



# «Авиастроитель года»



## **Математическое и программное обеспечение сквозного цикла «CAD/CAE проектирование – моделирование - оптимизация» процессов формования крупногабаритных несущих авиационных конструкций из композиционных материалов**

**«Создание новой научной модели физического явления или технологического процесса»**

**Соискатель:**

**Южный научный центр Российской академии наук**

**Инициатор выдвижения:**

**Ростовское отделение Российской инженерной академии**

**2012 г.**



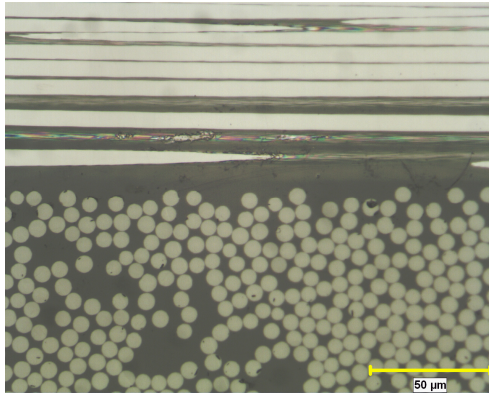
# СТРУКТУРА РАБОТЫ



1. Особенности технологии формования крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ)
2. Проблемы обеспечения качества несущих конструкций из ПКМ
3. Что осложняет эффективное управление процессом?
4. Кинетика полимеризации термореактивных связующих и ее модель
5. Моделирование распределенного управления процессом формования: от математической CAD модели к CAE конечноэлементному представлению
6. Как оптимизировать процесс?
7. Что нужно, чтобы CAD/CAE технологии заработали в серийном авиационном производстве?

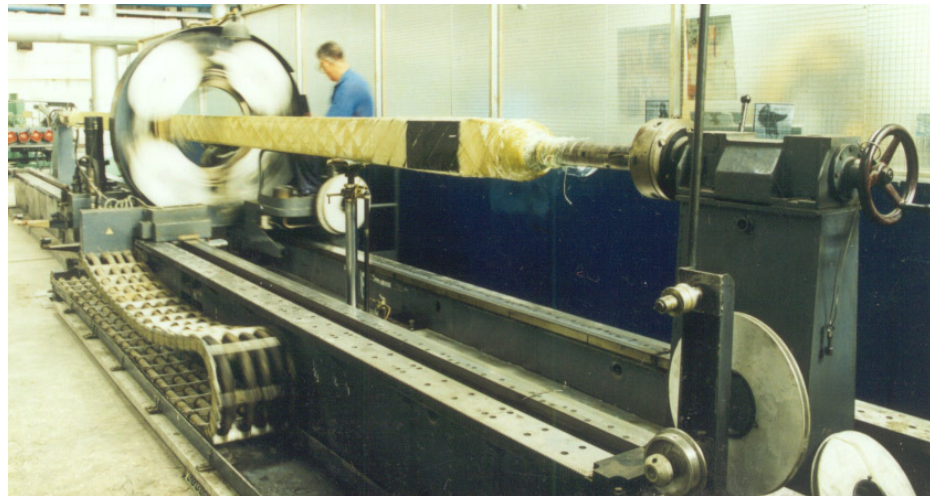
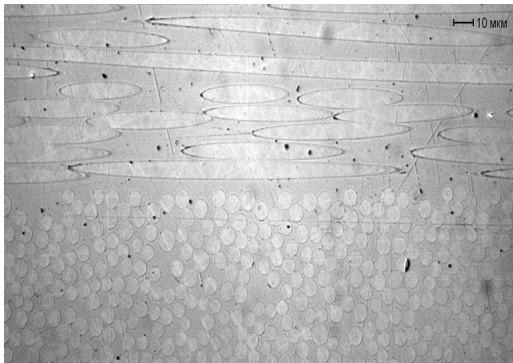


# Технологии формования крупногабаритных конструкций из ПКМ -1



Технология изготовления высокопрочных изделий из ПКМ включает следующие этапы:

- Формование однонаправленной ленты из армирующих волокон;
- Сушка-выжигание защитного слоя волокон;
- Намотка или укладка на формообразующую оправку;

