

Оптимизация технологического процесса автоклавного формования композитных авиационных конструкций сложной формы с предварительным исправлением их геометрии

Дюков В.А.

Донской государственный технический университет, ДГТУ,

площадь Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, 344003, Россия

e-mail: d-victor-a@mail.ru

Статья поступила 14.12.2020

Аннотация

В работе приведены методы исправления геометрии тонкостенных композитных конструкций сложной формы, были построены топологически корректные модели препрега и формообразующей оснастки. Получение новых теоретических поверхностей препрега обеспечивалось рассечением граней исходных деталей параллельными или радиальными плоскостями и созданием поверхности по линиям пересечения данных плоскостей и связанных граней.

Моделям задавались теплофизические параметры препрега, производилось решение связанной задачи теплопередачи и полимеризации. В результате, были выбраны оптимальные температурные и временные режимы двухстадийного цикла автоклавного формования, которые обеспечивают достижение требуемого значения степени полимеризации препрега из углепластика, и минимизированы разбросы температуры и степени полимеризации связующего в полимеризуемом объеме.

Результаты симуляций процесса формования продемонстрировали существенную зависимость как средних значений температур и степени полимеризации препрега, так и их разброса в объеме препрега и формы, от характеристик технологического процесса и технологических ограничений.

Ключевые слова: оптимизация технологического процесса, автоклавное формование, полимерные композитные материалы, CAD/CAE технологии.

Введение

Создание летательных аппаратов нового поколения и обеспечение характеристик надежности с учетом весовой эффективности возможно за счет все более широкого использования полимерных композитных материалов. Совершенствование физико-механических свойств дает возможность их применения не только в слабо- и средненагруженных элементах конструкций летательных аппаратов, но и в высоконагруженных компонентах типа крыльев, хвостового оперения, рулей высоты и направления, органов механизации и других агрегатов (рис.1).

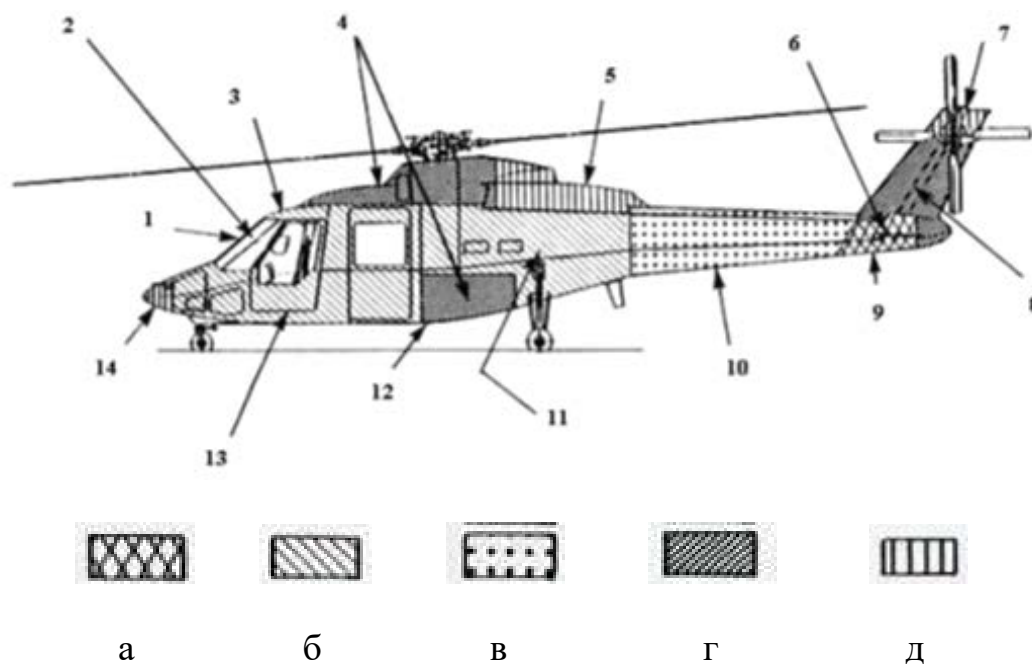


Рисунок 1 Использование ПКМ в конструкции современного вертолета (Sikorsky S-75 ASAR Helicopter) [1]: а – графитированная ткань; б – армирование кевларом/графитом; в – ПКМ, полученные намоткой графитовой нити; г – сэндвич-панели, армированные графитом/кевларом; д – кевларовая ткань; 1 - каркас лобового стекла; 2 - лобовое стекло; 3 - потолочная панель; 4 - обтекатели главного редуктора и топливных отсеков; 5 - обтекатель СУ; 6 - стабилизатор; 7 - киль; 8 - лонжерон кия; 9 - обтекатель стабилизатора; 10 - хвостовая балка; 11 - цельная интегральная переборка; 12 - рама крепления топливных баков; 13 - дверь; 14 - носовой обтекатель.

Обработка передовых композиционных материалов заключается в ряде связанных физико-химических явлений. Они включают в себя распространение тепла в технологической системе, преобразования тепловых, кинетических и реологических свойств материала на всех стадиях цикла полимеризации, и учитывая весь спектр ограничений, накладываемых характеристиками используемого технологического оборудования, оснастки, свойствами материала и т.п.

Моделирование процесса позволяет решить соответствующие определяющие уравнения в соответствии с набором заданных начальных и/или граничных условий для прогнозирования параметров, таких как температура и степень полимеризации. Процесс моделирования заключается в решении связанной задачи, которая включает описание процессов теплопередачи и термокинетики с отличающимися граничными условиями (свойственным для автоклавного формования) и зависимостями теплофизических свойств от температуры и степени полимеризации, определенными в результате предварительно выполненных испытаний материала методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

При решении задач проектирования и разработки технологии производства конструкций из композиционных материалов в САЕ системах часто возникают проблемы, связанные с наличием скрытых ошибок построения в САД-моделях. Эти ошибки, как правило, связаны с погрешностями обеспечения непрерывности поверхностей, образующих геометрию 3D-модели. Подобные погрешности не только препятствуют построению моделей самой детали и ее оправки, но и приводят к ошибкам, возникающим при импортировании в САЕ системы и работе в них. Данный вопрос подробно рассмотрен в докладе [2-4].

Основной целью данной работы является разработка методики моделирования топологически корректной композитной конструкции на основе геометрии, содержащей ошибки построения, и создание сборки, состоящей из моделей препрега и формообразующей оснастки, выбор оптимальных температурных и временных режимов двухстадийного цикла автоклавного формования для обеспечения требуемого значения степени полимеризации препрега из углепластика;

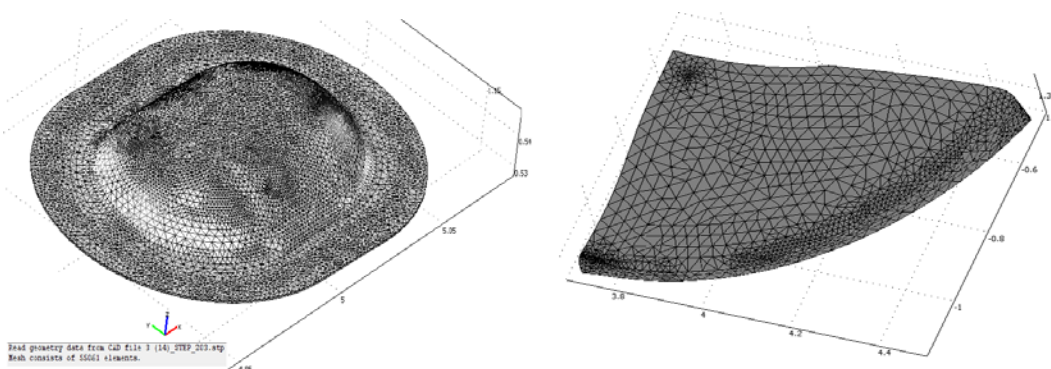
минимизация разброса температуры и степени полимеризации связующего в полимеризуемом объеме и исключение образования зон неполной полимеризации, зон обедненных или переобогащенных связующим, пористости.

