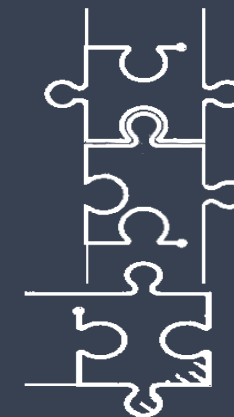


Моделирование процессов полимеризации и коробления в Simcenter 3D - Samcef



Александр Беспалов

Инженер

АО «ИТС»

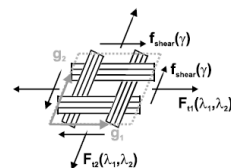
ab@inteso.ru

Причины возникновения остаточных напряжений и деформаций в изделиях из термореактивных ПКМ

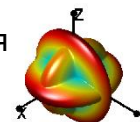
Химическая усадка связующего



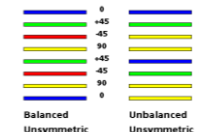
Отклонение волокон при укладке



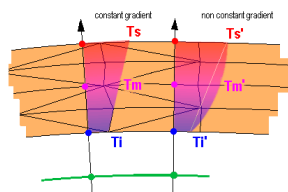
Анизотропия материала



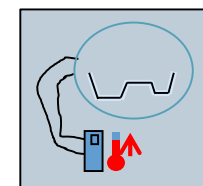
Несбалансированное распределение напряжений по толщине пакета из-за несимметричной укладки



Градиент температурных полей и степени полимеризации в плоскости и в направлении толщины пакета



Термическое и механическое взаимодействие детали с оснасткой (разные материалы – разные теплопроводность и КТР)

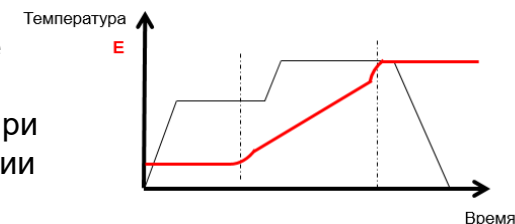


Влияние воздушных потоков в печи или автоклаве

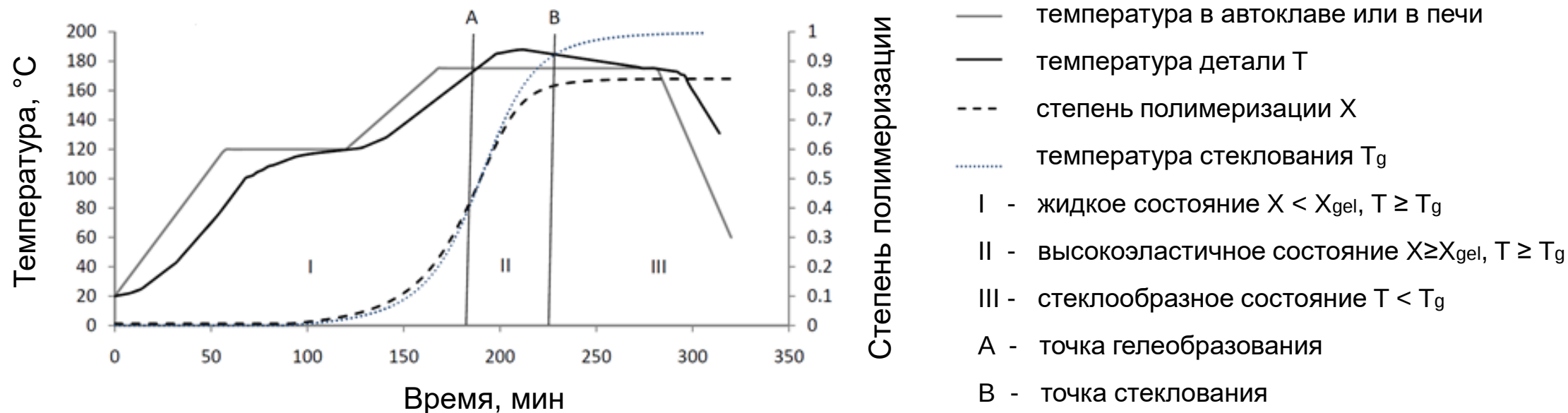


Другие

Изменение свойств связующего при полимеризации



Три стадии полимеризации термореактивного связующего

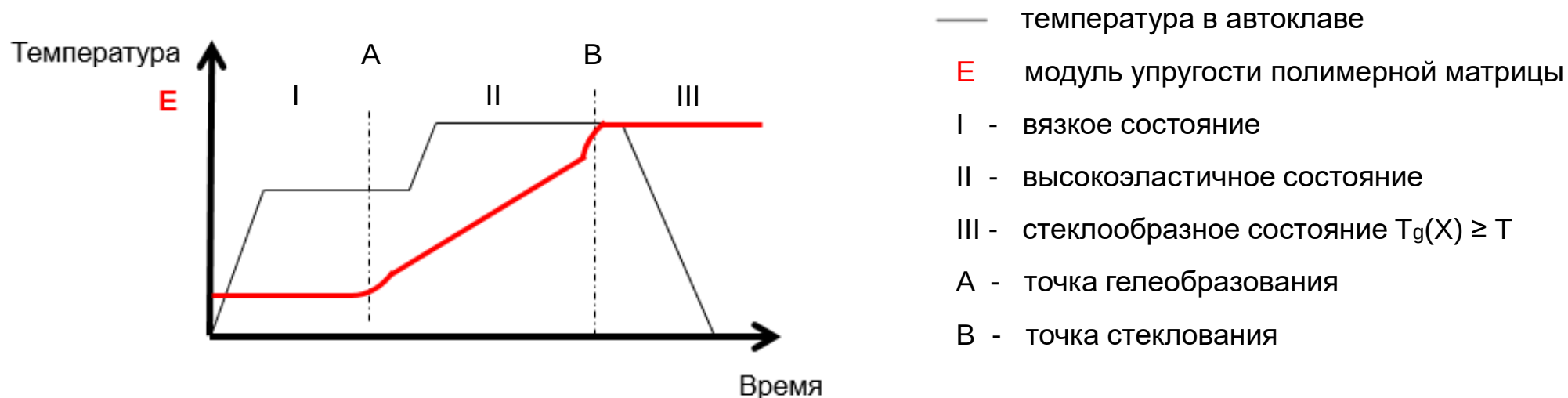


Температура стеклования T_g — характеристика связующего, определяющая значение температуры, вблизи которой возможен обратимый переход из стеклообразного состояния в высокоэластичное при повышении температуры связующего. Температура стеклования зависит от степени полимеризации, т.е. $T_g = T_g(X)$.

Стеклование — это переход связующего из высокоэластичного состояния в стеклообразное при охлаждении.



Изменение упругих свойств связующего при полимеризации



Механические характеристики термореактивного связующего с течением времени зависят от:

- температуры детали T
- степени полимеризации X
- температуры стеклования T_g

Связь температуры стеклования и степени полимеризации термореактивного связующего

Уравнение Ди Бенедетто:

$$\frac{T_g - T_{g0}}{T_{g1} - T_{g0}} = \frac{\lambda_{Tg} \cdot X}{1 - (1 - \lambda_{Tg}) \cdot X}$$

$T_g < T_{g0}$ – реакция отсутствует, $X = 0$

$T_g = T_{g1}$ при полной полимеризации связующего, $X = 1$

λ_{Tg} – параметр, характеризующий отношение удельных теплоёмкостей полностью полимеризованного и полностью не полимеризованного связующего



Химико-термический анализ

Полимеризация – экзотермическая реакция → уравнение теплопроводности с учётом объёмного тепловыделения, зависящего от скорости полимеризации:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{ij} \nabla T) + Q$$

T – температура

ρ – плотность

c – удельная теплоёмкость

λ_{ij} – тензор теплопроводности

Конвекция учитывается как граничное условие

$$Q = M_m \rho \Delta H_{TOT} \dot{X}$$

M_m – массовая доля связующего

ΔH_{TOT} – энтальпия реакции

$$\dot{X} = f(T, X)$$

- скорость изменения степени полимеризации
(кинетическая модель реакции полимеризации)

Для каждого момента времени вычисляются:

- температура,
- степень полимеризации,
- Температура стеклования.



Кинетические модели реакции полимеризации в Simcenter-Samcef

- Обобщённая модель Samcef: $\dot{X} = f(T, X) = K_1 (1 - X)^{n_1} + K_2 X^m (1 - X)^{n_2}$
- Изотермическая n-ого порядка: $\dot{X} = K (1 - X)^n$
- автокаталитическая: $\dot{X} = K X^m (1 - X)^n$
- автокаталитическая n-ого порядка (Камал - Соро): $\dot{X} = (K_1 + K_2 X^m) (1 - X)^n$
- модель Ли, Чю и Лина: $\dot{X} = K_1 (1 - X)^l + K_2 X^m (1 - X)^n$
- модель Ли, Луса и Шпрингера: $\dot{X} = \begin{cases} (K_1 + K_2 X) (1 - X) (B - X) & \forall X \leq X_c \\ K_3 (1 - X) & \forall X > X_c \end{cases}$
- пользовательская

Согласно уравнению Аррениуса $K_i = A_i \exp \frac{-E_i}{RT}$,

где E_i - энергии активации, A_i - постоянные реакции, n, m, l - порядки реакции, B, X_c - характеристические величины степени полимеризации.



