

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО КОМПОЗИТНОГО РЕФЛЕКТОРА АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Н. А. Бердникова¹, О. А. Белов¹, А. В. Лопатин^{2, 3} ✉

¹АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Красноярск, Российская Федерация

³Институт вычислительных технологий СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация

В работе представлена конечно-элементная модель работы автоклава, разработана методика моделирования нагрева рефлектора на формообразующей оправке и конечно-элементная модель деформирования рефлектора после снятия с оправки. Моделирование выполнено в программной среде. Разработанная методика позволяет прогнозировать форму и значения отклонений рефлектора до его изготовления, и, при необходимости, вносить конструкторско-технологические доработки. Выполнена успешная верификация результатов конечно-элементного моделирования полимеризации композитного рефлектора с помощью натурального эксперимента. Создана углепластиковая оправка для формования композитного рефлектора зеркальной антенны, которая дешевле используемой в настоящий момент инваровой оправки и требует меньше времени на изготовление. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления композитных контурных рефлекторов зеркальных антенн на углепластиковой формообразующей оправке. Определен оптимальный режим отверждения композитного рефлектора. Результаты исследований были использованы при выполнении опытно-конструкторской работы и при изготовлении композитных контурных рефлекторов космических аппаратов.

Ключевые слова: антенна космического аппарата, углепластик, технологические напряжения, автоклав, формообразующая оправка, метод конечных элементов.

Введение

Системы спутниковой связи и ретрансляции получили широкое распространение. Развитие спутниковых систем связано с совершенствованием конструкций антенн, одной из которых является зеркальная антенна с профилированным рефлектором, формирующим контурную диаграмму направленности. Контурный рефлектор по сравнению с гладким рефлектором позволяет значительно улучшить энергетические характеристики антенны, а также решить вопросы электромагнитной совместимости со смежными географическими зонами.

Антенна в процессе функционирования подвержена влиянию экстремальных положительных и отрицательных температур, вакуума и радиации. Реализация высоких эксплуатационных характери-

стик бортовых антенн является основной задачей конкурентоспособного производства космических аппаратов. Точность наведения антенны зависит от точности и размеростабильности рефлектора. Для обеспечения этих факторов конструкция рефлектора изготавливается из полимерных композитных материалов, основным из которых является углепластик. Этот материал способен выдерживать экстремальные условия космоса, имеет высокую жесткость и прочность, низкий коэффициент теплового расширения и малую плотность.

Изготовление рефлектора из композитных материалов происходит на формообразующей оправке в автоклаве и совмещает в одном технологическом процессе создание материала и конструкции. Неравномерность температурных полей при полимеризации, усадка связующего, изменение ориентации углов армирования – являются основными причинами возникновения отклонений поверхности рефлектора от теорети-

✉ lopatin@krasmail.ru

ческого профиля. Контроль этих отклонений осуществляется после снятия рефлектора с оправки. Процесс полимеризации композитных материалов происходит «вслепую», из-за чего форма готового рефлектора непредсказуемо отличается от теоретического профиля. Это приводит к появлению большого числа бракованных конструкций, стоимость которых велика.

Становится очевидна необходимость прогноза формы рефлектора при его производстве. Опережающая подготовка процесса изготовления рефлектора с использованием автоматизированного проектирования технологического процесса позволит повысить точность рефлекторов, а также снизить финансовые вложения и сократить время на создание конструкции. Создание методики автоматизированного проектирования процесса изготовления контурного рефлектора зеркальной антенны космического аппарата направлено на совершенствование существующих и создание перспективных образцов космической техники. В последние годы автоклавное формование изделий из композитных материалов нашло широкое

применение в производстве конструктивных элементов антенн космических аппаратов. Высокие требования к точности изготовления контурных рефлекторов зеркальных антенн инициируют новые исследования технологии изготовления таких конструкций. Цель представляемой статьи состоит в разработке методики компьютерного моделирования процесса изготовления контурного композитного рефлектора зеркальной антенны космического аппарата для прогноза его профиля после снятия с формообразующей оправки.

1. Анализ современного состояния и обоснование актуальности проблемы

Существуют различные конструктивные схемы рефлекторов антенн космических аппаратов (КА) из композитных материалов, которых объединяет между собой наличие отражающей оболочки из многослойного углепластика (рис. 1).

Особенность представленных выше конструкций состоит в том, что толщина углепла-

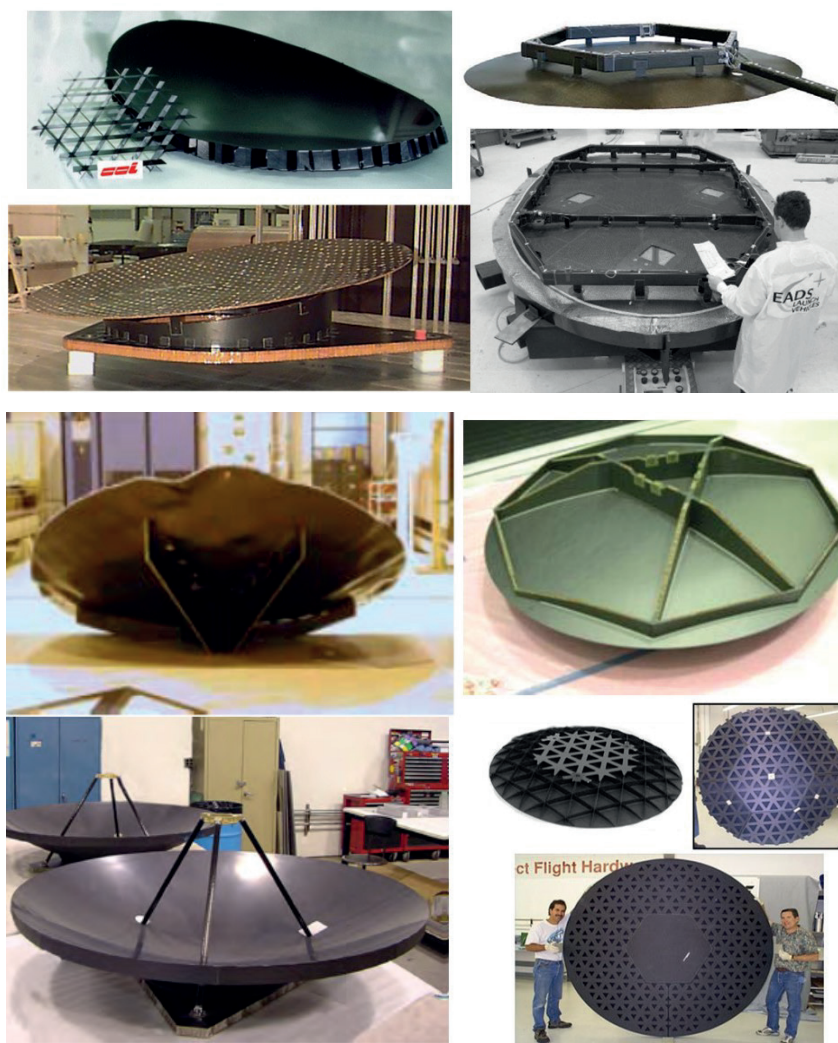


Рис. 1. Конструктивные исполнения композитных рефлекторов антенн КА

стиковых оболочек рефлекторов соизмерима с толщиной армирующих компонентов. Это приводит к повышенной чувствительности характеристик рефлектора к отклонению технологических процессов от оптимальных. Поэтому повышение точности рефлекторов антенн из углепластика во многом связано с необходимостью учета влияния технологических параметров изготовления на свойства конструкции.

Изготовление рефлектора происходит в автоклаве при температуре 180 °С. Одна из проблем высокотемпературной вакуумно-автоклавной полимеризации многослойной оболочки из углепластика заключается в наличии после полимеризации остаточных деформаций. Эти деформации обусловлены влиянием технологических остаточных напряжений, разбросом свойств материалов и различной жесткостью элементов конструкции.