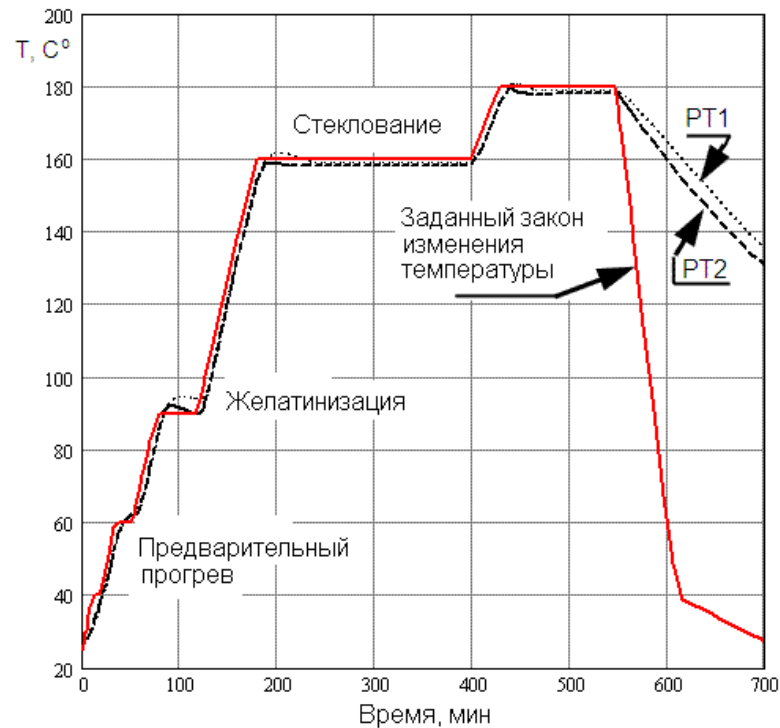
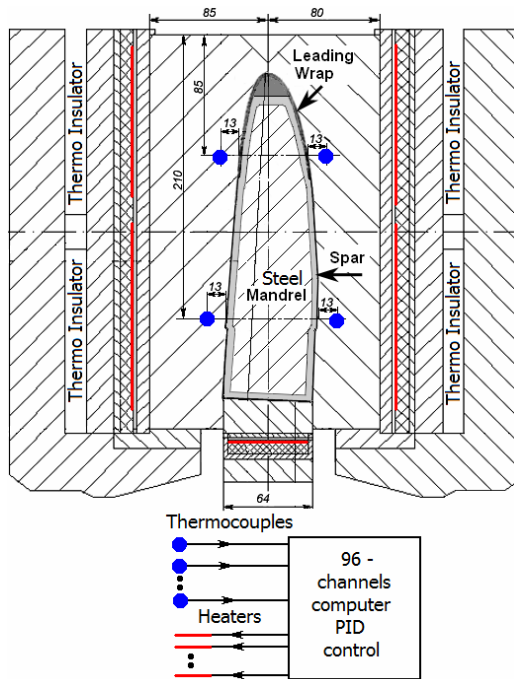




# Технологии формования крупногабаритных конструкций из ПКМ - 2



- Помещение намотанного изделия в прессформу;
- Выдержка при заданных режимах отверждения в течении около 20 ч.



# Проблемы обеспечения качества несущих конструкций из ПКМ



Основные требования к конструкции лонжеронов:

Стабильность упругих характеристик и характеристик прочности при эксплуатации, что обеспечивается:

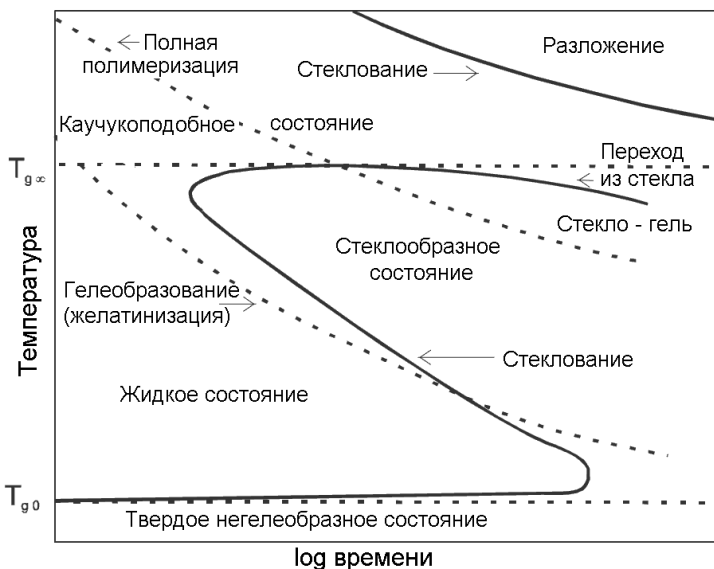
- Однородностью и стабильностью механических свойств по всем сечениям;
- Отсутствием микродефектов и включений (пузырьков воздуха);
- Низкой ползучестью связующего.