Методы коррекции геометрии моделей композитных конструкций

В качестве рабочих моделей были использованы пять CAD-моделей деталей типа "Обтекатель", являющихся композитными конструкциями сложной геометрии. Все операции по коррекции геометрии проводились в программе Siemens NX.

Сначала было необходимо определить, содержит ли геометрия деталей ошибки. Для этого они импортировались в CAE систему COMSOL Multiphysics. Геометрия всех исходных моделей была успешно построена, однако их внешняя поверхность выполнена в виде объединения сегментов поверхностей.

Далее было построено конечно-элементное сеточное разбиение. КЭ сетка построилась только для четырех из пяти моделей. Однако полученные сетки имели сгущения элементов, недопустимые для дальнейшего расчета (рис.2).



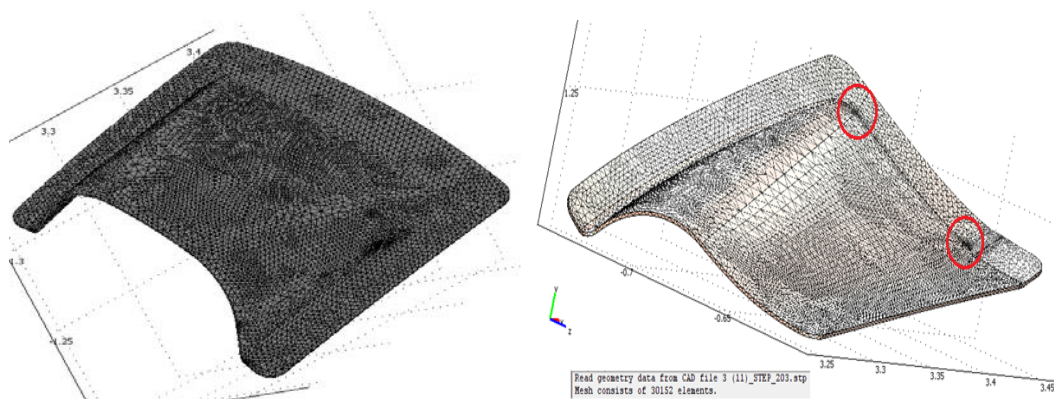


Рисунок 2 Сеточное разбиение деталей №1,2,4,5

Для детали №3 невозможно построить конечно-элементное разбиение в связи с отсутствием пересечений сегментов на одной из её границ (рис. 3) [5].

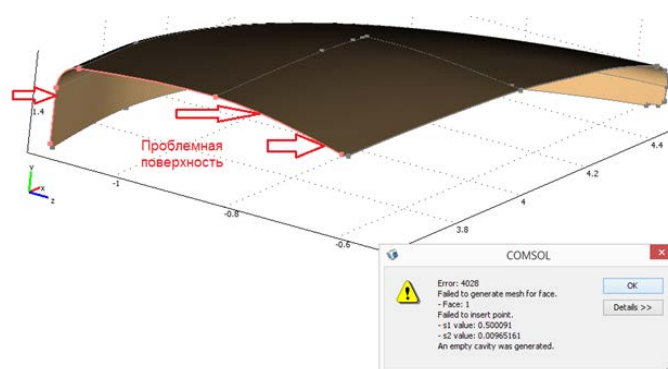


Рисунок 3 Проблемы, выявленные на узких боковых поверхностях детали №3

Таким образом, требуется исправить геометрию деталей. Для этого все детали импортировались в рабочую среду программы NX 10. С помощью инструментов системы анализировались параметры непрерывности поверхности, которые были отображены с помощью эпюры. На границах сегментов деталей отмечаются отклонения по 1-ой и 2-ой производным (рис. 4). При формировании геометрии детали, лишенной топологических погрешностей следует обеспечить непрерывность поверхностей.

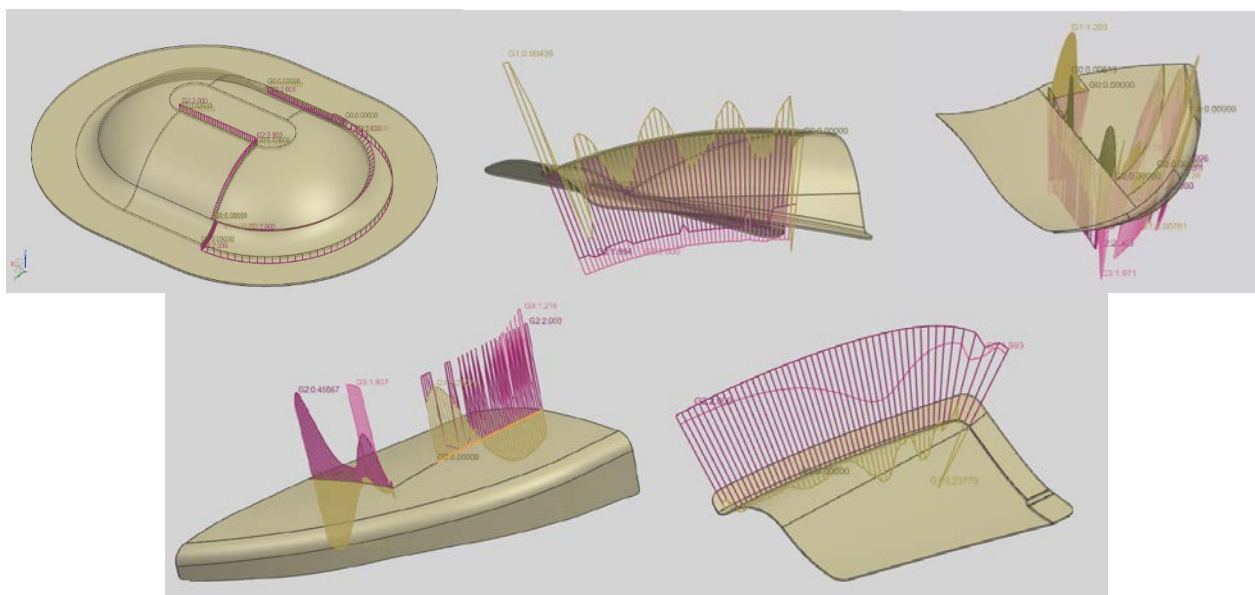


Рисунок 4 Анализ непрерывности наружных поверхностей деталей

Для решения поставленных задач создавались новые файлы, в которые копировалась геометрия исходных деталей. Получение новых теоретических поверхностей обеспечивалось посредством рассечения связанных граней исходных деталей параллельными или радиальными плоскостями и создания поверхности по линиям пересечения данных плоскостей и связанных граней (рис. 5) [6-7].

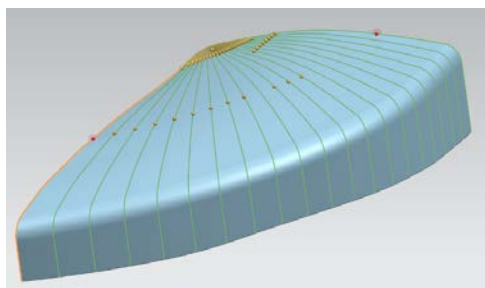


Рисунок 5 Результат построения поверхности по кривым пересечения детали №3

Новые теоретические поверхности имеет следующий вид (рис. 6):