Остаточные напряжения в композитных деталях развиваются, как правило, во время полимеризации [1–5]. В процессе полимеризации происходит гелеобразование матрицы и обволакивание волокон с последующим застыванием. На уровне слоя химическому сжатию смолы из-за сшивания молекулярных цепей сопротивляются волокна. Такое поведение связано с разными коэффициентами температурного расширения в продольном и поперечном направлении волокна. Этот механизм ответственен за развитие остаточных напряжений на микроуровне. Еще одним фактором возникновения остаточных напряжений во время полимеризации является взаимодействие композитного материала с формообразующей оснасткой.

Большинство существующих подходов к исследованию остаточных напряжений при полимеризации изделий из композитных материалов в автоклаве сводятся к одно- или двумерной модели тепловых потоков при полимеризации. В качестве граничных условий применялись однородная температура полимеризации в автоклаве или постоянный коэффициент теплопередачи на протяжении всего цикла формования. Примеры этих подходов могут быть найдены в статьях [6–9]. Учитывать неоднородность температурного поля в автоклаве было предложено в работах [10–11]. Авторы этих исследований признали важность рассмотрения скорости потока в автоклаве и эффекты затенения производственных оправок, но не обеспечили соответствующий способ их моделирования. В работе [12] предпринята попытка оценить равномерность нагрева технологической оснастки из стали с помощью конечно-элементного моделирования (рис. 2) с учетом теплопереноса в воздушной среде автоклава.

В работе [13] проведено моделирование нагрева композитных деталей внутри автоклава с использованием вычислителя ANSYS [14]. Конечно-элементная сетка для модели была построена с

использованием Altair Hypermesh [15]. Авторы использовали модель турбулентности SST (Shear Stress Transport) и создали подробную модель из 5,6 млн. элементов. Был смоделирован 10-ти часовой автоклавный процесс с мультинагрузением в соответствии с циклом отверждения материала. В модели учитывались как оснастка, так и вспомогательные технологические материалы для изготовления деталей вертолета. Распределение скоростей воздуха в автоклаве показано на рис. 3.

Полученное поле скоростей дало представление о том, насколько сильно разнится скорость потока воздуха, обдувающего оснастку. Проведение этого расчета потребовало от разработчиков значительных временных затрат и мощных компьютеров.

Исходя из вышесказанного, становится очевидна необходимость создания методики моделирования композитного рефлектора с учетом геометрии внутренней камеры автоклава, оснастки для изготовления и ступенчатого технологического цикла полимеризации рефлектора, при этом необходимо сократить вычислительное время при сохранении точности вычислений.

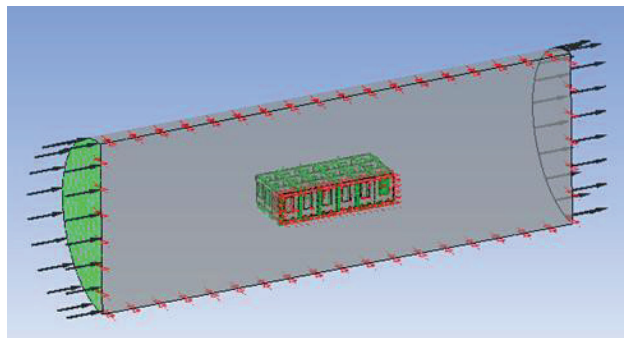


Рис. 2. Модель автоклава в ANSYS CFX [12]

2. Разработка методики моделирования автоклавной полимеризации рефлектора зеркальной антенны космического аппарата

Моделирование вынужденной конвекции в автоклаве Olmag ATC-500/5500 проведено в конечно-элементном программном комплексе.

В общем случае для задачи газовой динамики решается система из четырех независимых уравнений, которая носит название системы уравнений Навье-Стокса: уравнение неразрывности (сохранения массы), уравнение количества движения (сохранения импульса), уравнение энергии (сохранения энергии), уравнение состояния.

Первым шагом решения задачи моделирования тепловых полей в автоклаве является проведение калибровки конечно-элементной модели автоклава (рис. 4).

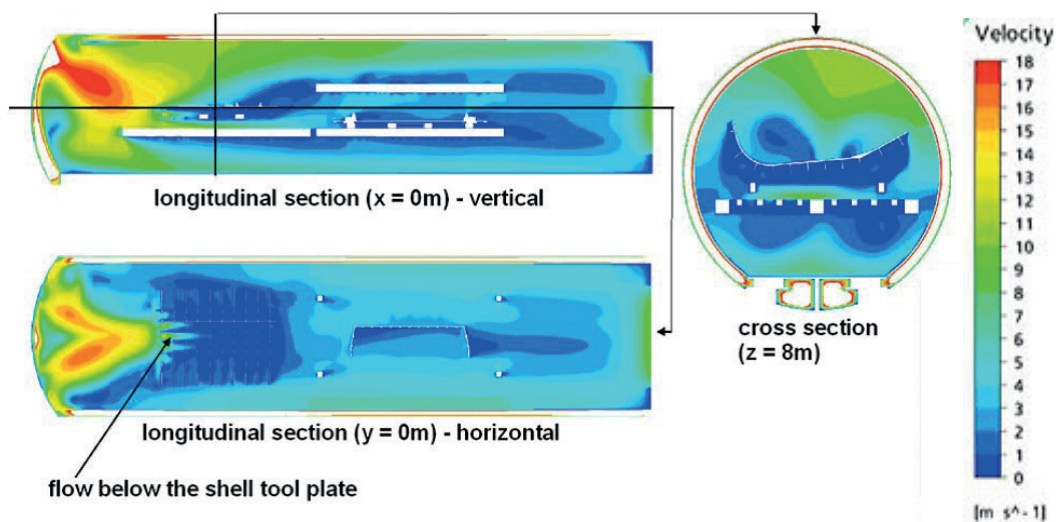


Рис. 3. Распределение скоростей воздуха в автоклаве [13]

