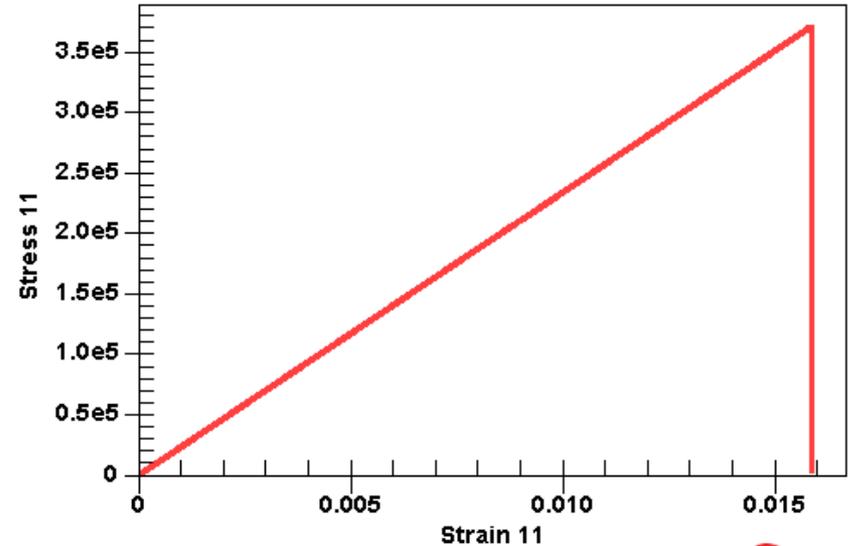
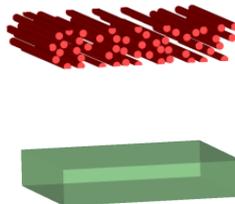
Анализ прогрессирующего разрушения с использованием критерия разрушения Хашина и модели деградации Матценмиллера

Критерии разрушения Хашина основаны на прочности слоя...



... и вводятся в параметры повреждения Матценмиллера ...

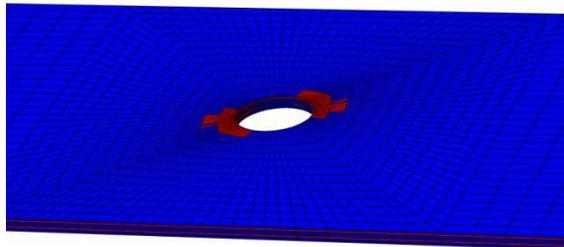
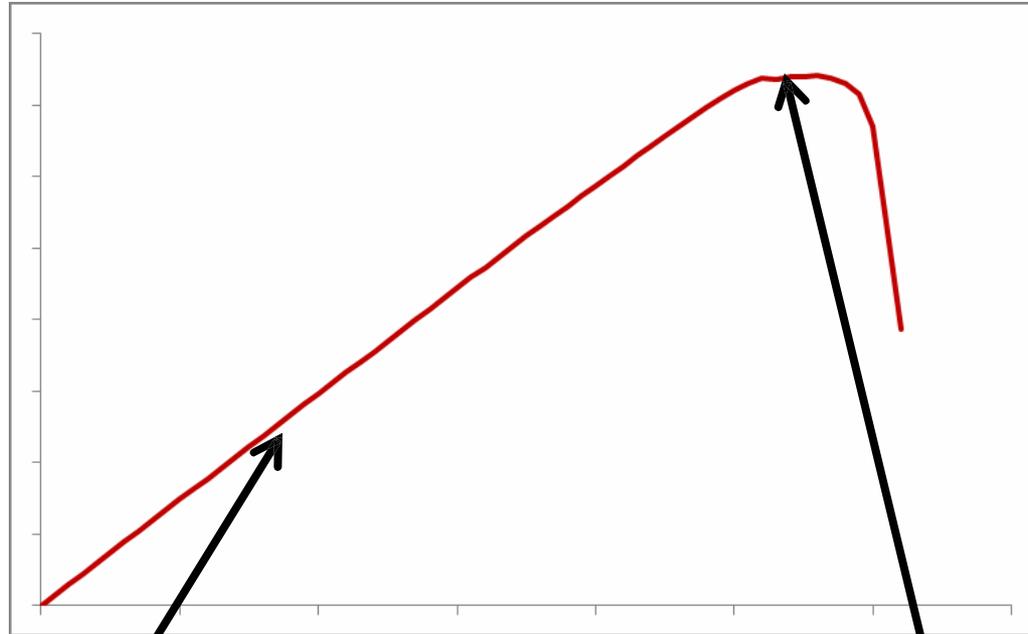
- $d_f = f(f_A, f_B)$
- $d_m = f(f_C, f_D)$
- $d_s = f(d_f, d_m)$