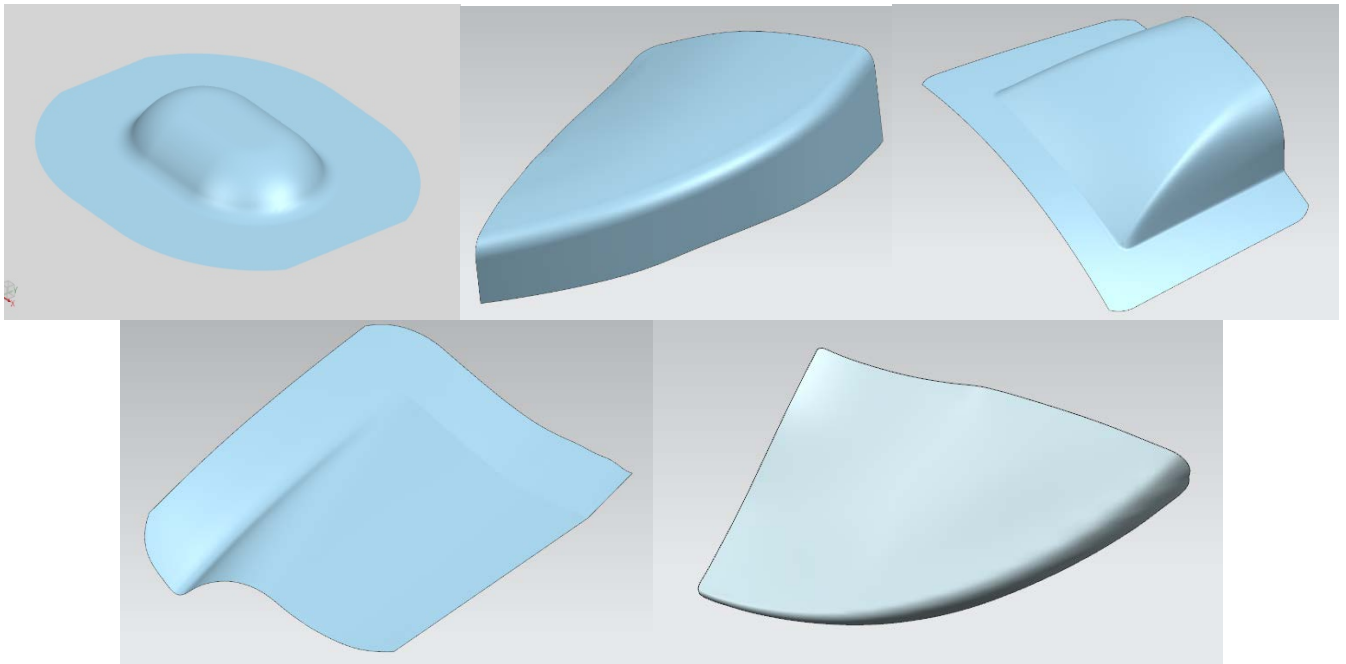


Рисунок 6 Новые теоретические поверхности деталей

Для создания деталей поверхности обрезались, им придавалась толщина и строились соответствующие оправки. Полученные детали и оправки помещались в сборки, которые представлены на рисунке 7.

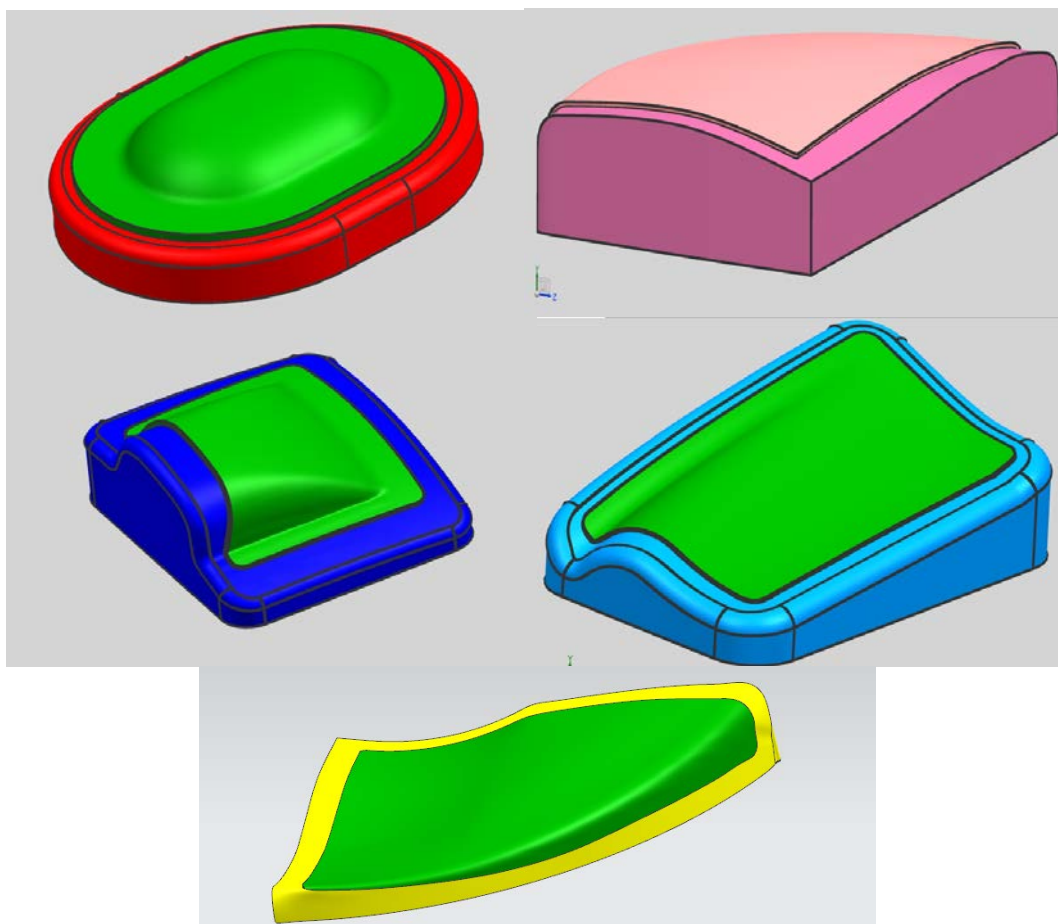


Рисунок 7 Модели сборок деталей и оправок

Поверхности деталей визуально гладкие, не имеют границ раздела, что позволяет заключить, что модели препрегов построены корректно.

Моделирование технологического процесса автоклавного формования

После создания сборки, состоящей из модели композитной конструкции и её формообразующей оснастки, в среде NX Unigraphics встает вопрос об её импорте в САЕ систему Comsol Multiphysics с целью моделирования процесса автоклавного формования. Геометрия сборок визуализируется, и каждая деталь отделена от других, имеет хорошую топологию поверхности, что позволяет перейти к следующему этапу – конечно-элементному разбиению.

Как правило, более мелкое разбиение лучше описывает нестационарный процесс, но чем на большее количество элементов разбит моделируемый объем, тем больше вычислительная трудоемкость задачи моделирования. Поэтому всегда требуется обеспечить некоторый компромисс, который позволяет получить устойчивое решение в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. В нашем случае целесообразно использовать, так называемое, свободное разбиение тетраэдрическими элементами, каждая из четырех сторон которых представляет собой треугольник.

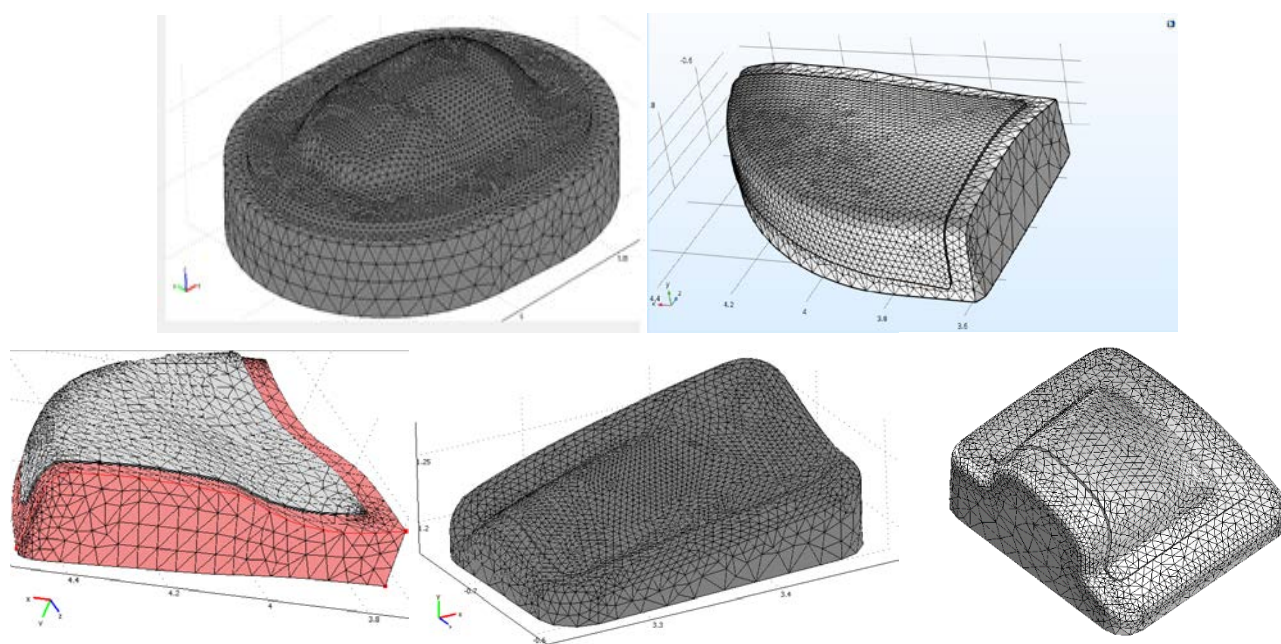
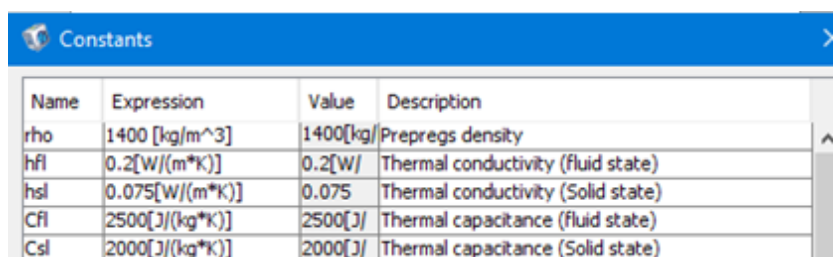