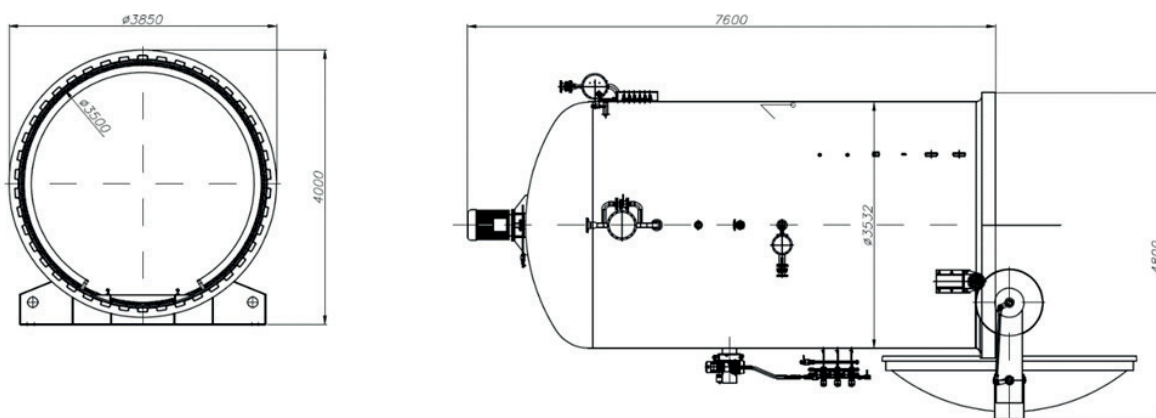


Рис. 4. Автоклав

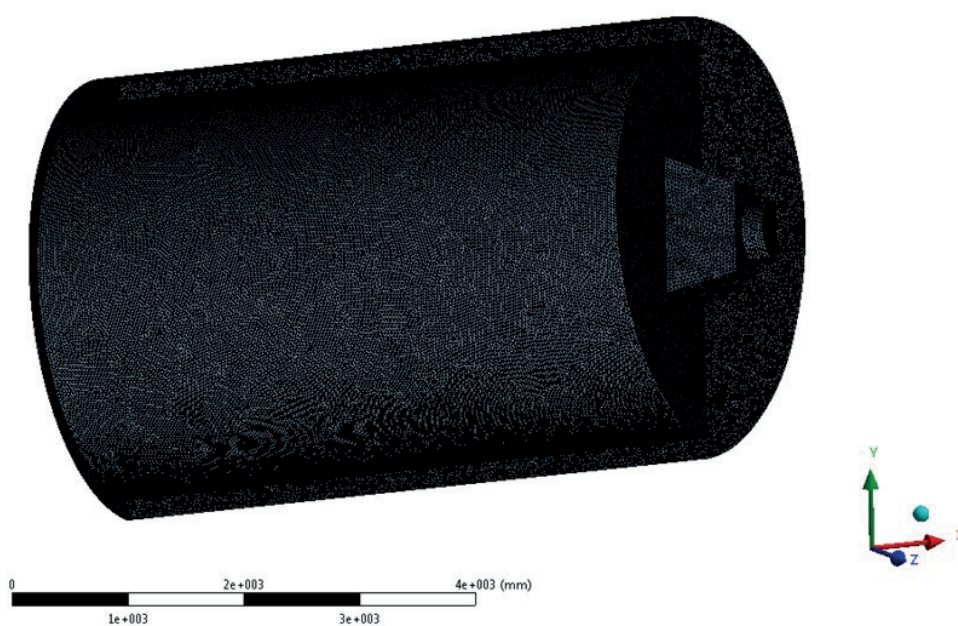


Рис. 5. Конечно-элементная сетка открытого автоклава в разрезе

Автоклав состоит из внутренней и внешней камер, крышки, рабочего стола, воздухозаборника, нагревательных элементов и вентилятора. Скорость потоков воздуха в автоклаве определяется расходом воздуха через выпускную поверхность вентилятора. Сложностью являлось то, что для моделируемого автоклава неизвестны как геометрические параметры этой поверхности, так и расход воздуха через нее. Однако был проведен эксперимент, в ходе которого производилось включение автоклава с открытой крышкой и замер скоростей воздуха при температуре 25 °С на выходе из внешней камеры автоклава. В результате были получены значения скоростей в диапазоне 5 ± 1 м/с. На основании этого эксперимента была произведена калибровка модели автоклава. Был смоделирован пустой автоклав без крышки и подобрано значение расхода воздуха на выходе из вентилятора. Конечно-элементная сетка модели для калибровки автоклава насчитывает 1 млн. узлов и 5,7 млн. элементов (рис. 5). Результаты моделирования автоклава с открытой крышкой показаны на рис. 6 и 7.

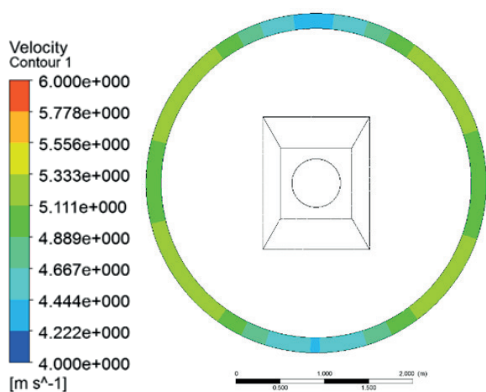


Рис. 6. Скорости воздуха на выходе из внешней камеры автоклава

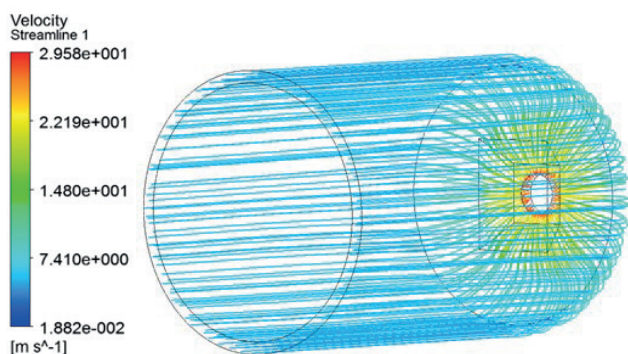


Рис. 7. Линии тока воздуха во внешней камере автоклава

Необходимый расход воздуха при температуре 25 °С на выходе из вентилятора составил 11,6 кг/с. Принимая во внимание значение плотности воздуха при температуре 25 °С, которое составляет 1,185 кг/м³, получаем объемный расход воздуха в вентиляторе, равный 9,789 м³/с.

Площадь сечения внешней камеры автоклава составляет 1,965 м². Отсюда можно вычислить среднюю скорость воздуха по сечению, которая в данной модели составляет 5 м/с.

Задача моделирования тепловых воздушных потоков в автоклаве была решена для установившегося потока. Длительность расчета составила 4 часа. Таким образом, моделировать весь цикл полимеризации рефлектора в модуле газовой динамики не рационально с точки зрения затрат вычислительного времени. Трехслойный рефлектор формируется в автоклаве без избыточного давления. В зависимости от связующего и клея температура в автоклаве изменяется от 20 °С до 180 °С. Учитывая эти данные, был выполнен анализ влияния нагретого воздуха на значение его скорости и на коэффициенты теплоотдачи в потоке на границе с рефлектором.

Известно, что в автоклаве при температуре 25 °С и 180 °С циркулирует масса воздуха, которая в неподвижном состоянии дает давление в 1 атм. в том же объеме. Это соответствует реальным условиям при нагреве, когда в автоклаве поддерживается давление в 1 атм., а лишний воздух стравливается. Для температуры 25 °С массовый расход воздуха через вентилятор составляет 11,6 кг/м. Плотность газа при температуре 180 °С составляет 0,77954 кг/м³. Объемный расход воздуха через вентилятор будет сохраняться тем же, что и при 25 °С. Тогда массовый расход воздуха через вентилятор уменьшается пропорционально его плотности и при температуре 180 °С будет равен 7,63 кг/с.

Конечно-элементная сетка пустого закрытого автоклава насчитывает 0,94 тыс. узлов и 5,3 млн. элементов. Результаты расчета скоростей воздуха в автоклаве при температурах 25 °С и 180 °С показаны на рис. 8–11.

Приведенные результаты показали, что температура воздуха практически не влияет ни на картину течения, ни на скорости воздуха в пустом автоклаве при соответствующем пересчете расхода воздуха. На основании полученных данных была разработана конечно-элементная модель автоклава с рефлектором, расположенном на формообразующей оправке. Диаметр рефлектора 1,8 м. Модель состоит из 3,7 млн. узлов и 20 млн. элементов (рис. 12).

В модели использовались следующие граничные условия: приток воздуха через выпускную поверхность вентилятора – 11,6 кг/с; сток воздуха через поверхность решетки – 11,6 кг/с. Результаты расчетов показаны на рис. 13.

Выявлено, что значение коэффициентов теплоотдачи на оправке с рефлектором находятся в диапазоне от 0 до 83 В·м²/К. Коэффициенты теплоотдачи были импортированы в модуль теплового анализа. На основе этих данных решена задача моделирования нагрева рефлектора на протяжении всего цикла полимеризации.