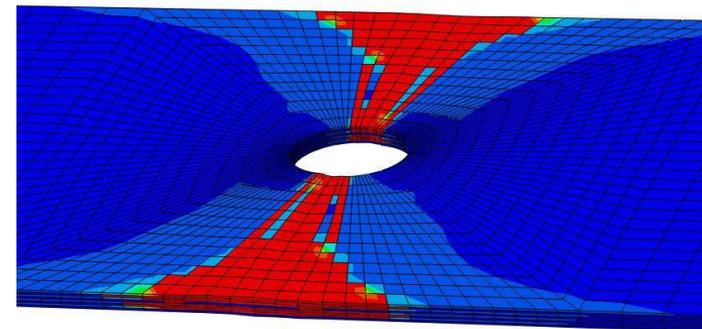
... которые управляют деградацией жесткости слоя

$$\bar{S} = \begin{pmatrix} \frac{1}{(1-d_f)\bar{E}_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{(1-[\sigma_{22}]_+ d_m)E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\bar{G}_{12}(1-d_s)} \end{pmatrix}$$

Прогрессирующее разрушение образца показывает последовательность разрушения слоев

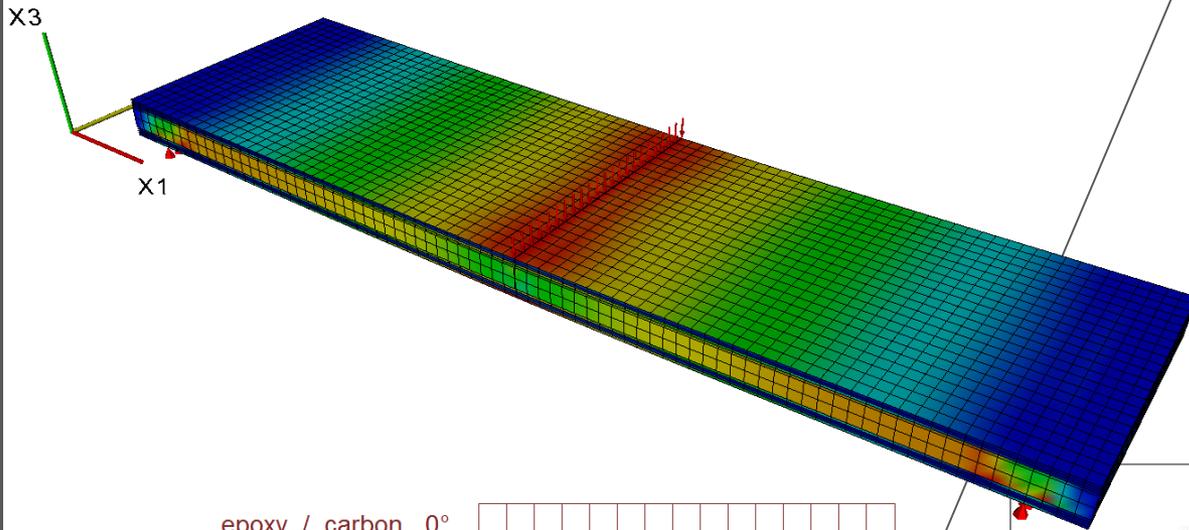


Начало разрушения матрицы в слоях 90°

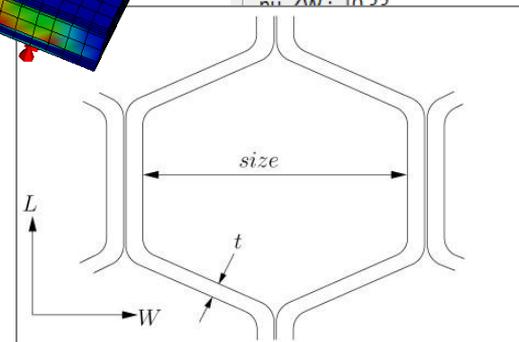
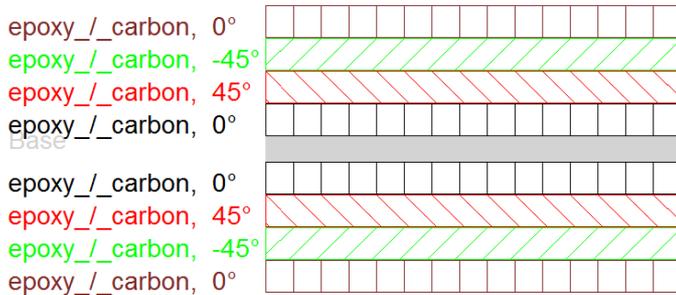


Повреждение волокон показывает начало полного разрушения образца

Анализ сотовых сэндвич-панелей



Density	
Relative density :	<input type="text" value="0.0444445"/>
Density :	<input type="text" value="142.222"/>
Young's moduli	
E_W :	<input type="text" value="3.65184"/>
E_L :	<input type="text" value="3.65566"/>
E_Z :	<input type="text" value="3111.11"/>
Shear moduli	
G_LW :	<input type="text" value="2.03185"/>
G_WZ :	<input type="text" value="438.597"/>
G_LZ :	<input type="text" value="677.824"/>
Poisson's ratios	
nu_WL :	<input type="text" value="0.99687"/>
nu_WZ :	<input type="text" value="0.000387356"/>
nu_LZ :	<input type="text" value="0.000387761"/>
nu_LW :	<input type="text" value="0.997911"/>
nu_ZW :	<input type="text" value="0.22"/>



Спасибо за внимание!