Химико-механический анализ

Учитывается механическая, температурная и химическая деформация для жидкого, высокоэластичного и твёрдого состояния связующего:

$$\varepsilon_{ij}^M = \varepsilon_{ij} - (\varepsilon_{ij}^T + \varepsilon_{ij}^C)$$

Температурная деформация:

$$\varepsilon_{ij}^T = \int_0^t \alpha_{ij} \frac{\partial T}{\partial t'} dt' \quad \text{где коэффициенты температурного расширения}$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \alpha_{ij}^l & \forall X < X_{gel}, T \geq T_g \\ \alpha_{ij}^r & \forall X > X_{gel}, T \geq T_g \\ \alpha_{ij}^g & \forall T < T_g \end{cases}$$

Химическая деформация:

$$\varepsilon_{ij}^C = \int_0^t \beta_{ij} \frac{\partial X}{\partial t'} dt' \quad \text{где коэффициенты химической усадки}$$

$$\beta_{ij} = \begin{cases} \beta_{ij}^l & \forall X < X_{gel}, T \geq T_g \\ \beta_{ij}^r & \forall X > X_{gel}, T \geq T_g \\ \beta_{ij}^g & \forall T < T_g \end{cases}$$

Упругие характеристики:

$$E = \begin{cases} E^l & \forall X < X_{gel}, T \geq T_g \\ E^r & \forall X > X_{gel}, T \geq T_g \\ E^g & \forall T < T_g \end{cases}$$



Материалы типа Curing в Simcenter-Samcef

Виды материалов:



однонаправленный



тканый

Два способа задания свойств материалов:

Вариант 1 - отдельно для волокон и связующего с последующей гомогенизацией с учётом объёмных долей каждого компонента:

Волокна:

- изотропные или трансверсально-изотропные
- одинаковые для основы и утка
- свойства не зависят от состояния связующего
- учёт геометрической структуры ткани в композите

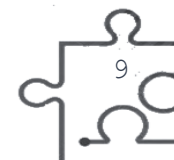
Термореактивное связующее:

- изотропное
- свойства зависят от состояния (от T_g , X)

Вывод гомогенизированных свойств в качестве результата анализа

Вариант 2 - интегральные (гомогенизированные) ортотропные свойства композита:

- свойства композита зависят от состояния связующего (от T_g , X)



Вариант 1 – Раздельные свойства компонентов композита

Интегральные свойства композита:

- толщина монослоя
- плотность
- удельная теплоёмкость
- коэффициенты теплопроводности (изотропный или ортотропные)

Параметры реакции полимеризации:

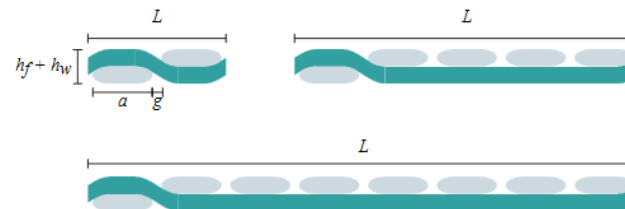
- стандартная энтальпия образования
- массовая доля связующего
- кинетическая модель полимеризации (постоянные реакции, энергии активации, порядки реакции)
- температура стеклования связующего в неполимеризованном и полностью полимеризованном состоянии
- параметр, характеризующий отношение удельных теплоёмкостей полностью полимеризованной системы к неполимеризованной

Свойства полимерного связующего (изотропные):

- модуль упругости в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии
- коэффициент Пуассона в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии
- коэффициент температурного расширения в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии
- коэффициент химической усадки в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии
- степень полимеризации в точке гелеобразования
- параметры релаксации (опционально)

Свойства волокон (упругие – изотропные или трансверсально-изотропные, КЛТР – трансверсально-изотропные):

- модули упругости в продольном и поперечном направлении
- модули сдвига в плоскости слоя и в поперечной плоскости
- коэффициенты Пуассона
- коэффициенты температурного расширения вдоль и поперёк волокон
- объёмная доля волокон
- объёмные доли нитей основы и утка (для тканого материала)
- корректирующий коэффициент, зависящий от типа и структуры переплетения нитей (для тканого материала)



Вариант 2 - Интегральные свойства композита

Интегральные свойства композита:

- толщина монослоя
- плотность
- удельная теплоёмкость
- модули упругости в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии (ортотропные)
- модули сдвига в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии (ортотропные)
- коэффициенты Пуассона в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии (ортотропные)
- коэффициенты теплопроводности (изотропный или ортотропные)
- коэффициенты температурного расширения в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии (ортотропные)
- коэффициенты химической усадки в жидком, высокоэластичном и стеклообразном состоянии (ортотропные)

Параметры реакции полимеризации:

- стандартная энтальпия образования
- массовая доля связующего
- кинетическая модель полимеризации (постоянные реакции, энергии активации, порядки реакции)
- температура стеклования связующего в неполимеризованном и полностью полимеризованном состоянии
- параметр, характеризующий отношение удельных теплоёмкостей полностью полимеризованной системы к неполимеризованной

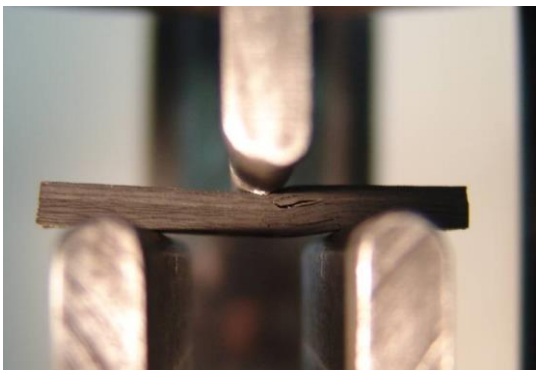
Свойства полимерного связующего:

- степень полимеризации в точке гелеобразования
- параметры релаксации (опционально)

Испытательная база



Растяжение



Межслоевой сдвиг



Ударные
испытания



Оптический микроскоп



Аппаратно-программный
комплекс ТМА



Динамический
механический
анализатор



Динамический
реометр



Дифференциальный
сканирующий калориметр
теплового потока



Инфракрасный
Фурье-спектрометр

Simcenter–Samcef для анализа полимеризации и коробления

Цель:

- изготовление композитного изделия из однонаправленных и тканых терморезистивных препрегов с заданной геометрической точностью при отверждении в автоклаве (другие технологии требуют анализа применимости ПО)

Задачи:

- моделирование технологического процесса полимеризации с учётом термического взаимодействия детали с оснасткой и окружающей средой
- определение обусловленных технологическим процессом остаточных напряжений, деформаций и перемещений детали с учётом её механического взаимодействия с оснасткой

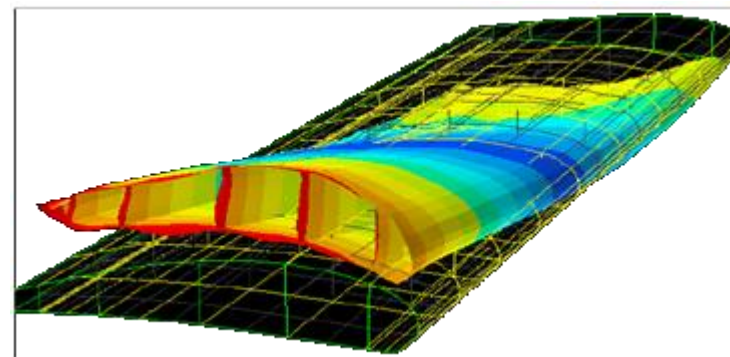
Мероприятия по коррекции коробления:

- компенсация с помощью изменения геометрии оснастки
- изменение укладки композитного пакета
- более точное управление температурным режимом автоклава
- другие

Simcenter 3D

с решателем

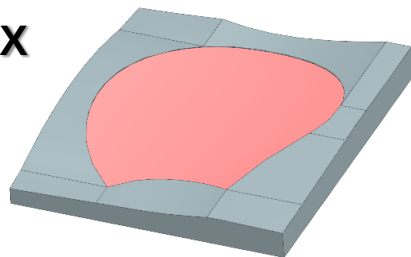
Samcef



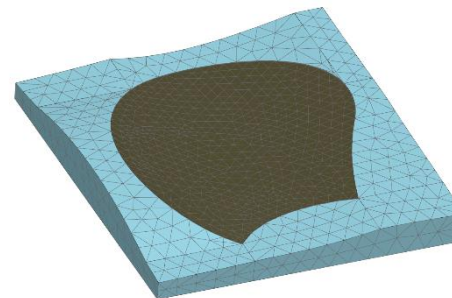
Пример рабочего процесса проектирования оснастки

2. Подготовка данных об
укладке в **Fibersim**

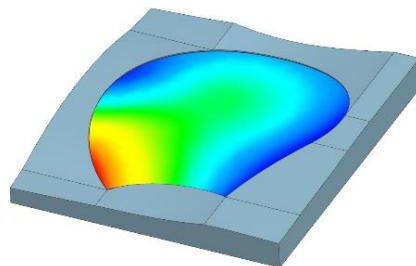
1. Создание
геометрии в **NX**



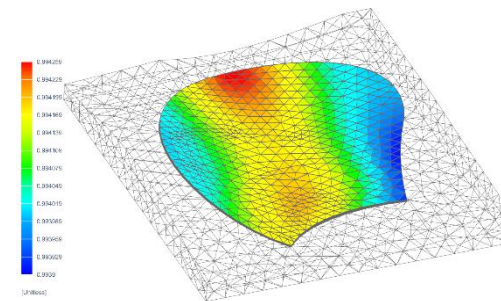
3. Создание расчётной
модели в
Simcenter 3D - Samcef