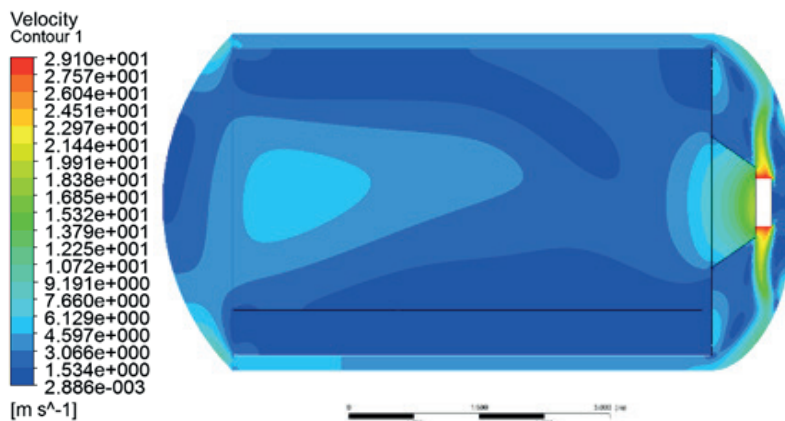


Рис. 8. Скорости воздуха в центральном вертикальном сечении автоклава (при температуре 25 °С)

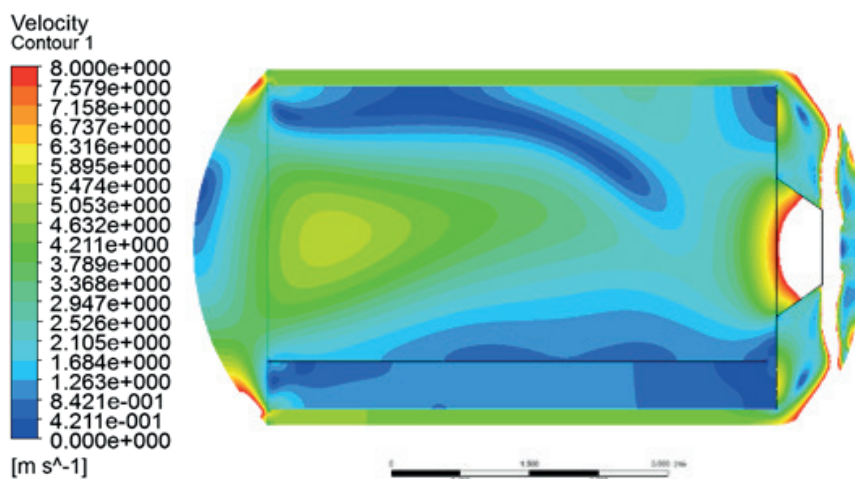


Рис. 9. Скорости воздуха в центральном вертикальном сечении автоклава (показаны значения в диапазоне 0–8 м/с, при температуре 25 °С)

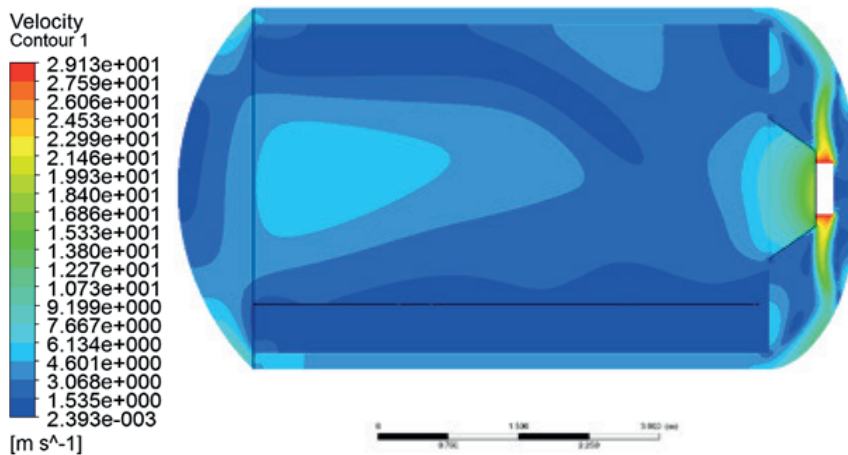


Рис. 10. Скорости воздуха в центральном вертикальном сечении автоклава (при температуре 180 °С)

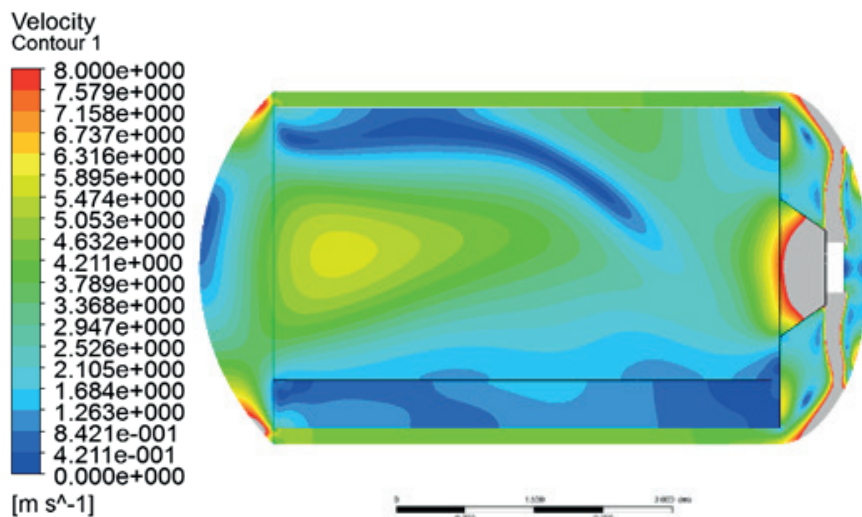


Рис. 11. Скорости воздуха в центральном вертикальном сечении автоклава (показаны значения в диапазоне 0–8 м/с, при температуре 180 °С)

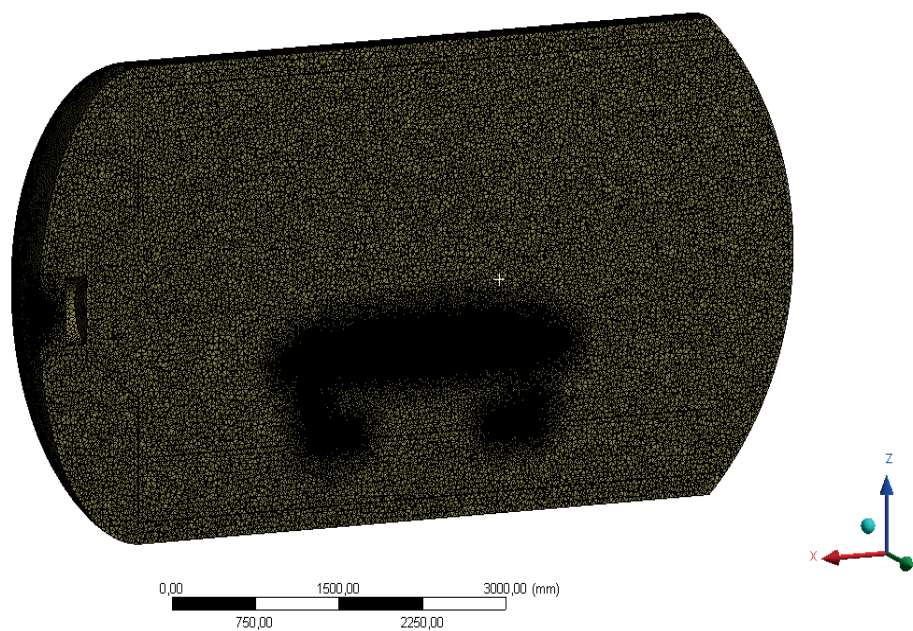


Рис. 12. Конечно-элементная модель автоклава с оправкой и рефлектором в разрезе

Рефлектор представляет собой сэндвич конструкцию с углепластиковыми обшивками и сотовым наполнителем из алюминия.

Цикл полимеризации, установленный в конечно-элементной модели, соответствовал тому, который применяется в производстве.

На рис. 14 показано распределение температур на фронтальной и тыльной обшивках рефлектора в диапазоне от 114 °С до 120 °С. Этот температурный интервал соответствует полимерному переходу связующего из гелеобразного в твердое состояние.