Рисунок 8 Конечно-элементное разбиение моделей деталей и оправок

Элементы сборки характеризуются разной сложностью конфигурации, поэтому следует использовать для них разную густоту сетки. Так, композитная деталь тонкостенна и более интересна при рассмотрении дальнейших процессов полимеризации, происходящих с термореактивным материалом.

Для материала оправки выберем свойства из библиотеки материалов. Материал для оправки - UNS K93600 Invar 36. Это железо-никелевый сплав, который часто используется при формовании ПКМ в автоклаве. Сплав обладает малым температурным коэффициентом линейного расширения. При назначении свойств материала композитного препрега следует воспользоваться справочными материалами, которые включают зависимости тепловых и кинетических свойств препрега от температуры и степени полимеризации.

Теплофизические параметры препрега являются переменными величинами, описываемыми некоторыми функциями. Но эти эмпирические зависимости, полученные экспериментально, содержат цифровые константы. Введем эти константы с сопровождением их описаниями (рис.9). Зададим имена и зависимости от температуры для коэффициента температуропроводности k_{pr} и удельной теплоемкости препрега $C_{p,pr}$ (рис.10).



Name	Expression	Value	Description
rho	1400 [kg/m ³]	1400[kg]	Prepregs density
hfl	0.2[W/(m*K)]	0.2[W/	Thermal conductivity (fluid state)
hsl	0.075[W/(m*K)]	0.075	Thermal conductivity (Solid state)
Cfl	2500[J/(kg*K)]	2500[J/	Thermal capacitance (fluid state)
Csl	2000[J/(kg*K)]	2000[J/	Thermal capacitance (Solid state)

Рисунок 9 Формирование констант, описывающих теплофизические свойства



Name	Expression	Unit
k_{pr}	$hfl + (hsl - hfl) * flc2hs(T - 400, 15)$	
$C_{p,pr}$	$Cfl + (Csl - Cfl) * flc2hs(T - 400, 15)$	

Рисунок 10 Формирование выражений для задания коэффициента температуропроводности k_{pr} и удельной теплоемкости препрега $C_{p,pr}$

Эти зависимости от абсолютной температуры имеют вид сглаженной ступеньки. Они задаются с помощью встроенной функции Хевисайда с непрерывной второй производной. Графики этой функции и зависимостей $k_{pr}(T)$ и $Cp_{pr}(T)$ при размазанности равной 20° приведены на рисунке 11.

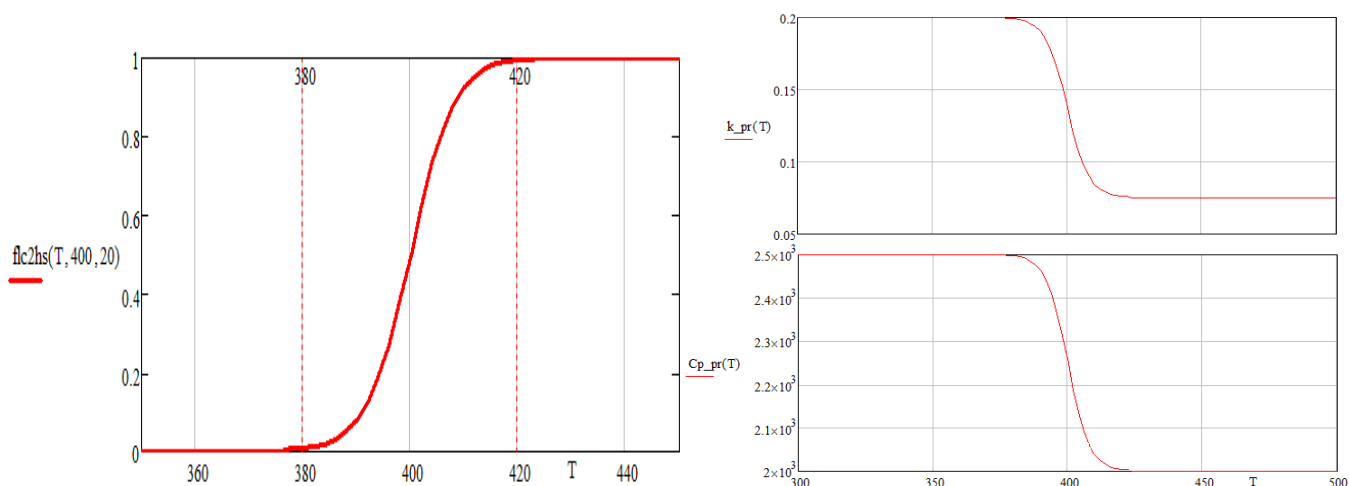


Рисунок 11 Вид сглаженной функции Хевисайда и зависимости коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости композитного препрега, связующее которого испытывает переход из жидкого в твердое состояние в диапазоне температур $380 - 420^{\circ} \text{K}$

Для данной технологической системы выбран следующий способ подведения тепла, описанный в учебных пособиях [8] и [9], - автоклавное формование. Закон изменения температуры принят в наиболее распространенной ступенчатой форме: нагрев - изотермическая выдержка - нагрев - изотермическая выдержка - охлаждение. Нагрев и охлаждение производились линейно по времени. Зададим начальное условие для температуры - $20^{\circ} \text{C} = 293^{\circ} \text{K}$.

Поскольку модель должна обладать определенной универсальностью, а именно, позволять исследовать процесс полимеризации при воздействии

температурного поля на различные поверхности, целесообразно задать закон изменения температуры как скалярную переменную, а не как переменную, заданную на определенной конкретной границе. Поэтому были введены выражения для температур каждого этапа нагрева. Также был применен закон изменения температуры к свободным границам [10].

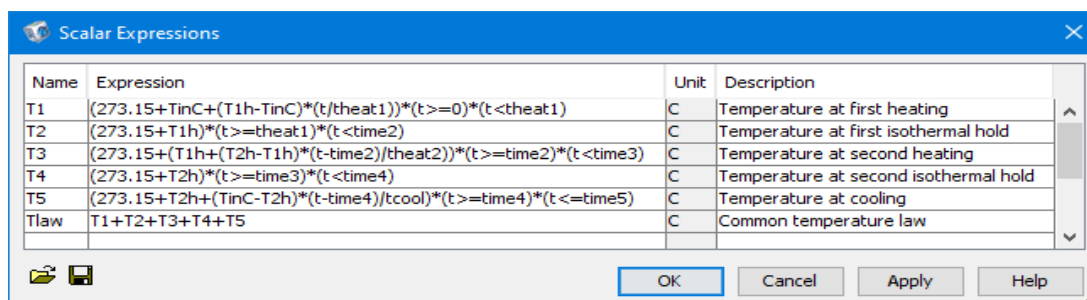


Рисунок 12 Задание скалярных величин, описывающих закон изменения действующей температуры

Далее требовалось подготовить средства постпроцессинга для визуализации интересующих нас результатов. Это позволит проанализировать производительность и состояние теплового процесса в разные моменты времени по всей площади моделей. Для полноценного отражения моделируемого процесса будут отслеживаться значения температуры в каждой точке каждой области во все моменты времени заданной продолжительности процесса, а также градиенты температуры и тепловые потоки, распространяющиеся в материале [11].