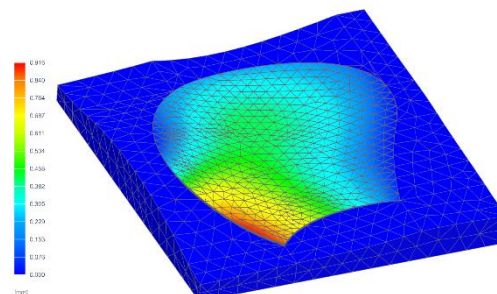
6. Внесение упреждающих
изменений в геометрию
оснастки с помощью
NX OmniMesh Transformer



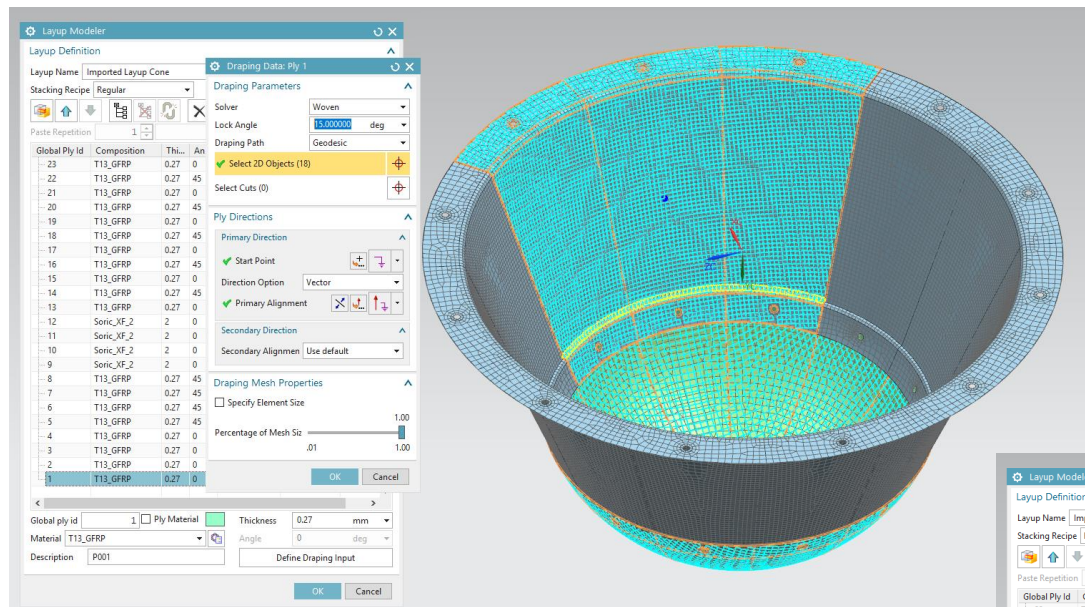
4. Анализ
полимеризации в
Simcenter 3D - Samcef



5. Расчёт коробления в
Simcenter 3D - Samcef

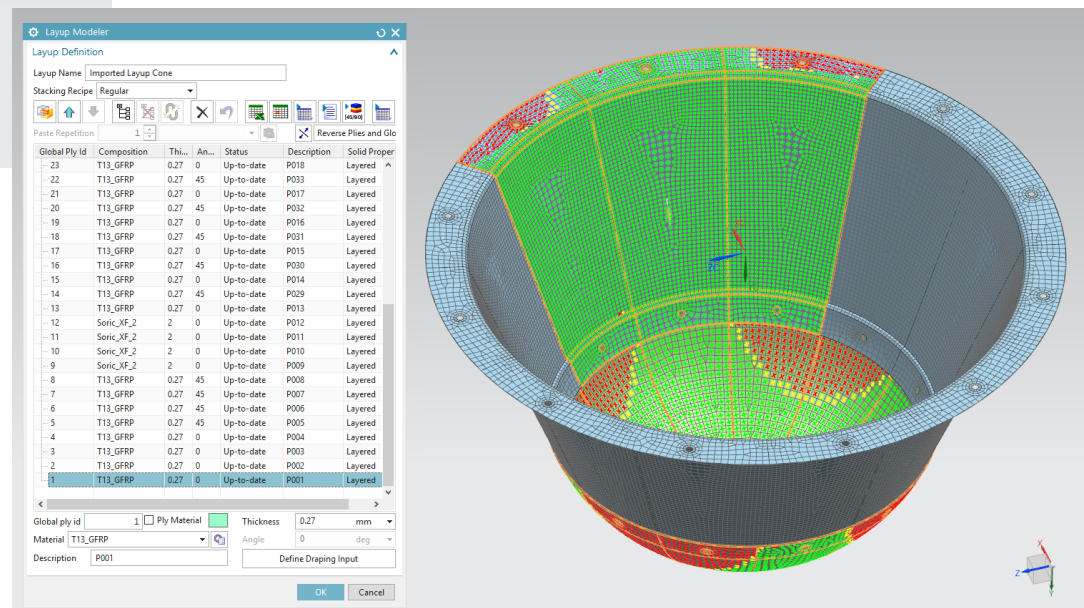


Подготовка укладки пакета в Simcenter 3D

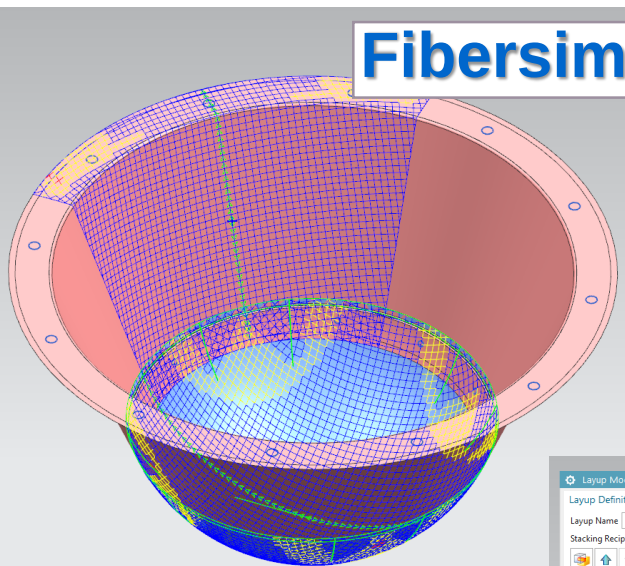
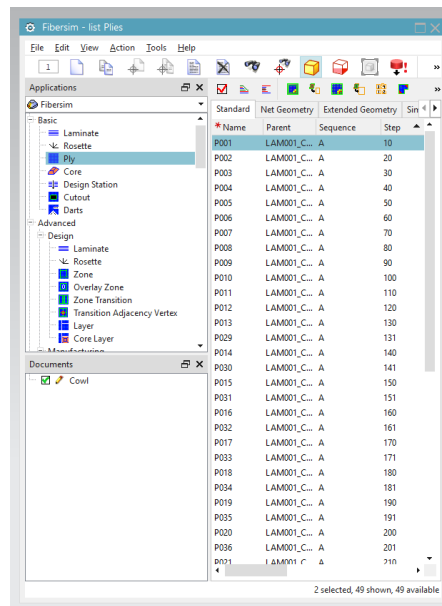


- Возможность моделирования драпировки материала
- Возможность введения разрезов

- Расчёт механических свойств пакета с учётом переориентации волокон материала или без неё

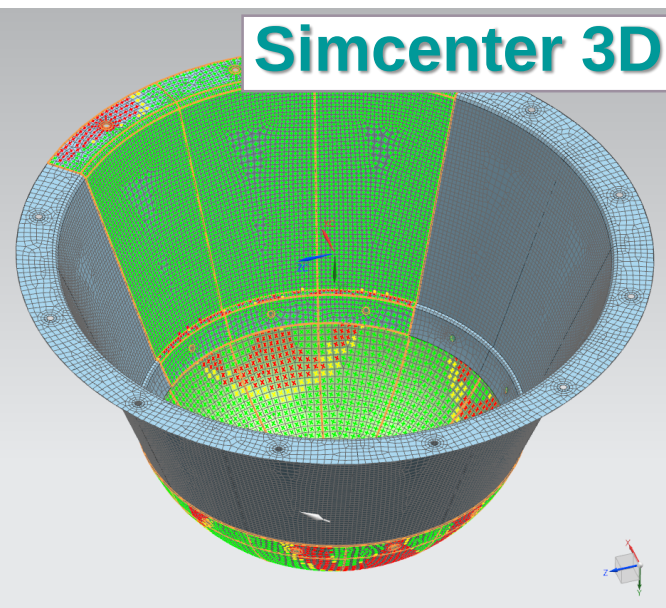
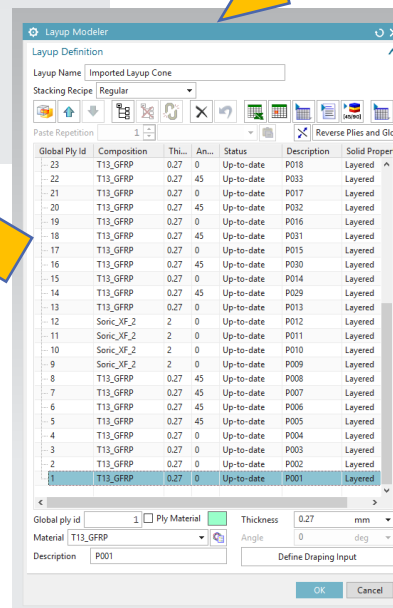


Экспорт укладки пакета из Fibersim в Simcenter 3D



Fibersim

- Возможность моделирования драпировки материала
- Возможность введения разрезов
- Двухсторонний обмен данными об укладке пакета с Simcenter 3D
- Широкие возможности в области подготовки производства