Проблемы технологического обеспечения:

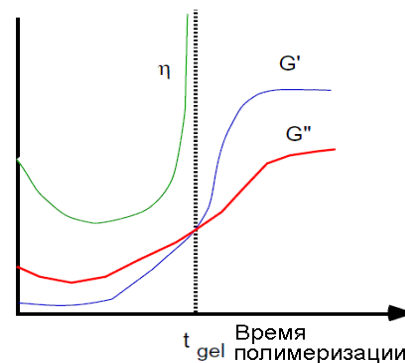
- Обеспечение работы сырым препрегом (чистота, влажность);
- Предотвращение образования твёрдой корки при формовании;
- Обеспечение наблюдаемости процесса полимеризации;
- Синтез оптимального закона управления температурно-силовым режимом.



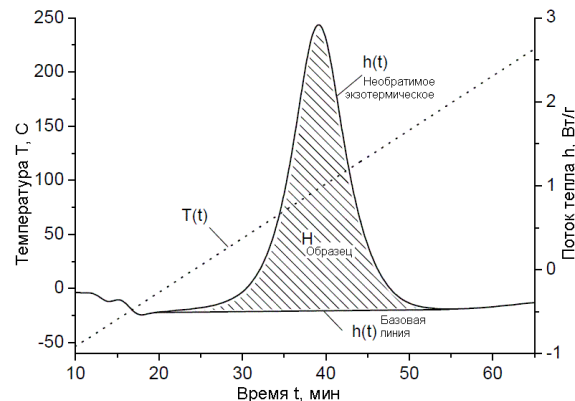
# Что осложняет эффективное управление процессом?



Эпоксидсодержащие полимеры изменяют свое агрегатное состояние и реологические характеристики в некотором температурном диапазоне, причем расположение этого диапазона может различаться; при полимеризации выделяется экзотермическое тепло; процесс ненаблюдаем, т.к. невозможно разместить датчики внутри формируемого изделия.



$\eta$  - вязкость при постоянной скорости течения;  
 $G'$  - упругий модуль сдвига;  
 $G''$  - сдвиговый модуль потерь





# Кинетика полимеризации термореактивных связующих и ее модель



Обобщенное кинетическое уравнение процесса полимеризации

$$\dot{\alpha}(T, \alpha) = [A_1 e^{(-E_1/RT)} + A_2 e^{(-E_2/RT)} \cdot \alpha^m] \cdot (\alpha_{\max} - \alpha)^n$$

$$\alpha_{\max} = B_0 + B_1 T + B_2 T^2$$

Кинетическая модель	Значение постоянных
Автокаталитическая 1	$B_0=1, B_1=B_2=0$
Автокаталитическая 2	$B_2=0$
Изотермально-автокаталигическая	$B_0=1, B_1=B_2= E_1=E_2=0$
Модель Камала-Сурура	$B_0=1, A_1=E_1= B_1=B_2=0$
Изотермическая модель Камала	$B_0=1, A_1=E_1=E_2=B_1=B_2=0$
Упрощённая модель Камала	$B_0=1, A_1=E_1=B_1=B_2=m=0$
Изотермическая упрощённая модель Камала	$B_0=1, A_1=E_1=E_2=B_1=B_2=m=0$
Модифицированная модель Камала	$A_1=E_1= B_2=0$
Изотермическая модифицированная модель Камала	$A_1=E_1= E_2=B_1=B_2=0$