Comsol обладает встроенными средствами постпроцессинга, которые позволяют наблюдать эти величины в любой точке, в трехмерном теле и его сечениях с помощью цветовых шкал и векторных полей. Эта информация может

представлять значительный интерес для выявления возможных недостатков процесса, однако для интегральной оценки состояния процесса было принято решение использовать числовые характеристики. В качестве таких характеристик были выбраны:

- среднее значение температуры в теле препрега $T_{pr_av}(t)$ в каждый момент времени, вычисляемое путем интегрирования температуры по объему препрега Ω_{pr} и деления на этот объем:
- среднее значение температуры в теле оправки $T_{mld_av}(t)$, вычисляемое по аналогичной формуле:
- среднеквадратичное отклонение температуры в теле препрега $dT_{pr_av}(t)$ в каждый момент времени, вычисляемое путем интегрирования температуры по объему препрега Ω_{pr} и деления на этот объем:
- среднеквадратичное отклонение температуры в теле оправки $dT_{mld_av}(t)$, вычисляемое аналогично.

Перед тем, как запустить процесс симуляции следует сначала задать интервал времени, в течение которого будет просимулирован процесс и шаг интегрирования. Сделать это сразу невозможно потому, что неизвестна скорость распространения тепла в системе. Шаг по времени должен быть достаточно малым, чтобы модель не испытывала резких скачков из-за быстрых физических процессов, описываемых ей. Однако шаг не должен быть очень малым, чтобы процесс симуляции завершился за короткое время. Начальная общая продолжительность процесса составляет 10800

сек. Чтобы настроить параметры симуляции необходимо выполнить некоторые необходимые настройки:

- тип процесса Нестационарный (Transient);
- тип решателя Зависящий от времени (Time dependent).

Закон нагрева относительно небольшой конструкции характеризуется малыми скоростями нагрева, при которых температура в препреге успевает выровняться. Это подсказывает возможность ускорения процесса. Однако, прежде чем делать выводы, необходимо в расчетную модель добавить модуль термокинетики.

Особенностью процесса полимеризации связующего, испытывающего переход из жидкого в твердое состояние, является выделение тепла. Состояние термореактивного связующего в процессе полимеризации характеризуется степенью полимеризации, которая определяется как отношение количества выделившегося в данный момент экзотермического тепла к полному количеству тепла, выделившегося в единице объема после завершения процесса отверждения $\alpha(t, T) = Q^{exo}(t) / Q_{tot}^{exo}$ [12-14]. Для описания зависимости степени полимеризации от времени и температуры используется кинетическое уравнение, структура и параметры которого зависят от свойств связующего. В настоящее время известно около полутора десятков видов кинетических уравнений, использованных различными специалистами для прогноза поведения связующего в процессе формования. Вид и параметры кинетического уравнения определяются по результатам исследования материалов методом Дифференциальной Сканирующей Калориметрии (ДСК) с использованием различных численных методов

идентификации этих параметров. Метод дает ценную информацию, касающуюся обработки и условий применения, дефектов качества, идентификации, стабильности, реакционной способности, химической безопасности и чистоты материалов. Связующее, используемое в данной работе, подвергалось исследованию методом ДСК и идентификации параметров с помощью генетического алгоритма. Чем сложнее поведение связующего при полимеризации, тем сложнее вид кинетического уравнения и тем больше параметров оно содержит. Проведенные ранее экспериментальные исследования показали, что полимеризация использованного связующего удовлетворительно описывается автокаталитическим уравнением, подробно описанном в статье [15],

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = A_2 \cdot \left(w \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{R \cdot T}\right) + \exp\left(-\frac{E_2}{R \cdot T}\right) \cdot \alpha^m \right) \cdot (1 - \alpha)^n \equiv f \quad (1)$$

где R - газовая постоянная, α - степень полимеризации, E_1, E_2 - энергии активации, T - температура, m и n - порядки реакции.

Решением уравнения теплопроводности является поле температур в каждой точке препрега. Эта температура входит в кинетическое уравнение, активируя процесс полимеризации. Но при полимеризации связующее выделяет экзотермическое тепло, которое должно быть учтено в уравнении теплопроводности [16, 17]. Такие задачи называют сильно связанными, когда решение каждого из них оказывает влияние на другое уравнение, описывающее процесс.

Для постановки такой связанной задачи необходимо к уже работающему уравнению теплопроводности добавить кинетическое уравнение. Сначала следует дать имя переменной, для которой будет сформировано уравнение - степень

полимеризации α . Введенные константы, глобальные переменные, время t и зависимые переменные доступны из любого режима, что позволяет строить связи между разными режимами работы. Так как в режиме моделирования термокинетики будет решаться кинетическое уравнение, следует ввести значения его параметров A_2, w, E_1, E_2, m, n , которые были определены методом ДСК, в окне Постоянных, а также полного количества выделяющегося в единице объема экзотермического тепла Q_{tot} .

Далее было составлено кинетическое автокаталитическое уравнение. Необходимо присвоить коэффициентам уравнения в общей форме их значения, соответствующие автокаталитическому уравнению.

Таким образом, коэффициентам уравнения в общей форме [18]

$$e_a \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla \alpha - \hat{\alpha} \cdot \alpha + \gamma) + \beta \cdot \nabla \alpha + a \cdot \alpha = f, \quad (2)$$

где e_a - массовый коэффициент, d_a - коэффициент демпфирования или массовый коэффициент, c - коэффициент диффузии, α - коэффициент конвекции потока, β - коэффициент конвекции, $\hat{\alpha}$ - коэффициент поглощения, γ - член консервативного источника потока, f - исходный член,

необходимо присвоить следующие значения $a=0$; $c=0$; $e_a=0$; $d_a=1$;

$$\hat{\alpha} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \beta = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \gamma = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

Процесс полимеризации приводит к выделению экзотермического тепла, интенсивность которого подчиняется соотношению $Q = Q_{tot}^{exo} \cdot d\alpha/dt$, поэтому была

введена характеристика экзотермического источника тепла в уравнение теплопроводности [19]. Для этого был активирован режим передачи тепла. В окне Subdomain Settings в ячейку Heat source было внесено выражение $alt*Q_{tot}$. Таким же образом, как это было сделано при формулировании метода решения уравнения теплопроводности, были сформированы среднее значение степени полимеризации и его среднеквадратичного отклонения в объеме препрега. После внесения этих выражений в список интегральных переменных была запущена симуляция. Результаты симуляции приведены для детали №1 (рис.13,14,15). Аналогичные действия проводились для всех деталей.