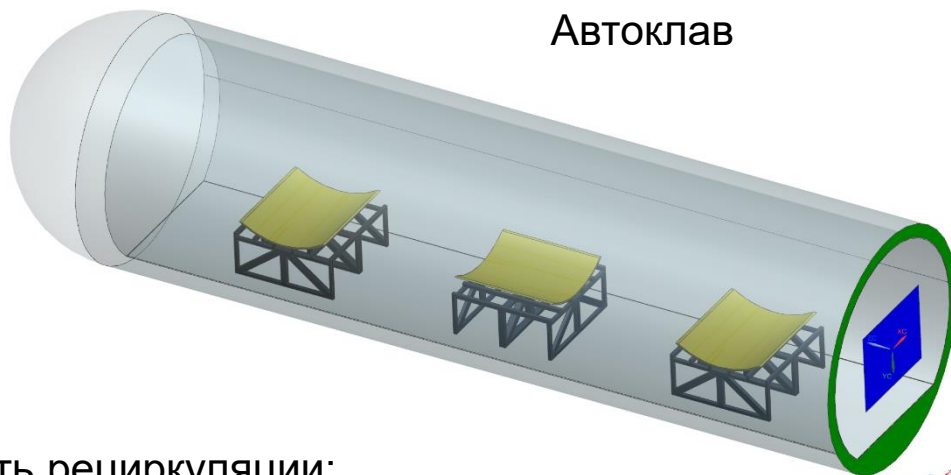


Simcenter 3D

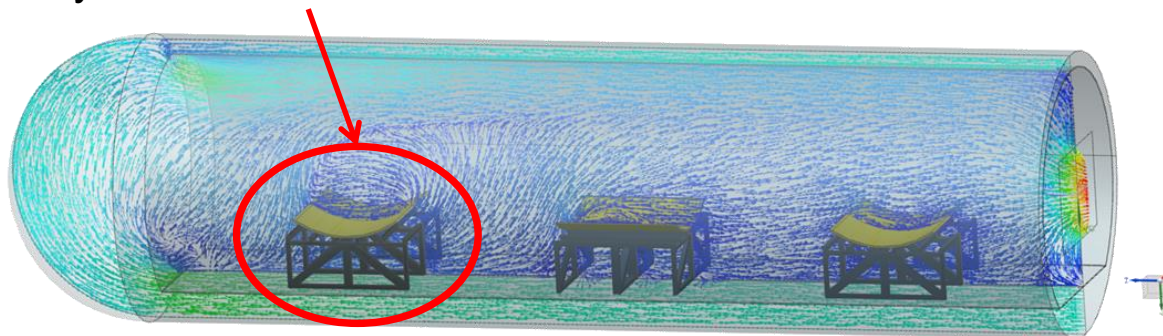
- Расчёт механических свойств пакета с учётом переориентации волокон материала или без неё
- Возможность редактирования в Simcenter 3D импортированной укладки

Возможность определения граничных условий для химико-термического анализа с помощью Simcenter Flow

Автоклав



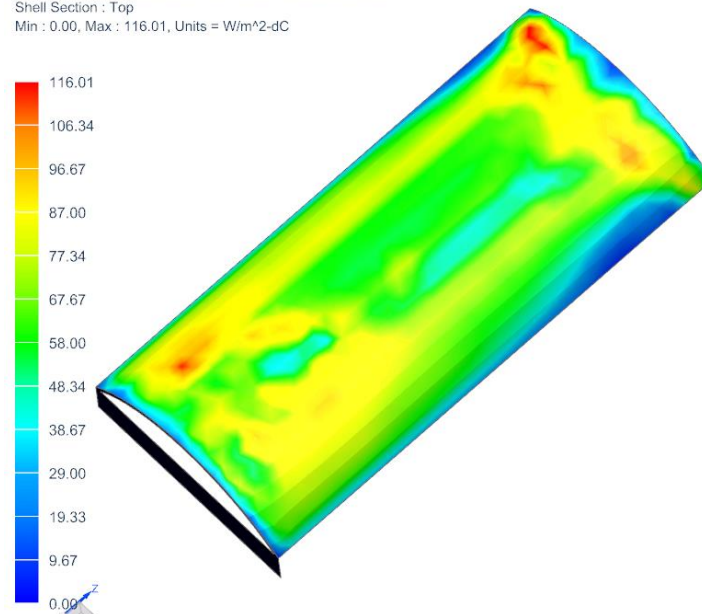
Область рециркуляции:
уменьшение скорости
воздушного потока и конвекции



Коэффициент конвективной теплоотдачи:

- учёт изменения по поверхности детали с течением времени
- передача в качестве граничного условия в химико-термический анализ

Load Case 1, Increment 14, 3600 sec
Local Convection Coefficient - Elemental, Averaged, Scalar
Shell Section : Top
Min : 0.00, Max : 116.01, Units = W/m^2-dC



Основные этапы моделирования технологического процесса полимеризации и коробления в Simcenter-Samcef

Полимеризация:
химико-термический
анализ

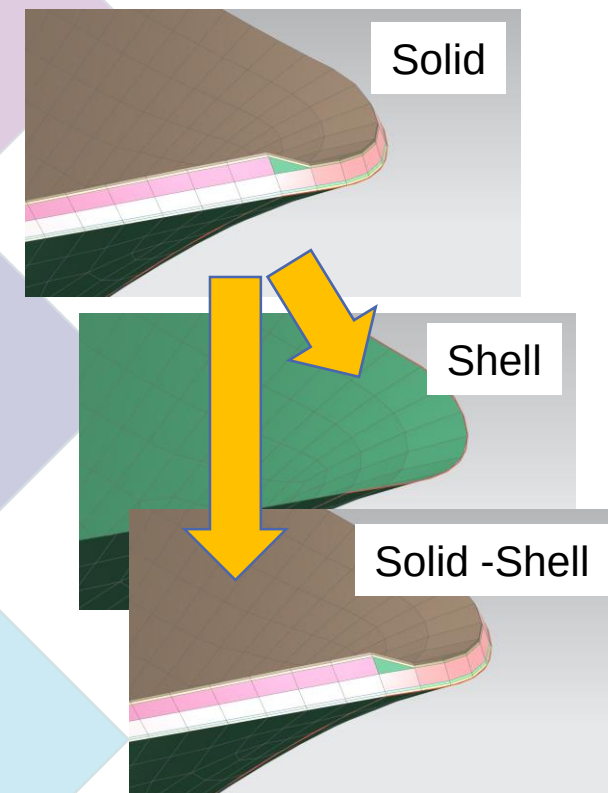
- **Конечноэлементный термический решатель:**
- Конвективный теплообмен
- Тепловой баланс и кинетическая модель отверждения
- Термический контакт изделия с оснасткой

Передача данных:
температура,
степень полимеризации,
температура
стеклования

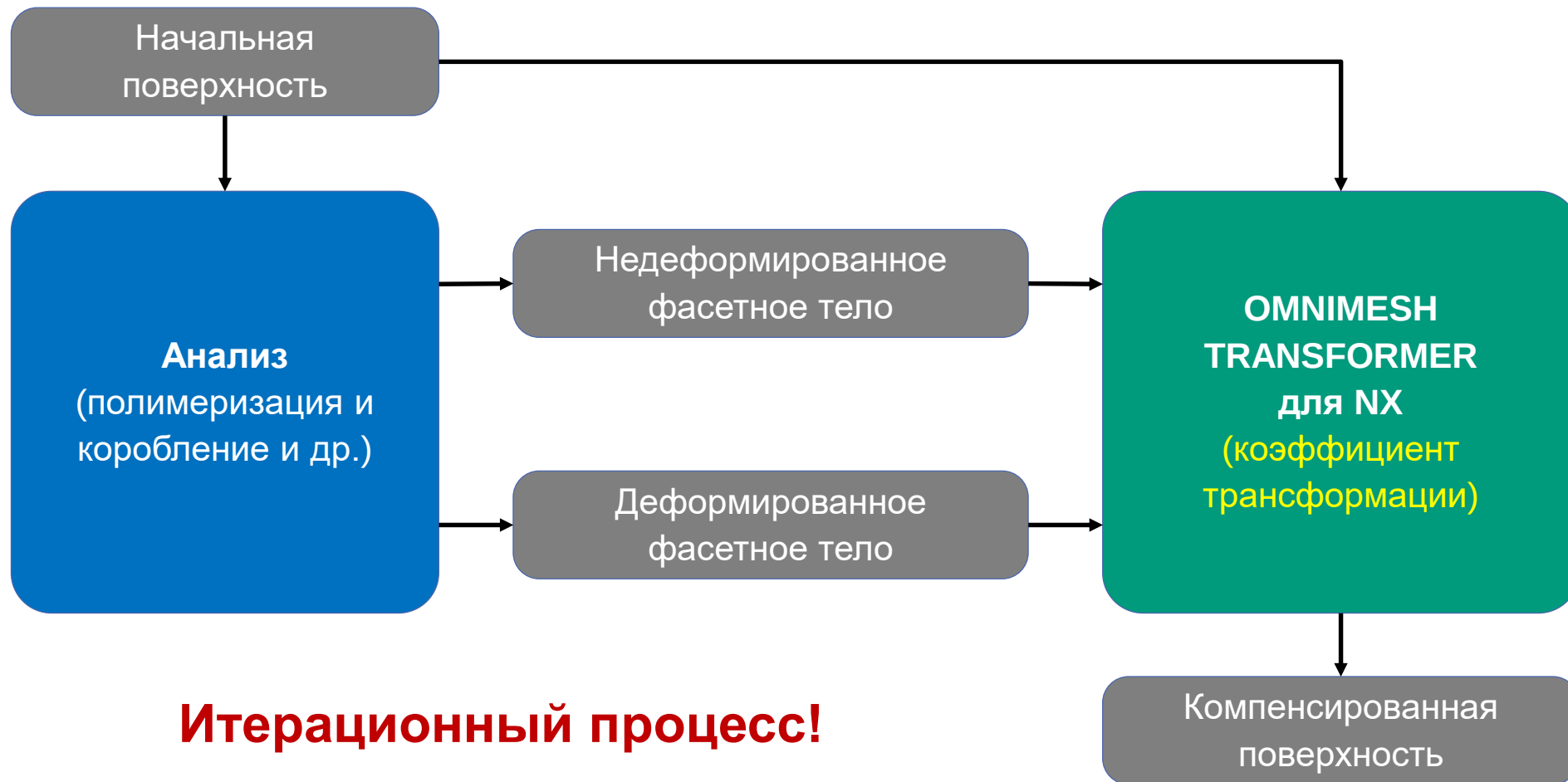
- **Прямая связка** в случае единой 3D-solid модели
- или
- **Мэппинг** типа 3D-solid → Shell или SolidShell в случае использования твердотельной модели для химико-термического и оболочечной или твердотельно-оболочечной модели для химико-механического анализа