Известно, что в результате полимерных переходов могут возникать явления «заморажива-

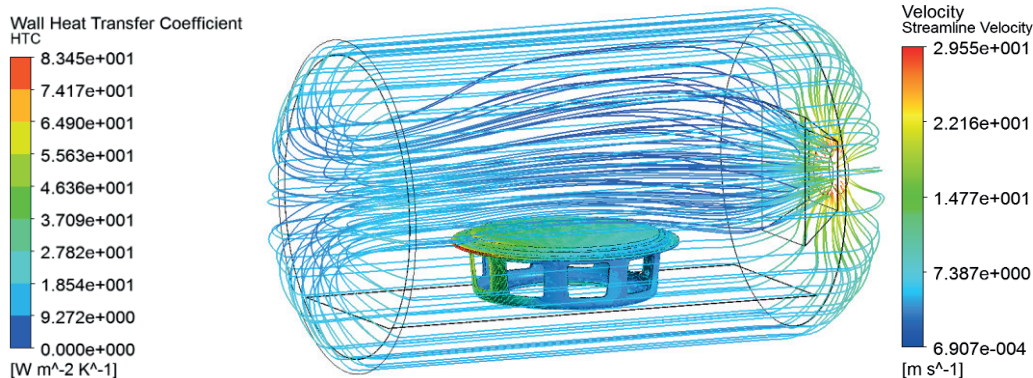
ния» или «размораживания» механических деформаций, появившихся в результате воздействия неоднородного, нестационарного поля температур на материалы с разными коэффициентами линейного температурного расширения. Так, деформации, возникшие в полимерном материале при температуре, соответствующей гелеобразному состоянию, будут «заморожены» при достижении температуры полимеризации. «Размораживание» этих деформаций произойдет при последующем нагреве выше температуры стеклования. Этим явлением обусловлено изменение геометрических параметров рефлектора после термоциклирования.

Полученные температуры были импортированы в модуль статического анализа и проведен анализ напряжений в слоях несущих обшивок. При моделировании предполагалось, что слои каждой обшивки вместе с сотовым наполнителем и формообразующей поверхностью оправки деформируются совместно.

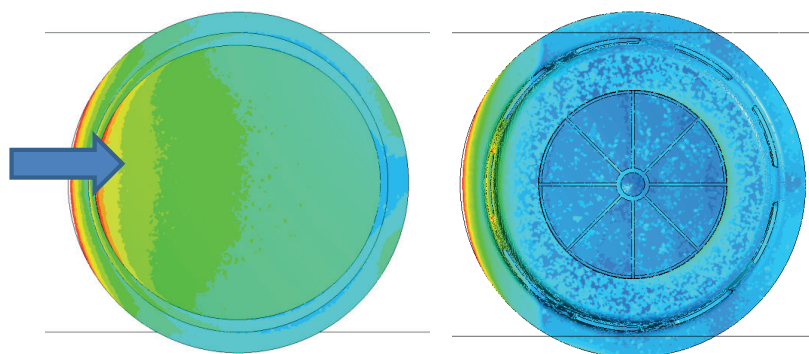
Наибольших значений напряжения σ_x , σ_y достигают во фронтальной обшивке, но при этом

они незначительно отличаются от соответствующих напряжений в тыльной обшивке. В зоне подветренной стороны оправки с рефлектором имеют место максимальные значения напряжений. Величина напряжений составляет 70 % от предела прочности связующего на растяжение.

Для того чтобы получить деформированное состояние рефлектора после снятия с оправки была решена задача тепловых деформаций. Это



а)



б)

Рис. 13. Движение воздуха в автоклаве и распределение коэффициентов теплоотдачи: а) линии тока воздуха в автоклаве и распределение коэффициентов теплоотдачи, б) распределение коэффициентов теплоотдачи по поверхности оправки с наружной и внутренней стороны (слева направо)

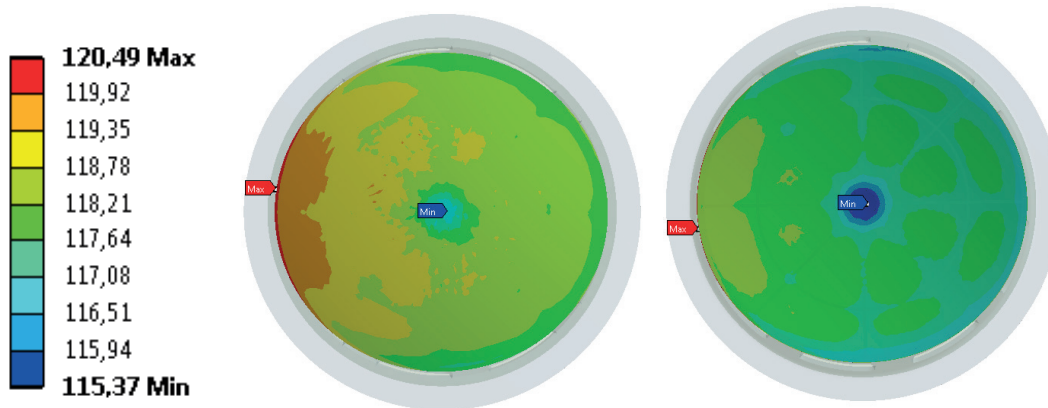


Рис. 14. Распределение температур на рефлекторе (фронтальная и тыльная стороны)

решение получено при условии, что рефлектор в начальном состоянии имеет неравномерный нагрев, соответствующий градиенту температур на стадии полимерного перехода из гелеобразного состояния в твердое, а конечная температура составляет 22 °С – температура производственного помещения. Результаты моделирования представлены на рис. 15.

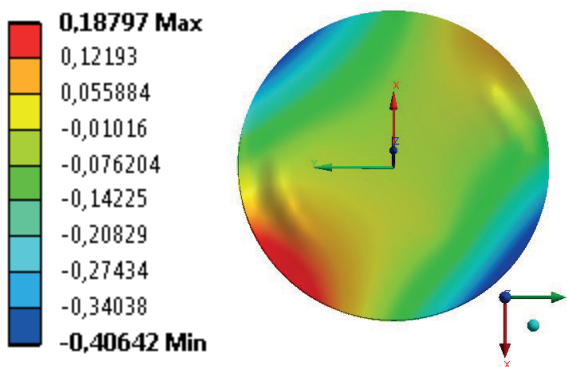


Рис. 15. Перемещения (мм) вдоль оси Z рефлектора (ось Z перпендикулярна плоскости установки рефлектора при измерениях)

3. Анализ результатов моделирования и экспериментального прогрева рефлектора зеркальной антенны в автоклаве

Представим результаты экспериментального цикла полимеризации рефлектора и получим картины распределения температур на тыльной и фронтальной обшивках. На основе этих данных выполним анализ результатов моделирования и эксперимента.

Датчики измерения температуры во время цикла полимеризации рефлектора были расположены на фронтальной и тыльной сторонах оправки и рефлектора (рис. 16). Датчики 1–7 располо-

жены на тыльной стороне рефлектора. Сверху на них установлен вакуумный мешок. Датчики 8–14 установлены на рабочей поверхности оправки. Датчики 15–20 расположены на тыльной стороне оправки.

В первые 8 часов полимеризации с наибольшей интенсивностью нагревается область тыльной обшивки рефлектора со стороны двери автоклава (датчик 5). Затем с интервалом в 1–2 °С происходит увеличение температуры в левой, правой, центральной и задней частях тыльной обшивки рефлектора (датчики 6, 7, 1, 2, 4 и 3). С интервалом в 10 °С от показаний датчика 5 происходит нагрев фронтальной обшивки рефлектора (датчики 8–14). Аналогичная картина наблюдается на протяжении всего цикла полимеризации на металлической оправке. Абсолютная разница между датчиками 1–14 на протяжении всего цикла полимеризации показана на рис. 17.

Результаты эксперимента демонстрируют неравномерность нагрева рефлектора в процессе изготовления. Полученные данные соответствуют тем, что были получены при моделировании.

Для проведения сравнения отклонений формы отражающей поверхности рефлектора от теоретической поверхности был изготовлен рефлектор, на котором были проведены соответствующие измерения. Измерение формы рефлектора проводилось на контрольно-измерительной машине с паспортной погрешностью, соответствующей габаритному размеру рефлектора, не более 5 мкм. Рефлектор проходил цикл полимеризации, описанный выше. На рис. 18 показаны результаты измерений отражающей поверхности рефлектора. Среднеквадратическое отклонение фактической поверхности от теоретической составляет 0,154 мм (максимум – 0,622 мм, минимум – 0,44 мм).

Формы рефлектора, полученные при изготовлении и в результате конечно-элементного анализа совпадают.