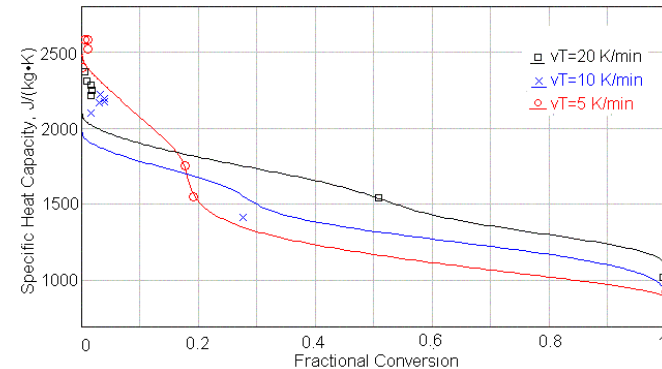
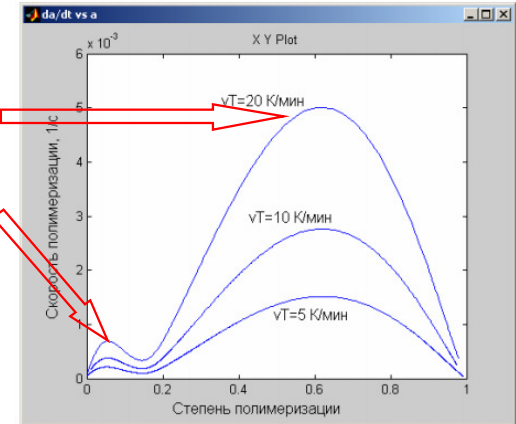
**Неудовлетворительны для описания  
двумодальной кинетической кривой!**



Предлагаемое кинетическое уравнение

$$\dot{\alpha} = [A_1 e^{-E_1/RT} e^{-\alpha/\alpha_1} + A_2 e^{-E_2/RT} \alpha^m] \cdot (1 - \alpha)^n$$

Двумодальная кинетическая кривая для используемого эпоксидного связующего



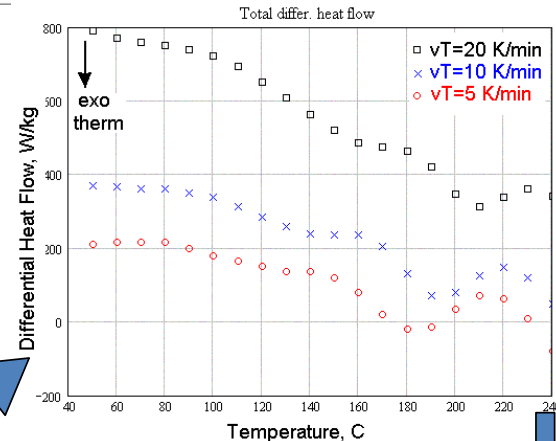
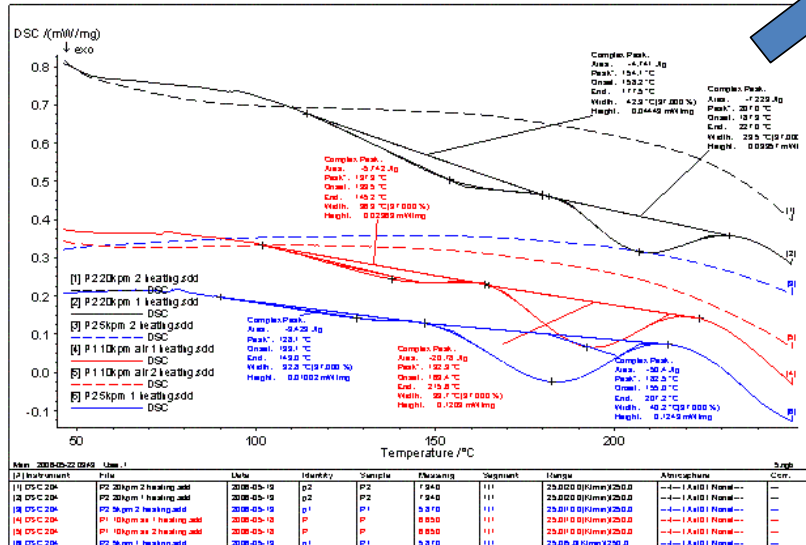
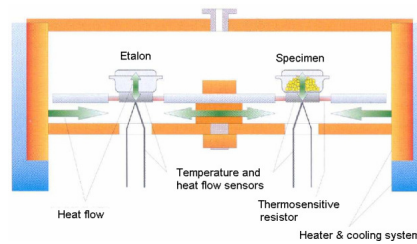
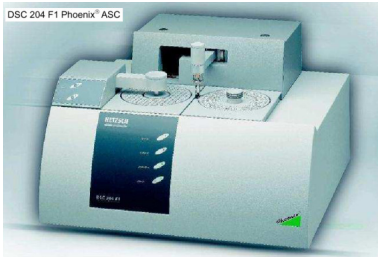
Зависимость удельной теплоёмкости эпоксидного связующего от степени полимеризации при различных скоростях нагрева