Коробление:
химико-механический
анализ

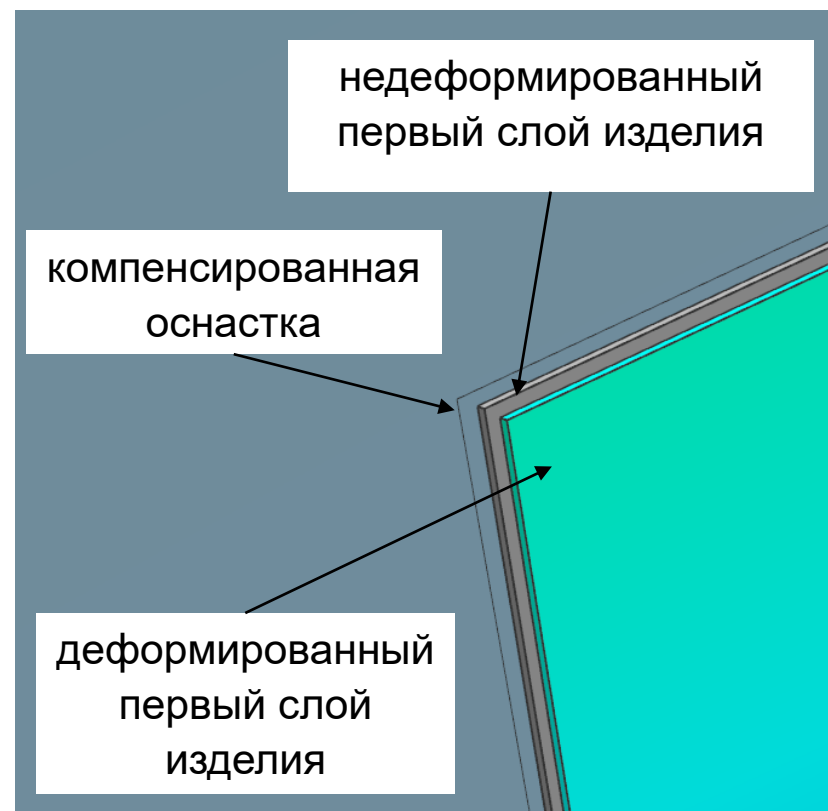
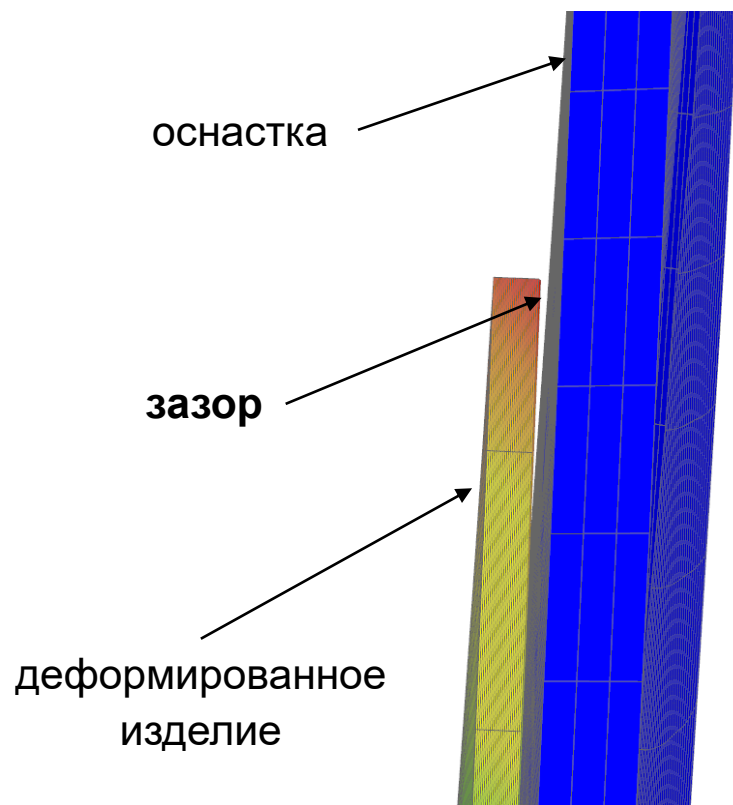
- **Эффективный нелинейный решатель:**
- Учёт внешнего прижимающего давления
- Учёт механического контакта и больших перемещений
- Моделирование снятия детали с оснастки



Создание поверхности оснастки с учётом компенсации производственных деформаций детали

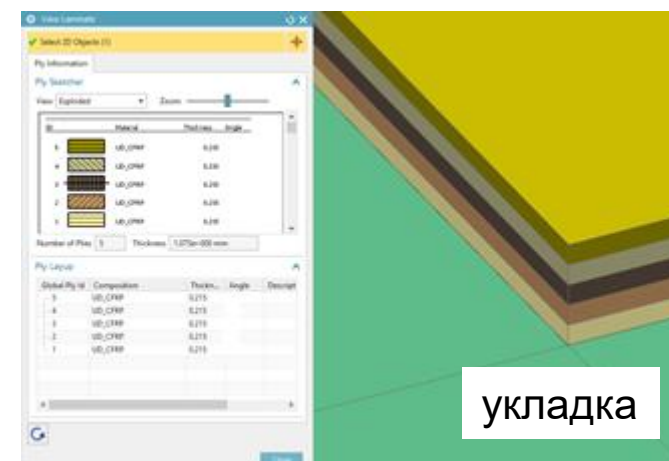
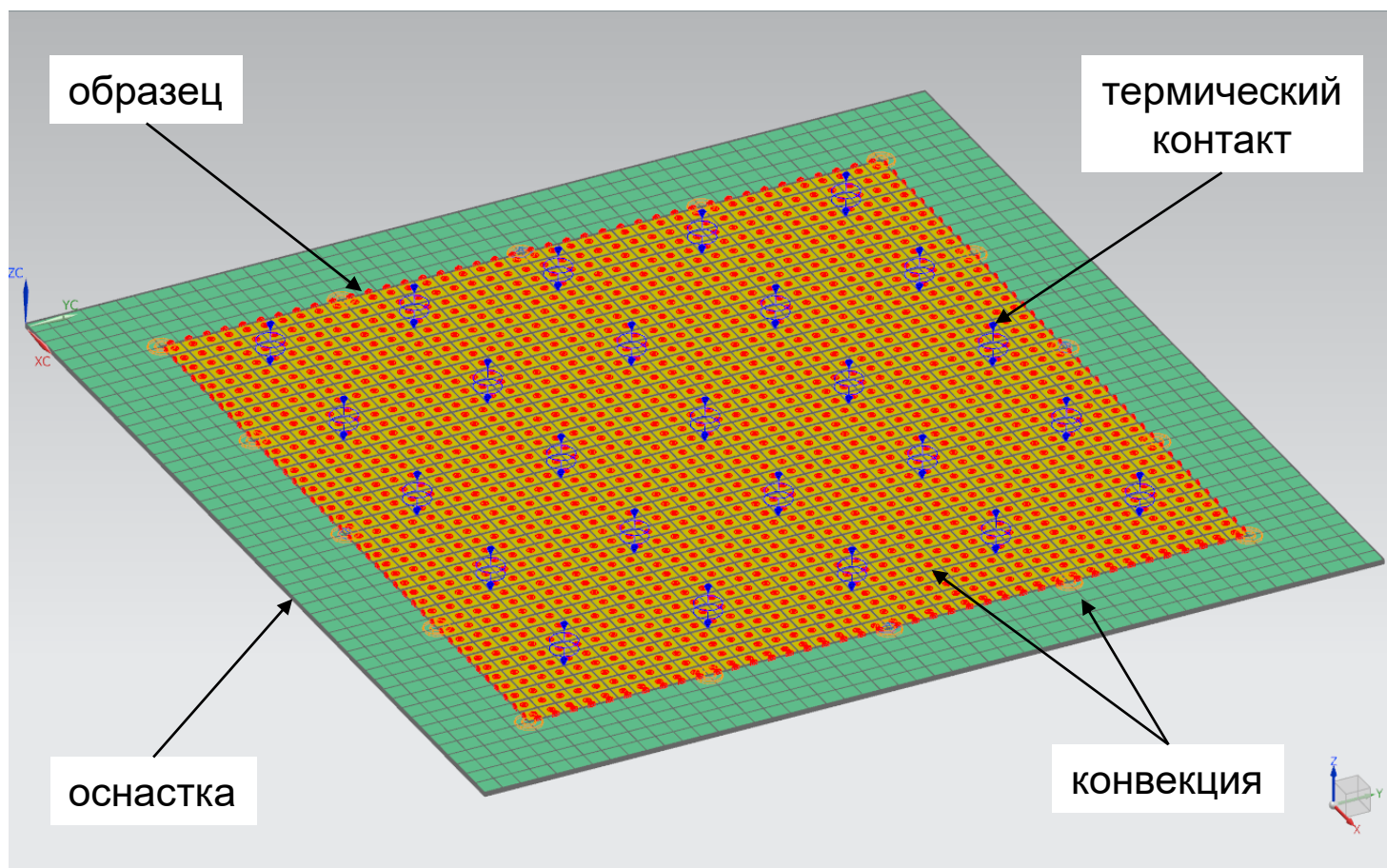