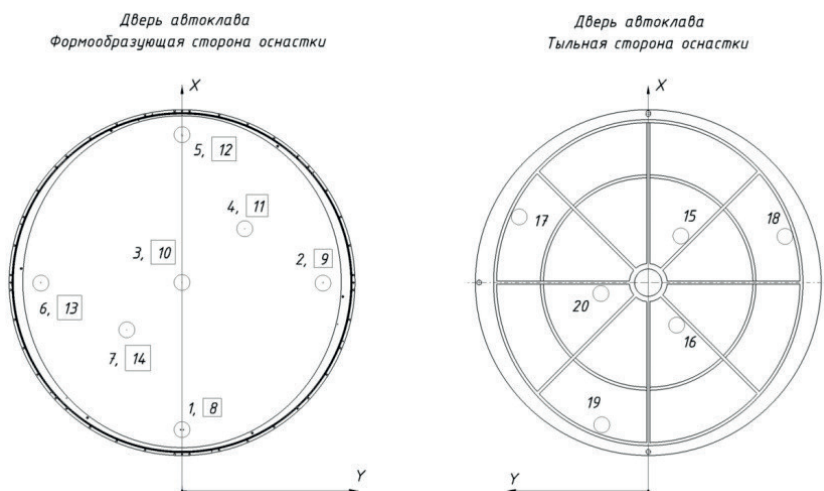


Рис. 16. Расположение датчиков на оправке

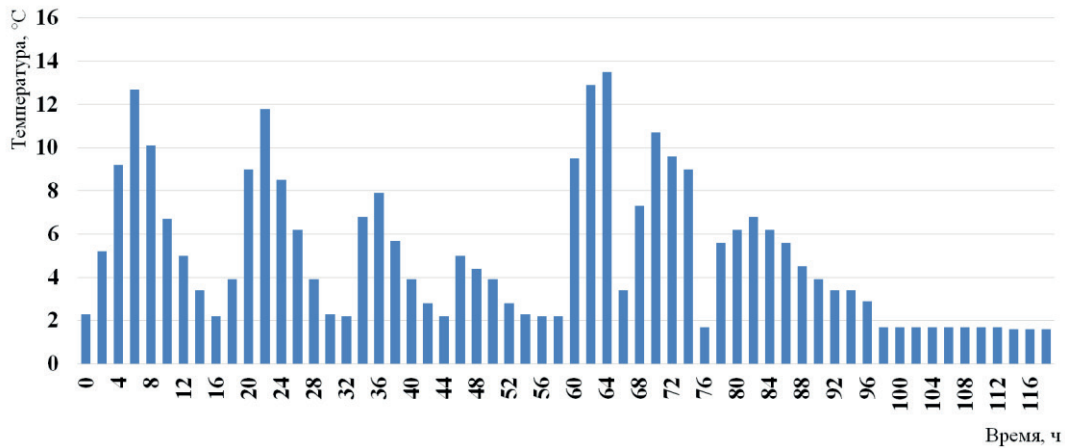


Рис. 17. Абсолютная разница между максимальными и минимальными показаниями датчиков температуры 1–14 на протяжении цикла полимеризации

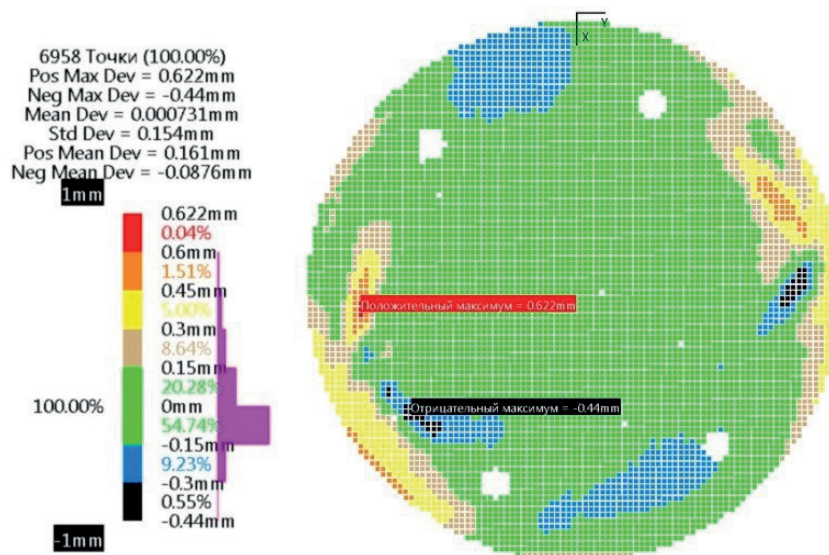


Рис. 18. Форма и значения фактических отклонений рефлектора от теоретической поверхности

4. Оптимизация режима изготовления рефлектора зеркальной антенны КА

Проведенные исследования показали, что неоднородное температурное поле на композитном рефлекторе при полимеризации возникает из-за тепловых свойств и конструктивных особенностей металлической оправки. Поэтому одним из решений проблемы повышения точности рефлекторов при изготовлении может быть использование углепластика для изготовления оправки. Это решение позволяет наиболее эффективно решить проблему технологических напряжений в изделии из углепластика за счет одинакового механизма возникновения и релаксации напряжений при воздействии теплового поля во время цикла полимеризации.

Функциональное назначение композитной формообразующей оправки (КФО) заключается в обеспечении заданной геометрии изделия с технологическим припуском. Также оправка должна иметь область для установки вакуумного мешка и других технологических вспомогательных элементов. Исходя из этого, конструкция оправки содержит формообразующую поверхность с припуском, которая переходит в плоскую часть (рис. 19). Жесткость конструкции придают отбортовка и ребро жесткости, установленное на прямой части вдоль линии, эквидистантной границе перехода параболической части в прямолинейную.

Все конструктивные элементы, перечисленные выше, изготавливаются из композитных материалов на основе углеродного волокна. Это могут быть как однонаправленные ленты, так и ткань.

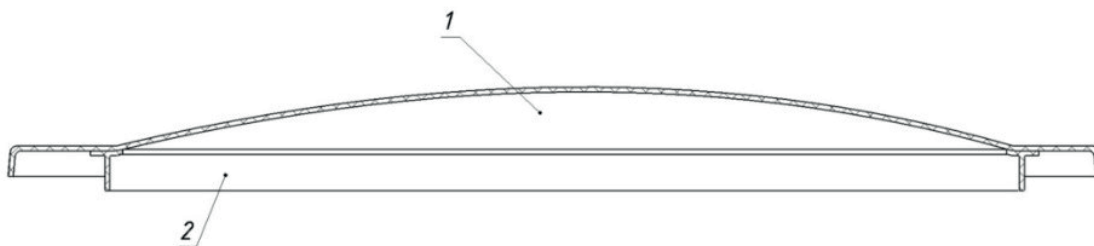


Рис. 19. Формообразующая часть оправки: 1 – формообразующая оболочка со вспомогательной поверхностью и отбортовкой, 2 – ребро жесткости

В качестве опорной структуры предлагается использовать набор ребер. Ребра собираются между собой через пазы. Каждое ребро имеет уникальную форму, определяемую зоной установки ребра. На рис. 20 показаны три типа ребра. В собранном виде ребра образуют ячеистую структуру с треугольной ячейкой (рис. 21).