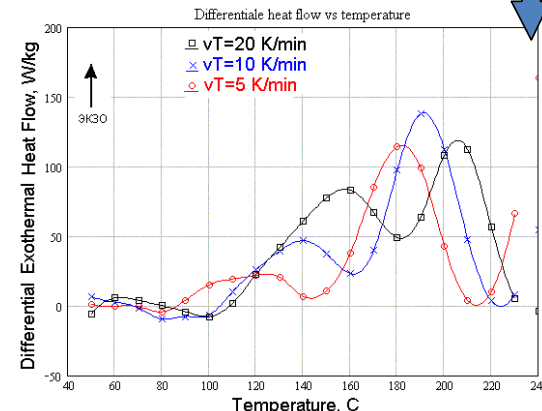
# Кинетика полимеризации термореактивных связующих и ее модель



## ДСК эксперимент



Зависимость общего дифференциального потока тепла от температуры



Зависимость экзотермических тепловых потоков от температуры в процессе ДСК-сканирования





# Связанная модель кинетики полимеризации и теплопередачи в композите



Уравнение теплопроводности:  $\rho_c C_c \partial T / \partial t + \nabla(-h_c \nabla T) = Q_{exo}$

Кинетическое уравнение:  
(допущение о квазиоднородной среде)

$$\frac{d\alpha(\alpha, \mathbf{r}, t)}{dt} = [A_1 e^{-E_1/RT} e^{-\alpha/\alpha_1} + A_2 e^{-E_2/RT} \alpha^m] \cdot (1 - \alpha)^n$$

Эмпирическая зависимость теплоемкости связующего:

$$C_r = [C_f - (C_f - 1.15C_s) \cdot H(\alpha - \alpha_t, \delta\alpha)] \cdot (.8 + .2e^{-\alpha}) (*)$$

где  $C_f$  и  $C_s$  удельная теплоемкость жидкого и полностью полимеризованного (твердого) связующего соответственно; конверсия  $\alpha_t$  соответствует скачку теплоемкости при фазовом переходе, и ширина  $\delta\alpha$  скачка сглаженной функции Хевисайда  $H$  определены соотношениями:

$$\alpha_t = .05 + .45 \tanh^2\left(\frac{dT/dt}{12}\right) \quad \delta\alpha = .1 + .4 \left[1 - \exp\left(\frac{dT/dt}{15}\right)\right]$$

Соотношение аналогичное (\*) использовано текущего значения теплопроводности связующего. Для этого следует заменить в (\*)  $k_r \rightarrow C_r; k_f \rightarrow C_f; k_s \rightarrow C_s$

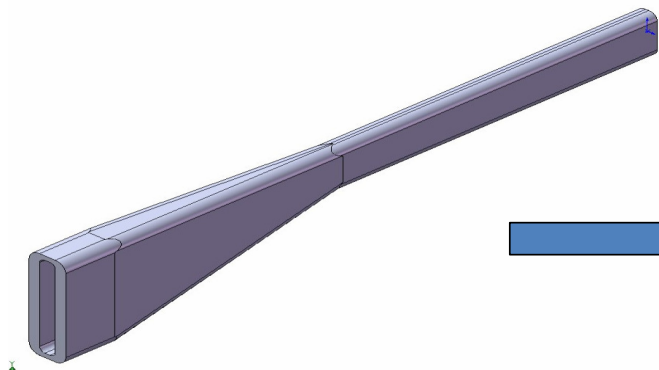
Плотность композита (правило смесей):  $\rho_c = \rho_f v_f + \rho_r (1 - v_f)$

Удельная теплоемкость композита (правило смесей):  $C_c = C_{fb} v_{fb} + C_r (1 - v_{fb})$