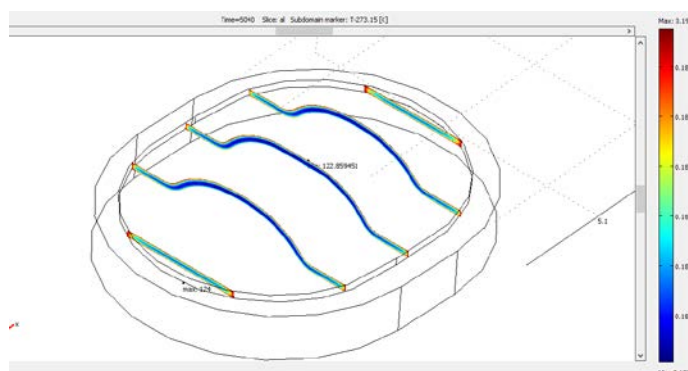


Рисунок 13 Постпроцессинг степени полимеризации в теле препрега в момент второго нагрева с визуализацией сечений, максимальных и минимальных значений

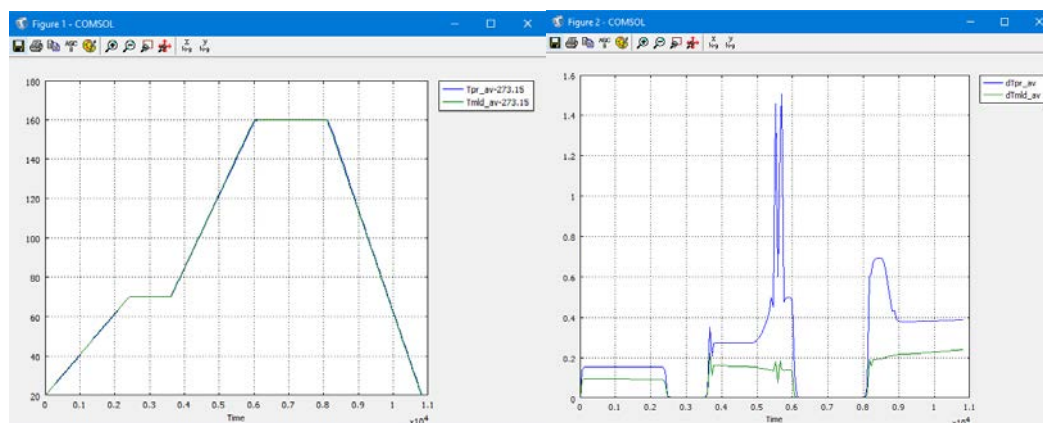


Рисунок 14 Временные зависимости средней температуры и среднеквадратичного отклонения в теле формообразующей оснастки и препрега

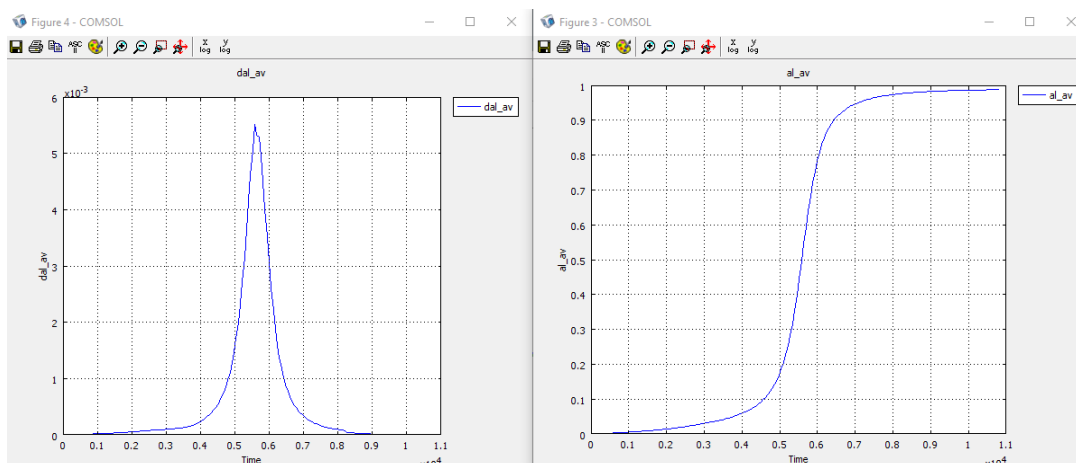


Рисунок 15 Временные зависимости средней степени полимеризации и ее среднеквадратичного отклонения в теле препрега

Оптимизация температурного и временного режима формования

Для оптимизации режимов автоклавного формования необходимо проанализировать возможные технологические ограничения. Так, при массовом производстве возникает проблема максимальной загрузки автоклава с целью экономичности процесса, в связи с энергопотреблением агрегата. Кроме того, температурный и

временной режимы отверждения материала должны быть строго соблюдены, в противном случае структура материала не будет соответствовать требованиям [20].

В связи с этим были учтены следующие технологические ограничения:

- 1) максимально допустимое среднеквадратическое отклонение температуры в препреге 2 градуса;
- 2) максимально допустимое среднеквадратическое отклонение степени полимеризации в препреге 0.01;
- 3) минимальная длительность первой изотермы 10 мин;
- 4) минимальная длительность второй изотермы 20 мин;
- 5) минимальное значение средней степени полимеризации в теле препрега по завершении процесса 0.97;
- б) скорость нагрева не должна превышать 3 градусов в минуту.

Исходя из этих данных, был проведен анализ полученных результатов:

- 1) Максимальное среднеквадратичное отклонение температуры в препреге по результатам симуляции – 1.5 градусов, что на 0,5 градусов меньше ограничения. Высокие отклонения возникают при наиболее активно протекающем процессе полимеризации во время второго нагрева. Таким образом, возможно незначительное увеличение скорости нагрева.
- 2) Максимальное среднеквадратическое отклонение степени полимеризации в препреге по результатам полимеризации – 0.006. Таким образом, возможно увеличение скорости полимеризации. Однако необходимо учесть минимальное значение средней степени полимеризации по завершении процесса.

- 3) Исходя из технологических ограничений, возможно максимальное уменьшение первого изотермического этапа на 10 минут, второго – на 15 минут.

На основе анализа были сделаны следующие выводы:

1. Первый этап нагрева до 70 градусов. На данном этапе ограничения по среднеквадратичному отклонению температуры позволяют значительно ускорить скорость нагрева. Однако сильное сокращение продолжительности этапа вызовет увеличение требуемой мощности автоклава. Поэтому не рекомендуется увеличивать скорость нагрева выше 3 градусов в минуту.
2. Первый изотермический этап. Длительность данного этапа не влияет значительно на степень полимеризации, поэтому продолжительность можно уменьшить до значения ограничения.
3. Второй этап нагрева до 160 градусов. На данный этап приходится наибольшее значение среднеквадратичного отклонения степени полимеризации и, следовательно, максимальное значение среднеквадратичного значения температуры. Значительное уменьшение продолжительности этапа невозможно в связи с технологическим ограничением №1.
4. Второй изотермический этап. Длительность данного этапа напрямую влияет на степень полимеризации. Поэтому в связи с технологическим ограничением №5 ускорение данного этапа нецелесообразно.
5. Этап охлаждения. Скорость охлаждения незначительно влияет на степень полимеризации, однако ее сильное увеличение технологически труднодостижимо и приводит к увеличению среднеквадратичного отклонения

температуры. Рекомендуемое ограничение скорости охлаждения – не более 7 градусов в минуту.

В результате анализа результатов предварительных симуляций были приняты продолжительности этапов процесса формования, приведенные в таблице 1.

Принятая продолжительность этапов процесса

Таблица 1

1-й нагрев theat1, мин	1-я выдержка thold1, мин	2-й нагрев theat2, мин	2-я выдержка thold1, мин	Охлаждение tcool, мин
20	10	35	30	20

После симуляции процесса с помощью функций постпроцессинга были получены результаты, представленные на рисунках 16, 17.