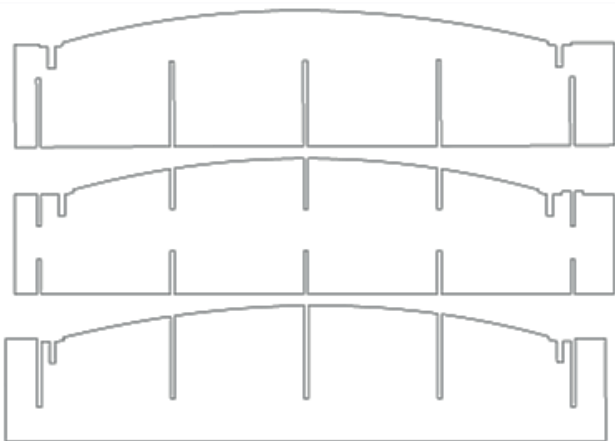


Рис. 20. Ребра композитной формообразующей оправки

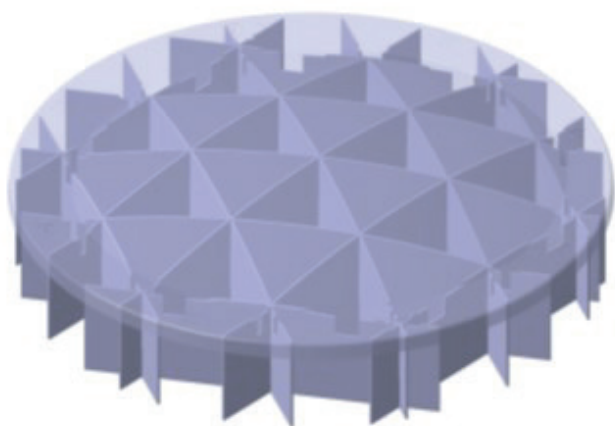


Рис. 21. Композитная формообразующая оправка

Для обеспечения жесткости и минимальных тепловых деформаций необходимо наличие опорной сетчатой структуры, поддерживающей формообразующую поверхность, но при этом нельзя жестко закреплять их между собой в связи с тепловыми деформациями. Такое соединение может быть обеспечено путем склеивания деталей силиконовым клеем.

Очевидно, что для того чтобы обеспечить доступ тепловых потоков к тыльной стороне оправки необходимо установить ее на некоторую рамную конструкцию. Трехмерная модель автоклава с КФО, установленной на технологические табуреты, показана на рис. 22.

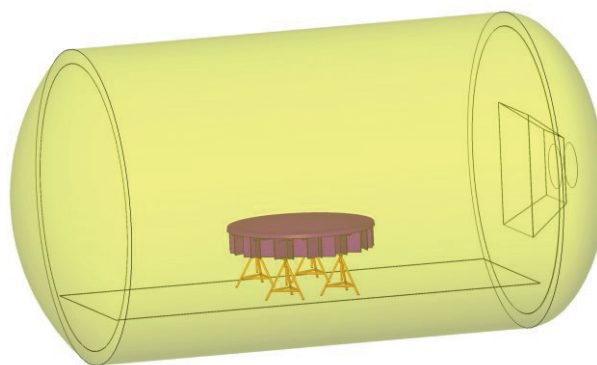


Рис. 22. Трехмерная модель автоклава с КФО

Граничные условия при решении задачи газовой динамики аналогичны модели с инваровой оправкой. Коэффициенты теплоотдачи по поверхности оправки показаны на рис. 23.

Конструкция предложенной оправки имеет толщину формообразующей поверхности в 2,5 раза тоньше, чем у металлической. При этом теплопроводности углеродного волокна и инвара примерно одинаковы. Поэтому цикл полимеризации рефлектора на новой оправке был подобран на основании цикла полимеризации связующего от производителя. Для того чтобы минимизировать возможный разброс температур вследствие неустановившегося потока на начальном этапе работы автоклава была добавлена одна ступень 4,5 часовой выдержки при температуре 90 °С (температура соответствует вязкотекучему состоянию

Wall Heat Transfer Coefficient
Contour 2

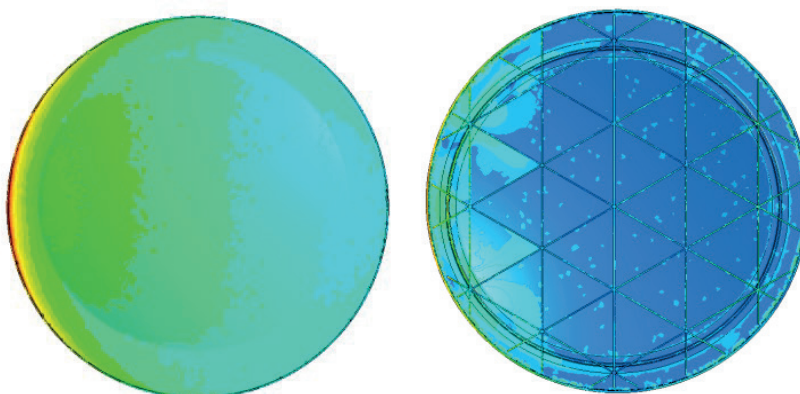
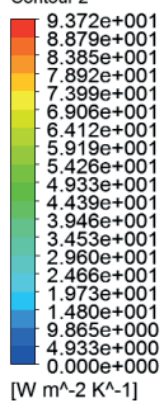


Рис. 23. Коэффициенты теплоотдачи на фронтальной и тыльной стороне углепластиковой оправки (слева направо)

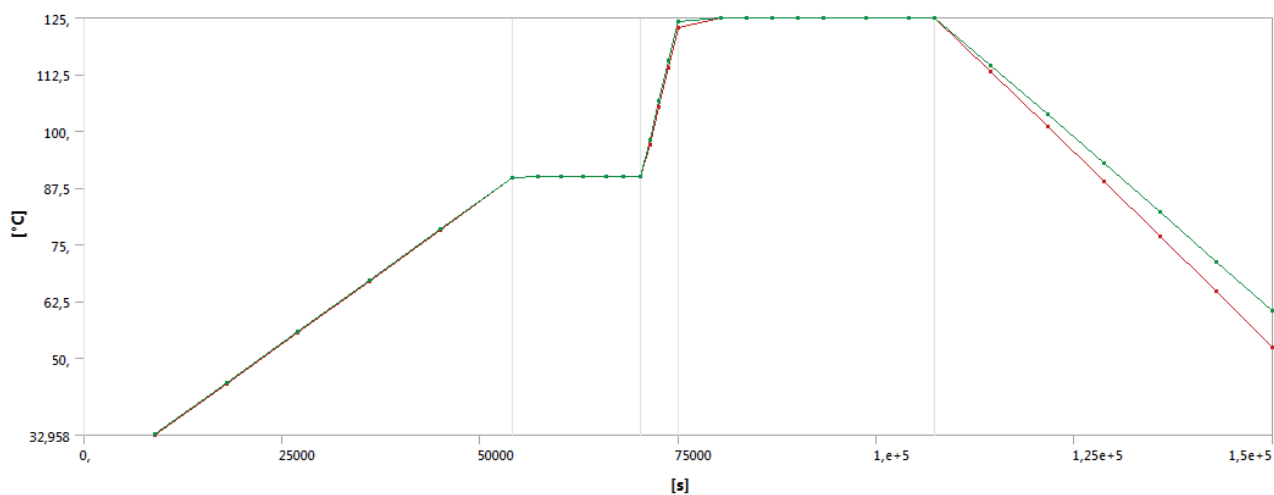


Рис. 24. Температурные кривые на протяжении цикла полимеризации (красная линия – максимальные значения, зеленая линия – минимальные значения)

Дверь автоклава

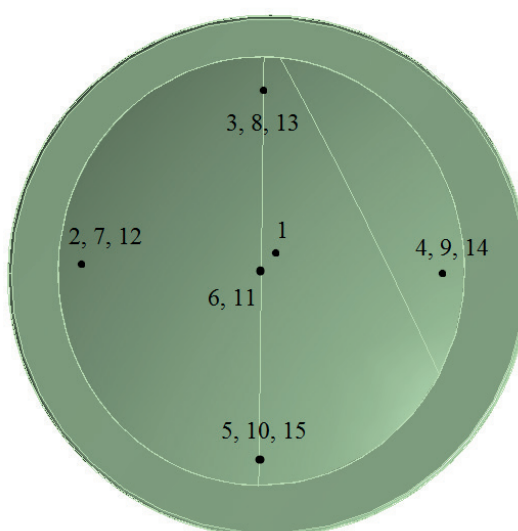


Рис. 25. Расположение температурных датчиков на оправке и рефлекторе

связующего). Результаты моделирования процесса полимеризации показаны на рис. 24. Разброс температур на оправке не превышает $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Верификация результатов моделирования выполнена на основании эксперимента. Эксперимент проведен для оправки с имитатором рефлектора. Температурные датчики были расположены с тыльной и фронтальной стороны оправки и на тыльной обшивке рефлектора, согласно рис. 25. Датчики 1–5 расположены на тыльной стороне оправки, датчики 6–10 – на фронтальной стороне оправки и рефлектора, датчики 11–15 – на тыльной стороне рефлектора.