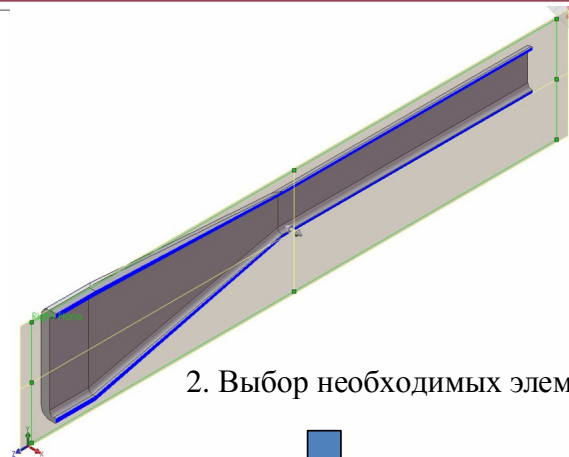
Коэффициент теплопроводности композита:  $k_c = k_r \cdot \frac{(1 + v_{fb}) \cdot k_{fb} + (1 - v_{fb}) \cdot k_r}{(1 - v_{fb}) \cdot k_{fb} + (1 + v_{fb}) \cdot k_r}$

Интенсивность экзотермического тепла:  $Q_{exo} = Q_{tot} \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t}$

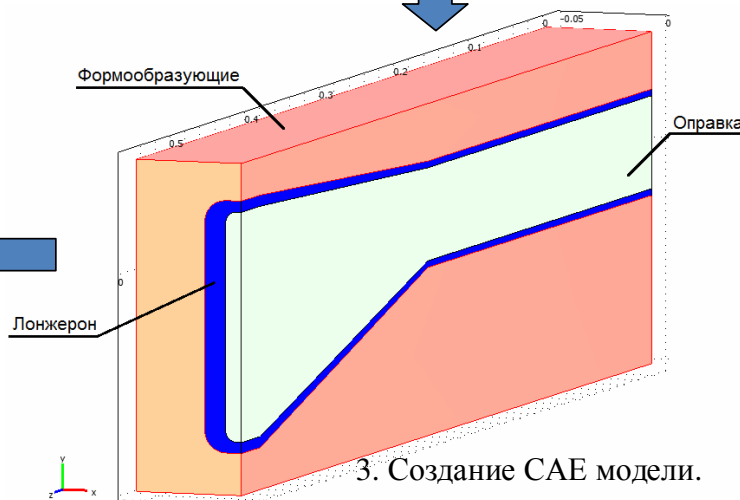
# Моделирование распределенного управления процессом формования: от математической CAD модели к CAE конечноэлементному представлению - 1



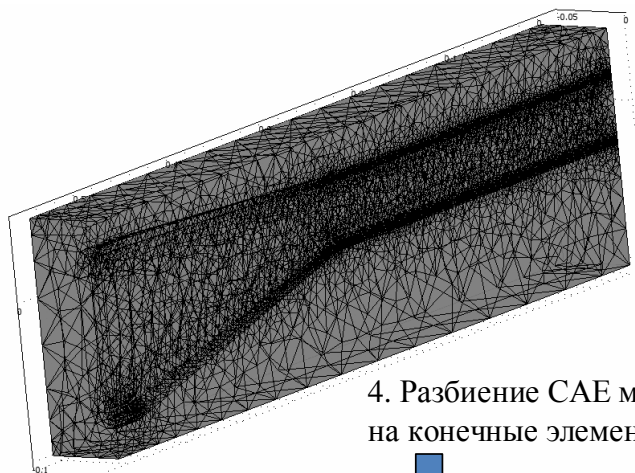
1. Разработка CAD модели.



2. Выбор необходимых элементов.