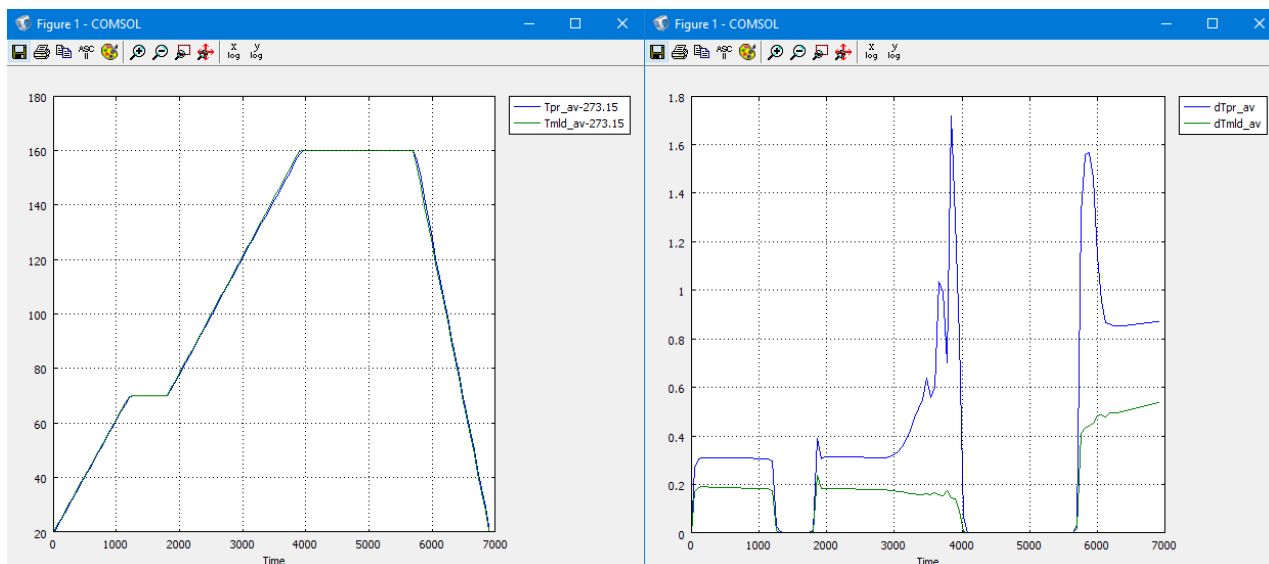


Рисунок 16 – Временные зависимости средней температуры [K] в теле формообразующей оснастки и препрега после внесения поправок и среднеквадратичного отклонения температуры в теле формообразующей оснастки и препрега после внесения поправок

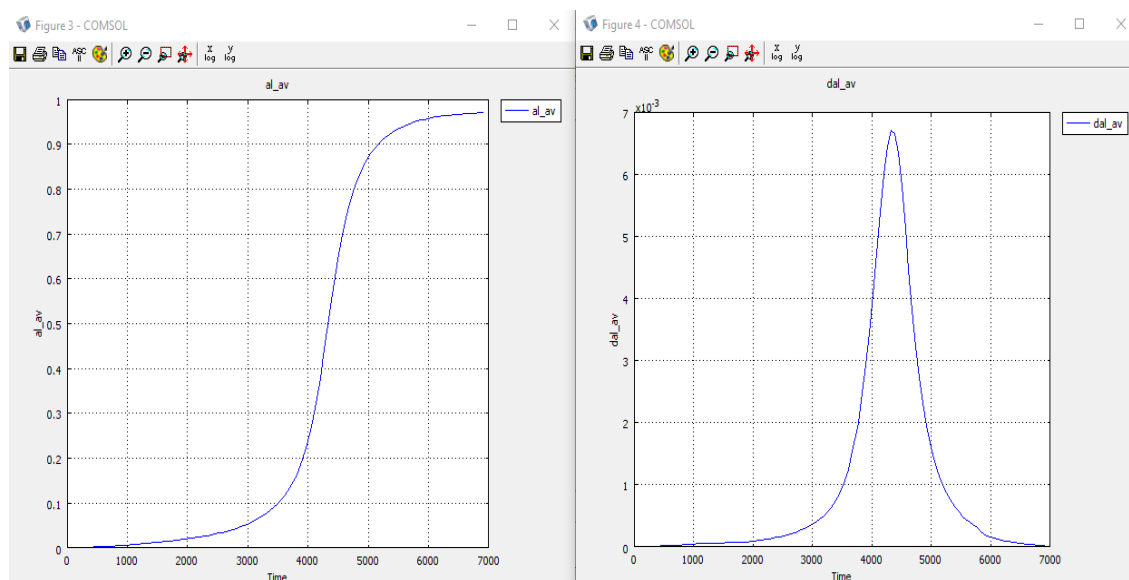


Рисунок 17 – Временные зависимости средней степени полимеризации и ее среднеквадратичного отклонения в теле препрега после внесения поправок

Продолжительность одной симуляции процесса с использованием компьютера с процессором i5 составляет 15-20 минут.

Таким образом, был оптимизирован температурно-временной режим автоклавного формования композиционной конструкции.

Выводы

В результате работы были построены топологически корректные модели препрега и формообразующей оснастки, готовые для проведения моделирования с целью оптимизации технологического цикла процесса автоклавного формования в программе COMSOL, были выбраны оптимальные температурные и временные режимы двухстадийного цикла формования для обеспечения требуемого значения степени полимеризации препрега из углепластика, минимизированы разбросы температуры и степени полимеризации связующего в полимеризуемом объеме для

исключения образования зон неполной полимеризации, зон обедненных или переобогащенных связующим, пористости.

Результаты симуляций процесса формования продемонстрировали существенную зависимость как средних значений температур и степени полимеризации препрега, так и их разброса в объеме препрега и формы, от их теплофизических свойств. На основе цикла предварительных симуляций проведен поиск оптимальных продолжительностей нагрева, экзотермических выдержек и охлаждения.

Основываясь на результатах, можно утверждать, что использование методов и средств современных CAD/CAE технологий, используемых в авиационной отрасли, позволяет существенно повысить технико-экономические показатели технологических процессов и технологической подготовки производства не только в условиях разрабатывающих, но также и серийных производителей авиационной техники.

Библиографический список

1. Bruce F. Kay. Sikorsky S-75 ACAP Helicopter, March 7, 2013, Copyright 2020 Sikorsky Archives. URL: <https://www.sikorskyarchives.com/S-75%20ACAP.php>
2. Overcoming the barriers imposed by geometry, CIMdata Report, SpaceClaim Corp., Ann Arbor, MI, USA, 2011, 7 p.
3. Ларионова А.А., Дудченко А.А., Сергеев В.Н. Проектирование узлов механических композитно-металлических соединений // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74691>

4. Туранов Р.А., Пыхалов А.А. Анализ работы конструкции соединения типа «уховилка» с применением метода конечных элементов и решением контактной задачи теории упругости // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102119>
5. Никольский А.А. Аэродинамическое проектирование вертолетных профилей методом решения обобщенной обратной задачи // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70417>
6. Shevtsov S., Axenov V., Zhilyaev I., Wu J.K., Snezhina N. FEM model-based optimal control synthesis for curing a large composite structure with CAD imported geometry // MATEC Web of Conferences, 2017, vol. 130, pp. 07001 - 07009. DOI: [10.1051/mateconf/201713007001](https://doi.org/10.1051/mateconf/201713007001)
7. Axenov V., Tarasov I., Shevtsov S., Zhilyaev I., Flek M., Snezhina N. Optimal cure control synthesis for FEM model of aircraft composite part with CAD imported geometry // International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC), 2017. DOI: [10.1109/ICMSC.2017.7959432](https://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959432)
8. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С., Рождественская Н.В., Шевцов С.Н. Технология вертолетостроения: Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. - Ростов-на-Дону: Южный научный центр РАН, 2013. - 230 с.
9. Смотровая С.А., Наумов С.М., Смотров А.В. Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Техносфера, 2015. - 215 с.