Результаты анализа коробления и внесение упреждения в оснастку с помощью OMNIMESH TRANSFORMER в NX

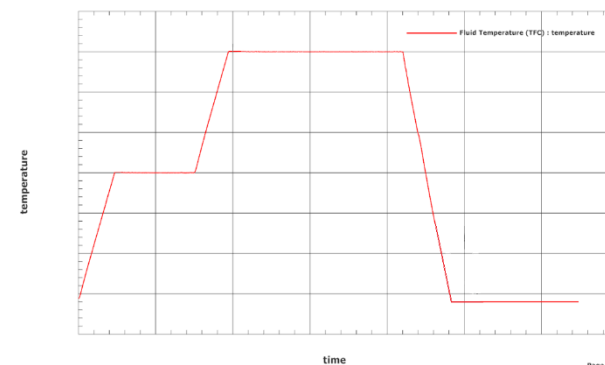


Пример 1: плоский образец из 5 слоёв однонаправленного углепластика с несимметричной несбалансированной укладкой

Модель с граничными условиями для химико-термического анализа

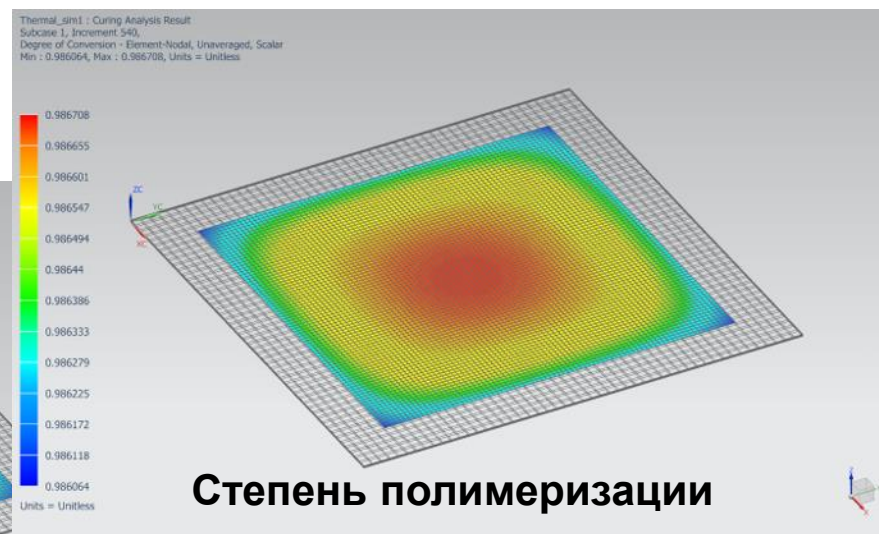
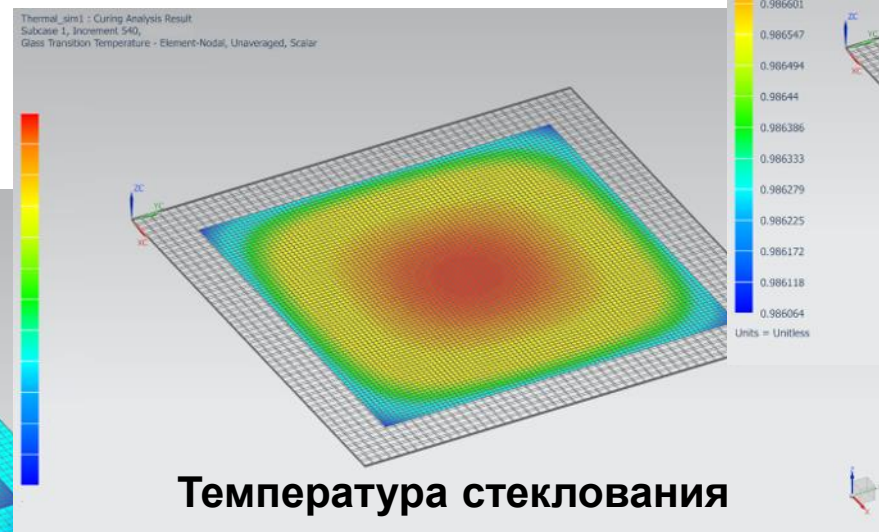
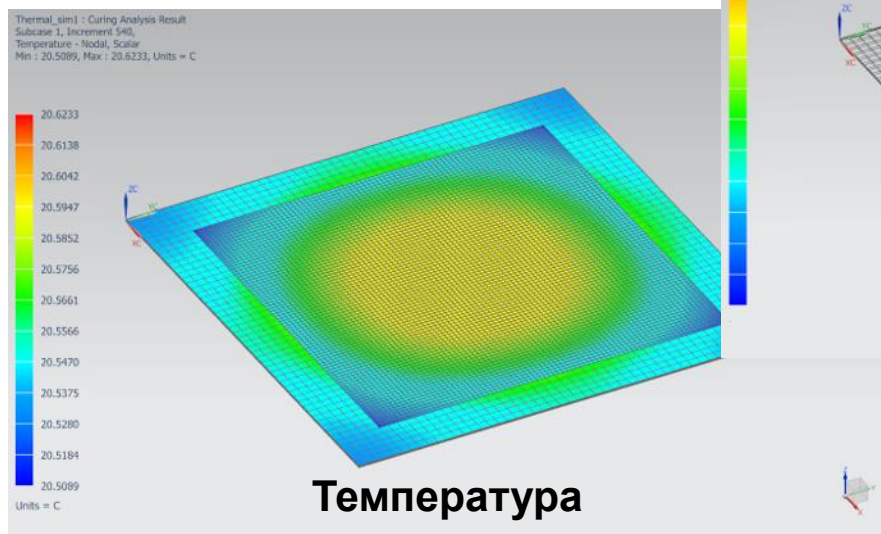


температурный цикл



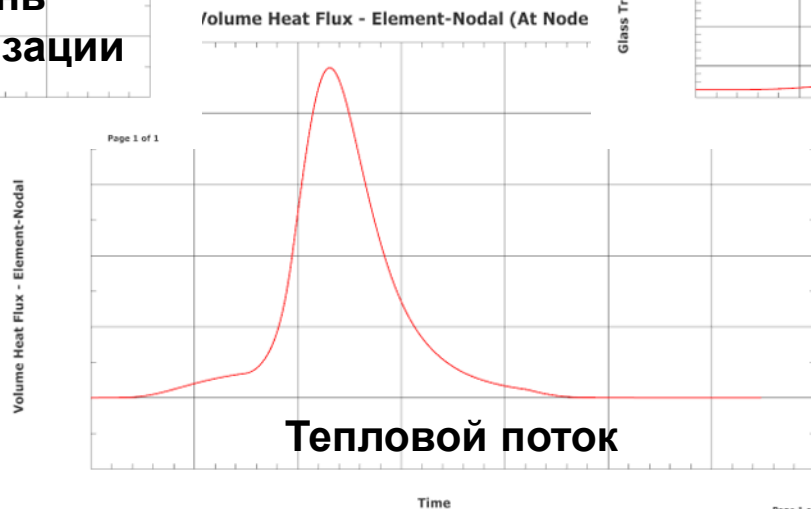
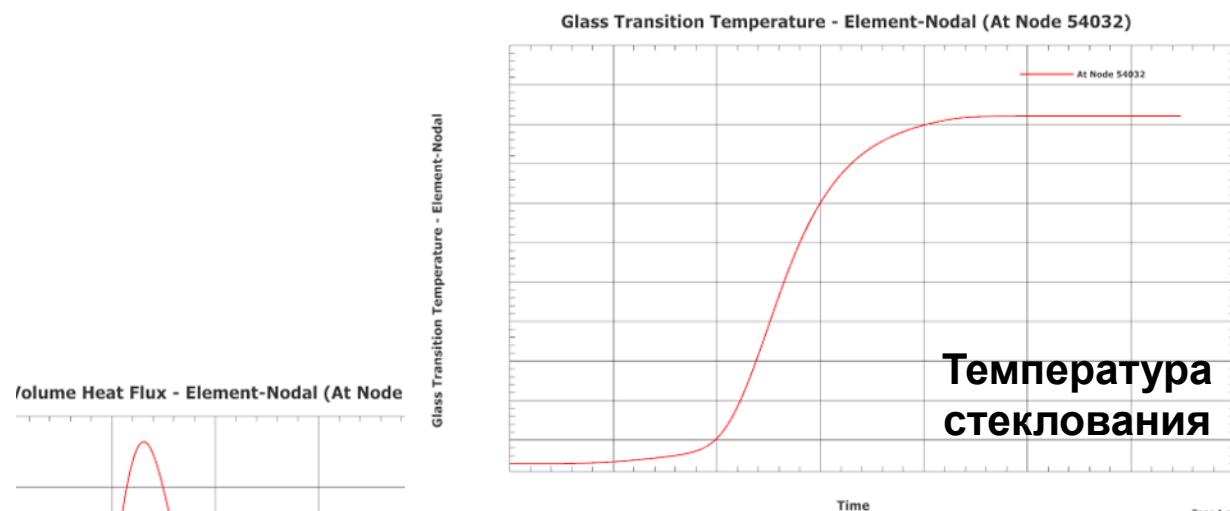
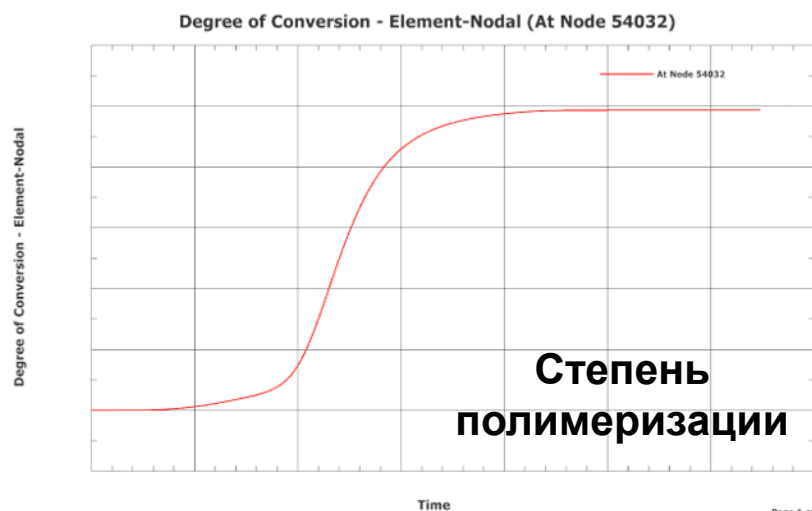
Пример 1: плоский образец из 5 слоёв однонаправленного углепластика с несимметричной несбалансированной укладкой