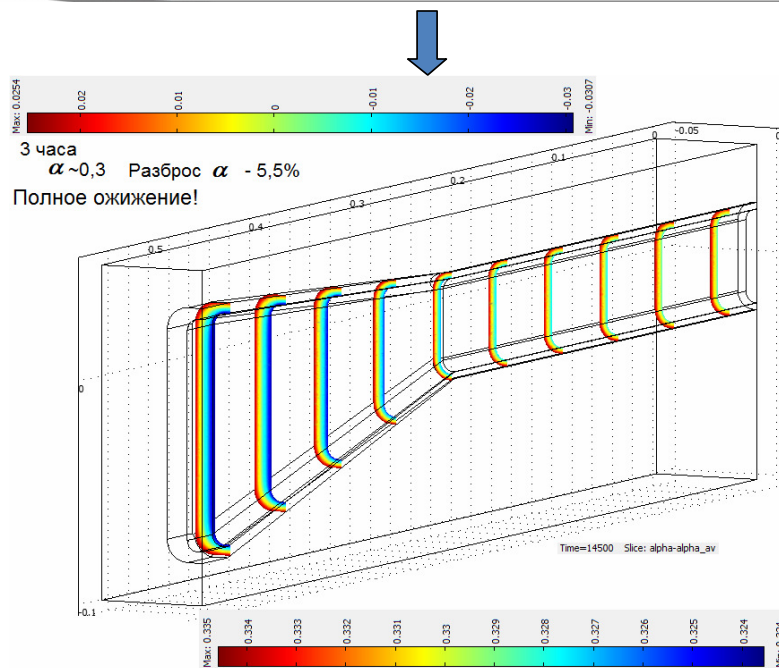
3. Создание CAE модели.



4. Разбиение CAE модели на конечные элементы.

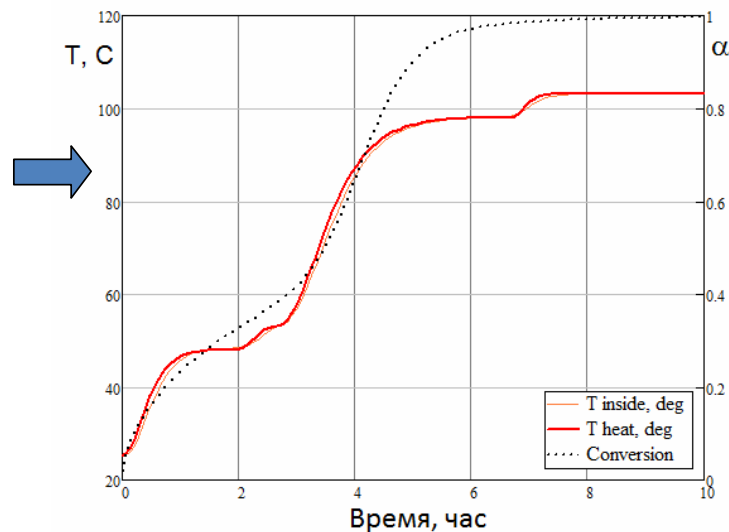


# Моделирование распределенного управления процессом формования: от математической CAD модели к CAE конечноэлементному представлению - 2



5. Получение данных в зависимости от поставленной задачи. Например, данное изображение показывает разброс степени полимеризации в лонжероне по истечении 3-х часов, степень полимеризации составляет 0,3 при этом разброс не превышает 5,5%, т.е. наступило полное ожигение материала и можно подавать давление в прессформу.

6. Получение необходимых графиков и диаграмм. Представлен совмещённый график температуры управляемых нагревателей и усредненной по телу изделия степени полимеризации по истечении 10 часов.



# Как оптимизировать процесс - 1



Целевая функция  $J = w_1 \cdot \langle |d\alpha/dy| \rangle_{t_0} + w_2 \cdot t_0$

где:  $\langle \alpha \rangle \equiv \int_{\Omega} \alpha(y, T, t) d\omega$ ;  $\langle d\alpha/dy \rangle \equiv \int_{\Omega} \frac{d\alpha(x, T, t)}{dy} d\omega$

Разыскивается  $min J$  при ограничениях:  $\alpha_1 \leq \langle \alpha \rangle_{t_0} \leq \alpha_2$