10. Shevtsov S., Zhilyaev I., Soloviev A., Parinov I., Dubrov V. Optimization of the Composite Cure Process Based on the Thermo-Kinetic Model // Advanced Materials Research, 2012, vol. 569, pp. 185 - 192. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.569.185](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.569.185)
11. Чигринец Е.Г., Верченко А.В. CAD/CAM/CAE системы, OMW-технологии и нейросетевые алгоритмы анализа данных на предприятиях авиастроительной отрасли // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102420>
12. Shevtsov S., Zhilyaev I., Wu J.K., Snezhina N. Model-based multiobjective optimization of cure process control for a large CFRP panel // Engineering Computations, 2018, vol. 35 (2), pp. 1085 - 1097. DOI: [10.1108/EC-09-2017-0354](https://doi.org/10.1108/EC-09-2017-0354)
13. Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Афшари П., Хорошко А.Л. САПР при моделировании режимов технологических процессов производства элементов конструкций летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69638>
14. Грищенко С.В. Расчет и проектирование изделий конструкции самолета из слоистых композитов с учетом межслоевых эффектов // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63011>
15. Slusar B. Mould Heating Distribution Control System Simulation for Polymerization of a Composite Spar for Helicopter Main Rotor Blade // Femlab Conference, 2005, Stockholm, Sweden, pp. 237 - 244.
16. Jiazhong X. Numerical Simulation Research on Curing Process of Composite Overwrap Considering a Die Model // Journal of reinforced plastics and composites, 2013, vol. 32, pp. 1393 - 1406. DOI: [10.1177/0731684413491328](https://doi.org/10.1177/0731684413491328)

17. Um M.K., Daniel I.M., Hwang B.S. A Study of Cure Kinetics by the Use of Dynamic Scanning Calorimetry // Journal of Computer Science and Technology, 2002, vol. 62, pp. 29 - 40. DOI: [10.1016/S0266-3538\(01\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00188-9)
18. Shevtsov S., Zhaivoronskaia K., Tarasov I. Model Based Control Optimization for Curing the Shell-like Composite Structures in Autoclave Processing // 1st Annual International Conference on Structural Engineering and Mechanics, Athens, Greece, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/303524919_Model_Based_Control_Optimization_for_Curing_the_Shell-like_Composite_Structures_in_Autoclave_Processing
19. Liu X.L. et al. Heat transfer analysis and cure modelling of composite repairs for pipelines // Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, vol. 33, pp. 586 - 597. DOI: [10.1177/0731684413514124](https://doi.org/10.1177/0731684413514124)
20. Ding A., Li S., Sun J., Wang J., Zu L. A thermo-viscoelastic model of process-induced residual stresses in composite structures with considering thermal dependence // Composite Structures, 2016, vol. 136, pp. 34 - 43. DOI: [10.1016/j.compstruct.2015.09.014](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.014)

Technological process optimization of complex shape composite aviation structures autoclave molding with prior correction of their geometry

Diukov V.A.

Don State Technical University,

1, Gagarin's Square, Rostov-on-Don, 344003, Russia

e-mail: d-victor-a@mail.ru

Abstract

The article presents geometry correction methods for the complex shape thin-walled composite structures. Topologically correct prepreg and shape-generating rigging models were developed. New prepreg theoretical models obtaining is being ensured by edges sectioning of the original parts by parallel or radial planes and creating surface by the intersection lines of the specified planes and associated facets. For parts creating, the surfaces were being truncated, thickened, and corresponding moulds were being built. The obtained parts and moulds were placed in assemblages.

Thermo-physical parameters of the composite prepreg were assigned to the models, and then the coupled problem of heat transfer and polymerization was being solved. Kinetic equation, which structure and parameters depend on the binder properties, is being employed to describe the dependence of the degree of polymerization on time and temperature. The type and parameters of the kinetic equation are determined from the results of materials analysis by the Differential Scanning Calorimetry (DSC) using various numerical methods for these parameters identification. For the specified technological system, the heat injection method, namely autoclave molding, was selected. The law of

temperature variation was selected in the most commonly wide-spread stepwise form: heating – isothermal dwelling – heating – isothermal dwelling – cooling.

As the result, both temperature and time optimal regimes of the two-stage autoclave molding cycle were selected, which ensure achieving the required degree of polymerization value of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) prepreg, and minimizing temperature differential and binder degree of polymerization in the polymerized volume. Temperature and time regimes of cure affect the structure and quality of the material.

The results of the molding process simulations demonstrated a significant dependence of both the average temperatures and the degree of prepreg polymerization, and their spread in the prepreg and mould, on the characteristics of the technological process and technological limitations.

Keywords: technological process optimization, autoclave molding, polymer composites, CAD/CAE technologies.

References

1. Bruce F. Kay. *Sikorsky S-75 ACAP Helicopter*, March 7, 2013, Copyright 2020 Sikorsky Archives. URL: <https://www.sikorskyarchives.com/S-75%20ACAP.php>
2. *Overcoming the barriers imposed by geometry*, CIMdata Report, SpaceClaim Corp., Ann Arbor, MI, USA, 2011, 7 p.
3. Larionova A.A., Dudchenko A.A., Sergeev V.N. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74691>

4. Turanov R.A., Pykhalov A.A. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102119>
5. Nikolskij A.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 88. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=70417>
6. Shevtsov S., Axenov V., Zhilyaev I., Wu J.K., Snezhina N. FEM model-based optimal control synthesis for curing a large composite structure with CAD imported geometry, *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 130, pp. 07001 - 07009. DOI: [10.1051/mateconf/201713007001](https://doi.org/10.1051/mateconf/201713007001)
7. Axenov V., Tarasov I., Shevtsov S., Zhilyaev I., Flek M., Snezhina N. Optimal cure control synthesis for FEM model of aircraft composite part with CAD imported geometry, *International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 2017. DOI: [10.1109/ICMSC.2017.7959432](https://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959432)
8. Slyusar B., Flek M., Goldberg E., Rozhdestvenskaya N., Shevtsov S. *Tekhnologiya vertoletostroeniya: Tekhnologiya proizvodstva lopastej vertoletov i aviacionnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov* (Helicopter building technology: Technology for of helicopter blades and aircraft structures production from polymer composites), Rostov-na-Donu, Yuzhnyi nauchnyi tsentr RAN, 2013, 230 p.
9. Smotrova S.A., Naumov S.M., Smotrov A.V. *Tekhnologii izgotovleniya silovyh agregatov aviacionnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov* (Technologies for aircraft structures power units manufacturing from polymer composite materials), Moscow, Izd-vo Tekhnosfera, 2015, 215 p.

10. Shevtsov S., Zhilyaev I., Soloviev A., Parinov I., Dubrov V. Optimization of the Composite Cure Process Based on the Thermo-Kinetic Model, *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 569, pp. 185 - 192. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.569.185](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.569.185)
11. Chigrinets E.G., Verchenko A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102420>
12. Shevtsov S., Zhilyaev I., Wu J.K., Snezhina N. Model-based multiobjective optimization of cure process control for a large CFRP panel, *Engineering Computations*, 2018, vol. 35 (2), pp. 1085 - 1097. DOI: [10.1108/EC-09-2017-0354](https://doi.org/10.1108/EC-09-2017-0354)
13. Astapov V.Y., Khoroshko L.L., Afshari P., Khoroshko A.L. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69638>
14. Grischenko S.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63011>
15. Slusar B. Mould Heating Distribution Control System Simulation for Polymerization of a Composite Spar for Helicopter Main Rotor Blade, *Femlab Conference*, Stockholm, Sweden, 2005, pp. 237 - 244.
16. Jiazhong X. Numerical Simulation Research on Curing Process of Composite Overwrap Considering a Die Model, *Journal of reinforced plastics and composites*, 2013, vol. 32, pp. 1393 - 1406. DOI: [10.1177/0731684413491328](https://doi.org/10.1177/0731684413491328)
17. Um M.K., Daniel I.M., Hwang B.S. A Study of Cure Kinetics by the Use of Dynamic Scanning Calorimetry, *Journal of Computer Science and Technology*, 2002, vol. 62, pp. 29 - 40. DOI: [10.1016/S0266-3538\(01\)00188-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00188-9)
18. Shevtsov S., Zhaivoronskaia K., Tarasov I. Model Based Control Optimization for Curing the Shell-like Composite Structures in Autoclave Processing, *1st Annual*

International Conference on Structural Engineering and Mechanics, Athens, Greece, 2016.

URL:https://www.researchgate.net/publication/303524919_Model_Based_Control_Optimization_for_Curing_the_Shell-like_Composite_Structures_in_Autoclave_Processing

19. Liu X.L. et al. Heat transfer analysis and cure modelling of composite repairs for pipelines, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, vol. 33, pp. 586 - 597. DOI: [10.1177/0731684413514124](https://doi.org/10.1177/0731684413514124)

20. Ding A., Li S., Sun J., Wang J., Zu L. A thermo-viscoelastic model of process-induced residual stresses in composite structures with considering thermal dependence, *Composite Structures*, 2016, vol. 136, pp. 34 - 43. DOI: [10.1016/j.compstruct.2015.09.014](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.014)