Результаты химико-термического анализа



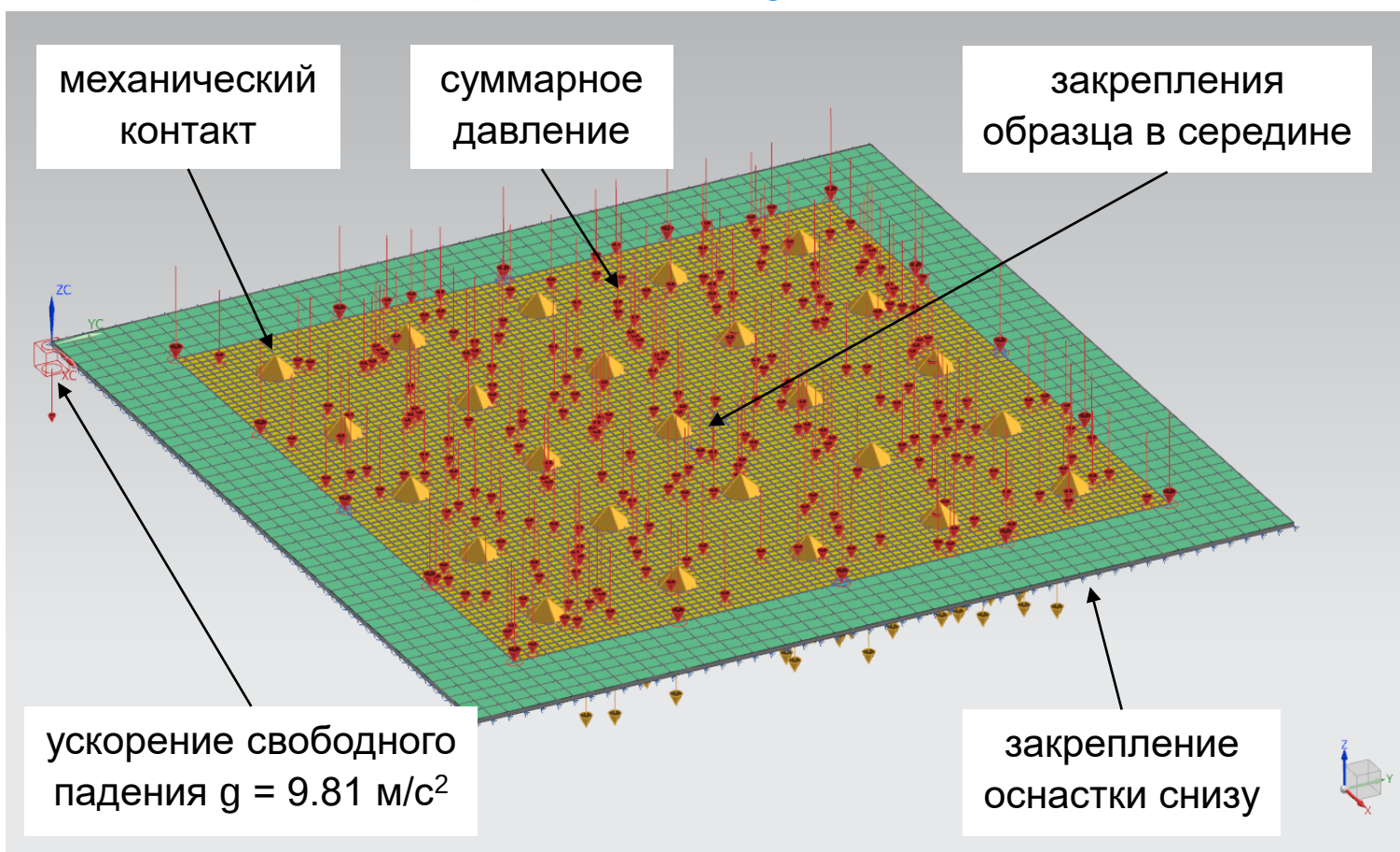
Пример 1: плоский образец из 5 слоёв однонаправленного углепластика с несимметричной несбалансированной укладкой

Результаты химико-термического анализа в графическом виде

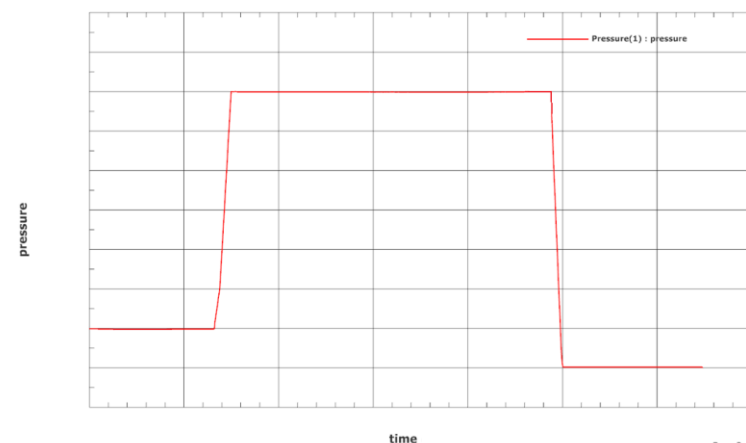


Пример 1: плоский образец из 5 слоёв однонаправленного углепластика с несимметричной несбалансированной укладкой