На стадии ожижения:  $\alpha_1 = 0.15; \alpha_2 = 0.35$

На стадии полимеризации  $\alpha_1 = 0.97; \alpha_2 = 1$

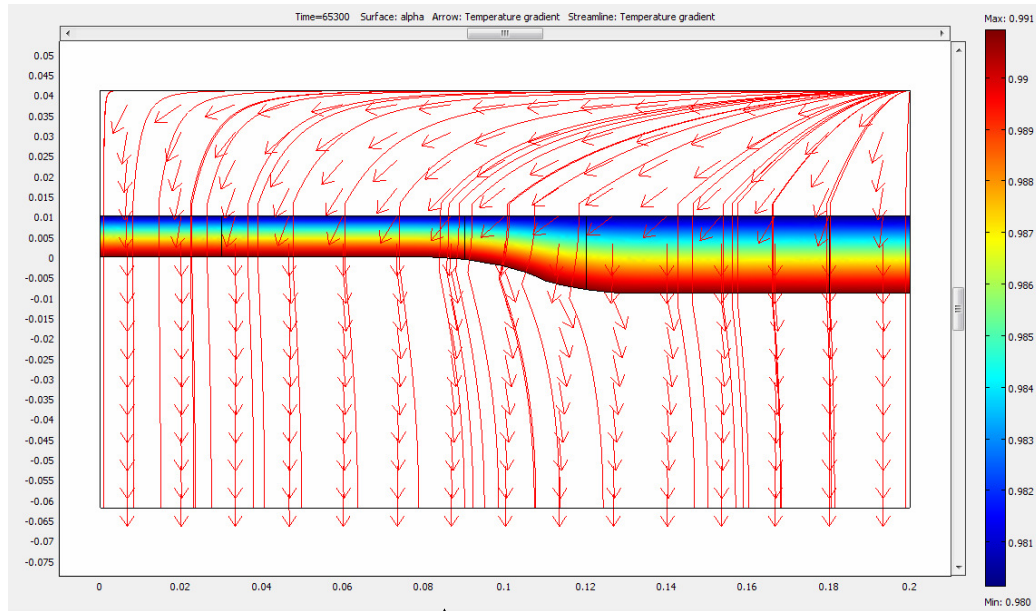
Температура на нагреваемой поверхности – кусочно-непрерывная функция 6 параметров  $T_1, T_2, T_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ , по которым ищется минимум целевой функции.

$$T_{heat}(t, T_1, T_2, T_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3)$$

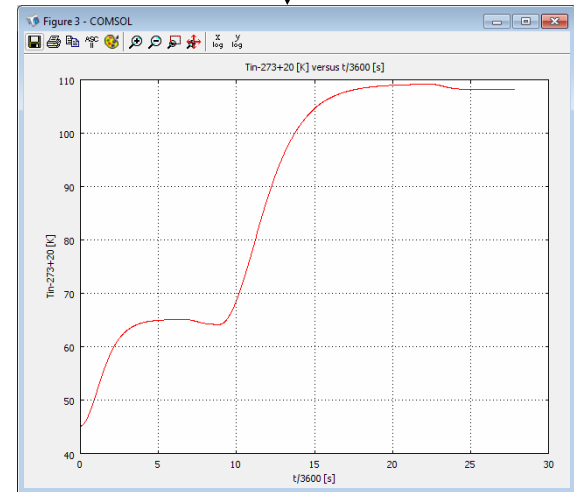
На каждой стадии полимеризации производится минимизация по 4 параметрам с помощью генетического алгоритма, выполняющего на каждом шаге нестационарный анализ связанной модели кинетики полимеризации и теплопередачи.



# Как оптимизировать процесс - 2



Оптимальный закон изменения температуры нагрева прессформы при полимеризации толстостенной композитной конструкции со ступенчатым переходом в сечении



Пример работы программы оптимизации нагрева прессформы. Цветом показано распределение конверсии по сечению изделия, справа – расшифровка цветовой шкалы. Стрелки показывают направление температурного градиента. Выше закрашенной области (композита) – стальная оправка, ниже – формообразующая полуформа. Вертикальная и горизонтальная линейки показывают размеры в метрах.



# Что нужно, чтобы CAD/CAE технологии заработали в серийном авиационном производстве?



Для эффективного использования разработки в производстве авиационных несущих полимерных композитных конструкций необходимо выполнение следующих условий.

1. Квалифицированные кадры в областях:

- термокинетического анализа полимеров;
- компьютерного конструирования изделий с использованием современных САД систем;
- выполнения прочностных и термодинамических расчетов с использованием современных САЕ систем;
- систем автоматического управления технологическими процессами.

2. Наличие современных лабораторных установок для термоанализа полимеров (ДСК,

желательно также ДТА, ДМА) фирм Mettler Toledo, Netzsch и т.п.

3. Наличие лабораторной базы для механических испытаний ортотропных полимерных композитов в соответствии с требованиями стандартов ASTM.

4. Наличие электронной документации на изделия.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**