Показания температурных датчиков не отличались друг от друга более чем на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует результатам конечно-элементного моделирования.

Заключение

В статье разработана конечно-элементная модель работы автоклава, методика моделирования нагрева рефлектора на формообразующей оправке и конечно-элементная модель деформирования рефлектора после снятия с оправки. Моделирование выполнено в одной программной среде. Разработана методика, позволяющая

прогнозировать форму и значения отклонений рефлектора до его изготовления, и, при необходимости, вносить конструкторско-технологические доработки. Выполнена успешная верификация результатов конечно-элементного моделирования полимеризации композитного рефлектора с помощью натурального эксперимента. Разница между среднеквадратичным отклонением профиля рефлектора, полученного экспериментально и с помощью конечно-элементного моделирования, составила $8,3\%$. Создана углепластиковая оправка для формования композитного рефлектора зеркальной антенны, которая в 2 раза дешевле используемой в настоящий момент инваровой оправки и требует в 10 раз меньше времени на изготовление. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления композитных контурных рефлекторов зеркальных антенн на углепластиковой формообразующей оправке. Определен оптимальный режим отверждения композитного рефлектора, при котором в момент перехода связующего из гелеобразного состояния в твердое градиент температур не превышает $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разработанный режим полимеризации сокращен на 46 часов по сравнению с режимом полимеризации, реализуемом на инваровой оправке.

Список литературы

- [1] Weitsman Y. Optimal Cool-Down in Linear Viscoelasticity // *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(1), pp. 35–39.
- [2] Hahn H. T., Pagano P. J. Curing stresses in composite laminates // *Journal of Composite Materials*, 1975, vol. 1, pp. 91–106.
- [3] Li C., Wisnom M. R., Stringer L. G. Simulation of process-induced residual stresses in thick filament wound tubes / Fourth Joint Canada-Japan Workshop on Composites, Vancouver, 2002.
- [4] Rabearison N., Jochum C., Grandidier J. C. A FEM coupling model for properties prediction during the curing of an epoxy matrix // *Computational Materials Science*, 2009, vol 45, pp. 715–724.
- [5] Gower M. R. L., Shaw R. M., Wright L., Urquhart J., Hughes J., Gnanih S. Determination of ply level residual stresses in a laminated carbon fibre-reinforced epoxy composite using constant, linear and quadratic variations of the incremental slitting method // *Composites: Part A*, 2016, no. 90, pp. 441–450.
- [6] Twarowski T. E., Lin S. E., Cell P. H. Curing in thick composite laminates experiment and simulation // *Journal of Composite Materials*, 1993, no. 27, pp. 215–250.
- [7] Bogetti T., Gillespie J. Two-dimensional cure simulation of thick thermosetting composites // *Journal of Composite Materials*, 1991, no. 25, pp. 239–273.
- [8] Hojjati M., Hoa S. Curing simulation of thick thermosetting composites // *Composites Manufacturing*, 1994, pp. 159–169.
- [9] Hudek M. Examination of heat transfer during autoclave processing of polymer composites / Master's thesis, Canada, 2001.
- [10] Monaghan P. F., Brogan M. T., Oosthuizen P. H. Heat transfer in an autoclave for processing thermoplastic composites // *Composites Manufacturing*, 1991, no. 2, pp. 233–242.
- [11] Loos A. C., Springer G. S. Curing of epoxy matrix composites // *Journal of Composite Materials*, 1983, no. 17, pp. 135–169.
- [12] Dumont F., Frohlingsdorf W., Weimer C. Virtual autoclave implementation for improved composite part quality and productivity // *CEAS Aeronautical Journal*, 2013, no. 4, pp. 277–289.
- [13] Weber T. A., Arent J.-C., Münch L., Duhovic M., Johannes M. A fast method for the generation of boundary conditions for thermal autoclave simulation // *Balvers Composites: Part A*, 2016, no. 88, pp. 216–225.
- [14] ANSYS Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 21.05.2019)
- [15] Altair Engineering [Электронный ресурс]. URL: <https://www.altairhyperworks.com> (дата обращения: 21.05.2019)

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF PRODUCTION CYCLE
OF HIGH-PRECISION COMPOSITE SPACECRAFT ANTENNA
REFLECTORN. A. Berdnikova¹, O. A. Belov¹, A. V. Lopatin^{2,3}¹JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation³Institute of Computational Technologies of SB RAS,
Krasnoyarsk, Russian Federation

The article presents a finite element model of CFRP (carbon fiber reinforcement material) reflector polymerization in autoclave for prediction of its shape after removing from the tool. The simulation was performed in the FEM software environment. The technique has developed in this work provides an opportunity to predict a shape and values of the production deformation of the reflector prior to its manufacture, and, if necessary, to introduce design and technological modifications. Successful verification of the finite-element modeling results of the reflector polymerization was performed using a full-scale experiment. Tool from CFRP has been created to forming the composite antenna reflector. This tool is cheaper than the Invar tool currently used. Also, the CFRP tool requires less time to manufacture. Recommendations for improving the technological process of composite contour antenna reflectors production manufactured on CFRP-tool are developed in the paper. The optimum curing mode of the composite reflector is determined. The research results were used in the performance of experimental design work and in the manufacture of reflectors for the spacecraft.

Keywords: spacecraft antenna, carbon fiber reinforcement material, production stress, autoclave, tool, finite element method.

References

- [1] Weitsman Y. Optimal Cool-Down in Linear Viscoelasticity // Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(1), pp. 35–39.
- [2] Hahn H. T., Pagano P. J. Curing stresses in composite laminates // Journal of Composite Materials, 1975, vol. 1, pp. 91–106.
- [3] Li C., Wisnom M. R., Stringer L. G. Simulation of process-induced residual stresses in thick filament wound tubes / Fourth Joint Canada-Japan Workshop on Composites, Vancouver, 2002.
- [4] Rabearison N., Jochum C., Grandidier J. C. A FEM coupling model for properties prediction during the curing of an epoxy matrix // Computational Materials Science, 2009, vol 45, pp. 715–724.
- [5] Gower M. R. L., Shaw R. M., Wright L., Urquhart J., Hughes J., Gnaniah S. Determination of ply level residual stresses in a laminated carbon fibre-reinforced epoxy composite using constant, linear and quadratic variations of the incremental slitting method // Composites: Part A, 2016, no. 90, pp. 441–450.
- [6] Twarowski T. E., Lin S. E., Cell P. H. Curing in thick composite laminates experiment and simulation // Journal of Composite Materials, 1993, no. 27, pp. 215–250.
- [7] Bogetti T., Gillespie J. Two-dimensional cure simulation of thick thermosetting composites // Journal of Composite Materials, 1991, no. 25, pp. 239–273.
- [8] Hojjati M., Hoa S. Curing simulation of thick thermosetting composites // Composites Manufacturing, 1994, pp. 159–169.
- [9] Hudek M. Examination of heat transfer during autoclave processing of polymer composites / Master's thesis, Canada, 2001.
- [10] Monaghan P. F., Brogan M. T., Oosthuizen P. H. Heat transfer in an autoclave for processing thermoplastic composites // Composites Manufacturing, 1991, no. 2, pp. 233–242.
- [11] Loos A. C., Springer G. S. Curing of epoxy matrix composites // Journal of Composite Materials, 1983, no. 17, pp. 135–169.
- [12] Dumont F., Frohlingsdorf W., Weimer C. Virtual autoclave implementation for improved composite part quality and productivity // CEAS Aeronautical Journal, 2013, no. 4, pp. 277–289.
- [13] Weber T. A., Arent J.-C., Münch L., Duhovic M., Johannes M. A fast method for the generation of boundary conditions for thermal autoclave simulation // Balvers Composites: Part A, 2016, no. 88, pp. 216–225.
- [14] ANSYS Inc. Available at: <https://www.ansys.com> (accessed: 21.05.2019)
- [15] Altair Engineering. Available at: <https://www.altairhyperworks.com> (accessed: 21.05.2019)