Модель с граничными условиями для химико-механического анализа



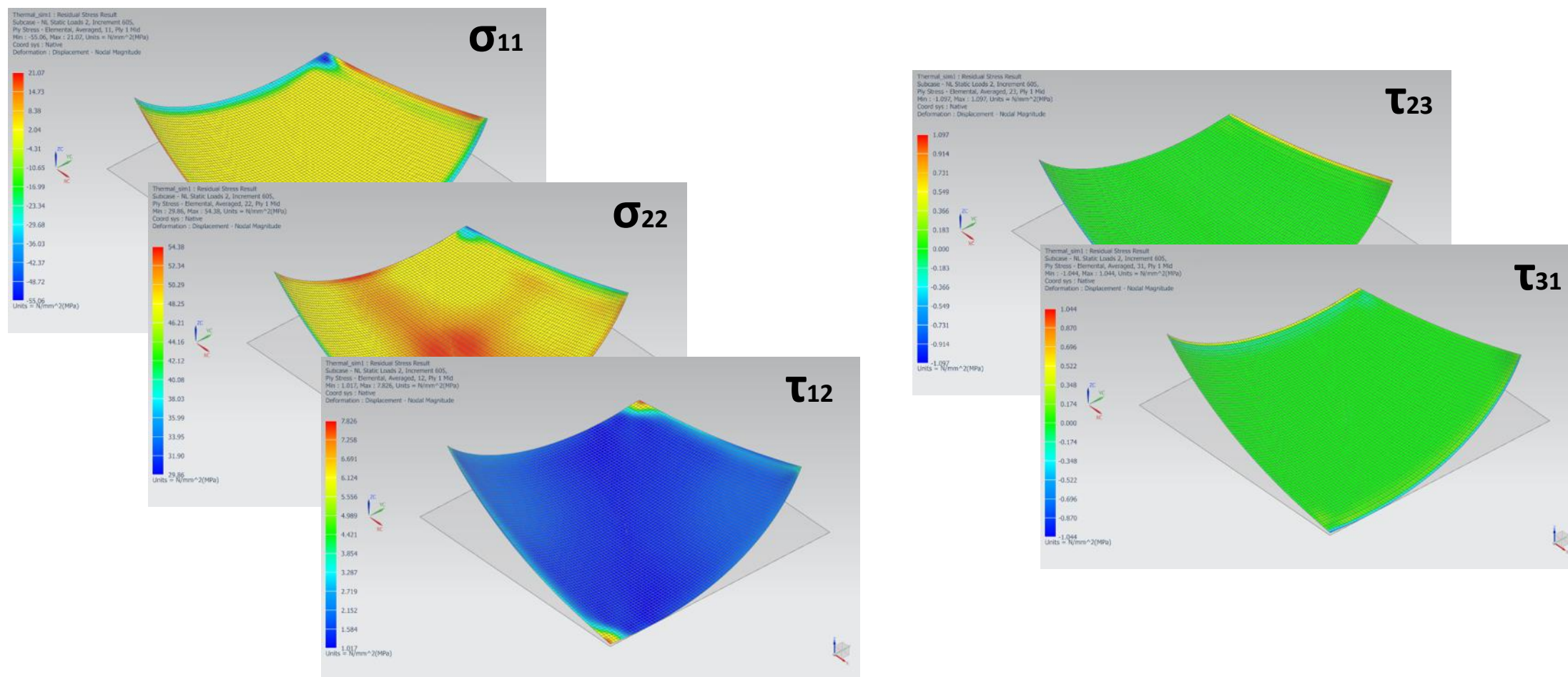
суммарное внешнее давление



Page 2 of 2

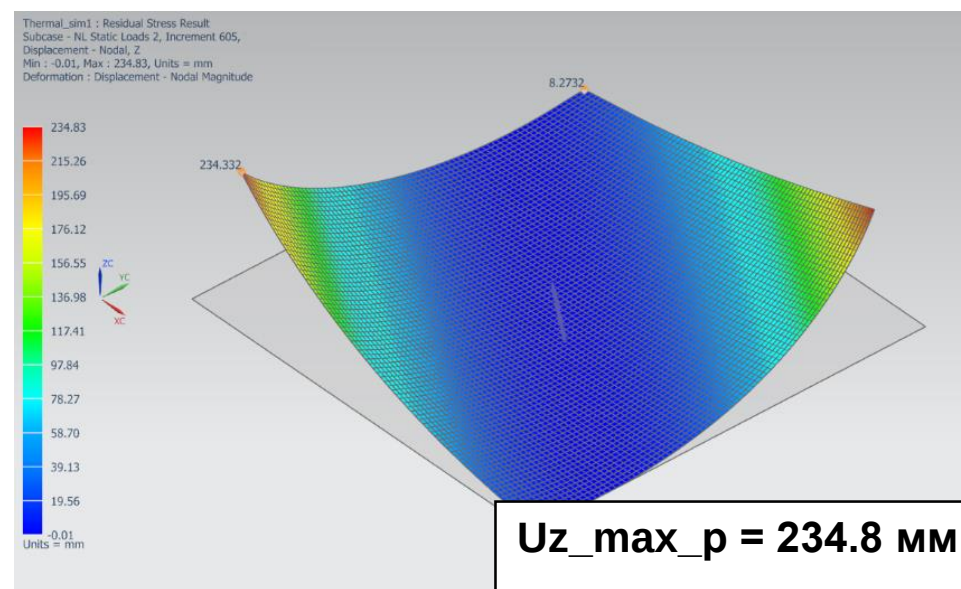
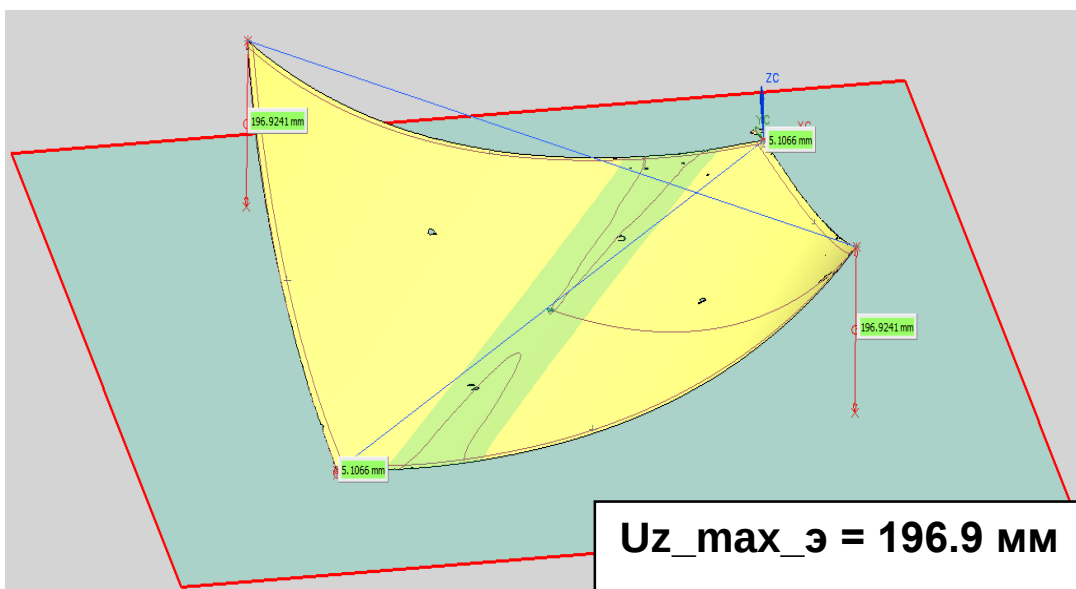
Пример 1: плоский образец из 5 слоёв однонаправленного углепластика с несимметричной несбалансированной укладкой

Результаты химико-механического анализа: тензор напряжений



Пример 1: плоский образец из 5 слоёв однонаправленного углепластика с несимметричной несбалансированной укладкой

Результаты химико-механического анализа:
сравнение вертикальных перемещений с экспериментальными данными

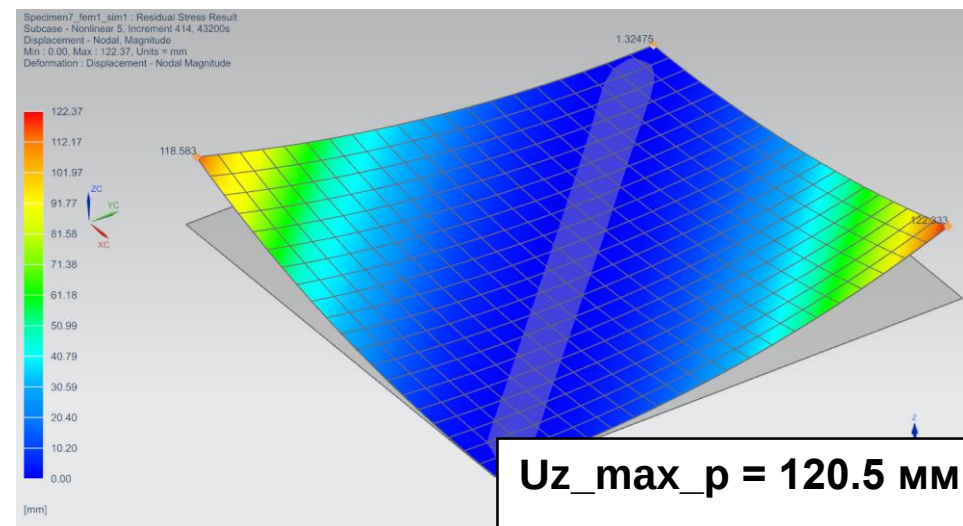
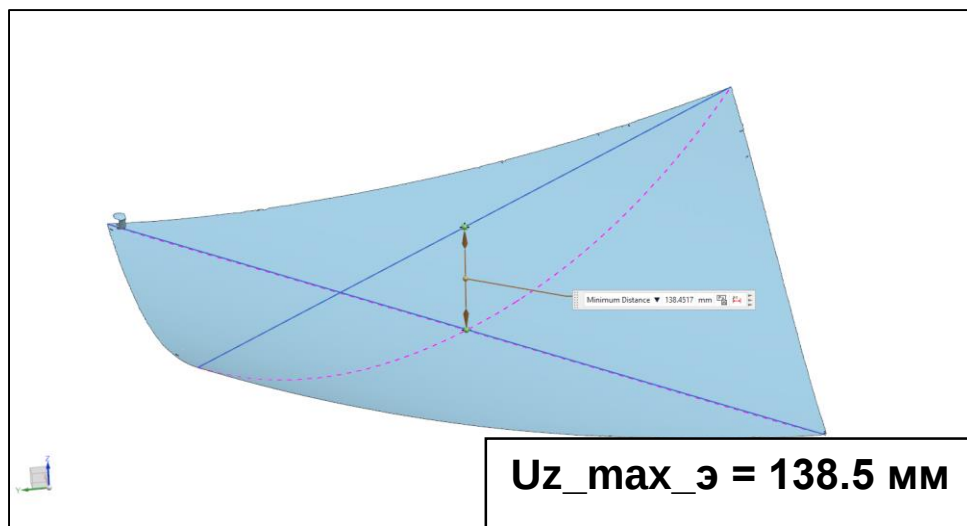


Относительная погрешность

$$\epsilon = 19 \%$$

Пример 2: плоский образец из 5 слоёв тканого углепластика и 1 слоя тканого стеклопластика

Результаты химико-механического анализа:
сравнение вертикальных перемещений с экспериментальными данными



Относительная погрешность

$$\epsilon = 13 \%$$

Выводы

- **Simcenter 3D** с решателем **Samcef** позволяет моделировать технологический процесс полимеризации и коробления изделий из слоистых однонаправленных и тканых композиционных материалов с удовлетворительной точностью
- Для успешного моделирования технологических процессов важно корректное определение свойств материалов, задание параметров режима отверждения и граничных условий
- Применение программного комплекса **NX-Fibersim-Simcenter-Samcef** обеспечивает возможность эффективного проектирования оснастки с учётом компенсации коробления детали

Solution
Partner
Smart Expert
Digital Industries
Software

SIEMENS

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Россия, 129366, г.Москва
ул. Ярославская, д.13 а, офис5
тел./факс +7 (495) 789-49-39
e-mail: its@inteso.ru