

КОМПОЗИТНАЯ ФОРМООБРАЗУЮЩАЯ ОСНАСТКА

Белов О.А.^{1*}, Бердникова Н.А.^{2**}, Бабкин А.В.^{3***},
Козлов М.В.^{3****}, Белов Д.А.^{3*****}

¹ Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнёва,
ИСС, ул. Ленина, 52, Железнодорожск, Красноярский край, 662972, Россия

² Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнёва,
СибГАУ, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, 660037, Россия

³ Институт новых углеродных материалов и технологий
(при МГУ им. М.В. Ломоносова),

ИНУМиТ, ул. Ленинские Горы, 1, стр. 11, Москва, 119234, Россия

* e-mail: boa@iss-reshetnev.ru

** e-mail: berdnikova-nataly@mail.ru

*** e-mail: ababkin@inunit.ru

**** e-mail: ichebroller@gmail.com

***** e-mail: studd_belov@list.ru

Изготовление изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов (КМ) происходит на оснастке, геометрия которой повторяет форму изделия. На формообразующую оснастку выкладывают материал, затем проводят его полимеризацию при определенном давлении и температуре, которая может достигать до 200°C. В связи с этим наиболее сложной проблемой при создании высокоточных изделий из КМ является возникновение температурных деформаций. В данной работе предлагается конструкция технологической оснастки из углепластикового КМ для создания рефлектора антенны космического аппарата. Для подтверждения правильности конструктивных решений приводится тепловой и статический анализ оснастки методом конечных элементов. В аэрокосмической промышленности преобладает автоклавное формование изделий из композиционных материалов, при котором полимеризация деталей происходит посредством теплопереноса, поэтому для обеспечения равномерного прогрева детали в процессе полимеризации решается задача моделирования работы автоклава, благодаря чему появляется возможность выбрать рациональное размещение изделия внутри автоклава без проведения дорогостоящих натурных испытаний.

Ключевые слова: углепластик, теплообмен, моделирование газовой динамики, автоклавное формование, оснастка, рефлектор антенны.

Введение

Одной из главных тенденций развития современной техники является переход от металлов и сплавов к композиционным материалам [1]. Область применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) с каждым годом расширяется. Отдельно стоит отметить область создания высокоточных космических конструкций, например, бортовых антенных систем. Освоение высоких диапазонов частот бортовых антенных систем и увеличение мощности бортовых ретрансляторов космических аппаратов позволяет принимать и передавать большие объемы информационных данных и организовывать высококачественные каналы фиксированной спутниковой связи [2]. Это влечет за собой

повышение требований к геометрической точности антенны. Основным элементом антенны является рефлектор. Диаграмма направленности антенны зависит от точности и размеростабильности рефлектора [3].

Высокие требования к точности формы отражающей поверхности рефлектора и жесткие ограничения по массе антенны обуславливают использование конструкционного материала, имеющего предельно низкий коэффициент теплового расширения, высокие удельные характеристики прочности и жесткости, малую плотность, сопротивляемость длительным статическим и динамическим нагрузкам, возможность эксплуатации в условиях высоких и низких температур. Материалом такого класса

является углепластиковый композиционный материал (УКМ) [4].

Изготовление рефлекторов антенн из УКМ происходит на технологической формообразующей оснастке, как металлической, так и композитной. Основные требования, предъявляемые к оснастке для изготовления высокоточного рефлектора, следующие:

- размерная стабильность при тепловом и механическом воздействиях;
- доступ тепловых потоков ко всем поверхностям оснастки для равномерного прогрева рефлектора.

Композитные оснастки отвечают основным требованиям и при этом имеют ряд преимуществ перед металлическими: меньшая стоимость, масса и время изготовления, снижение остаточных напряжений в композитном рефлекторе, ремонтпригодность [5].

Конструкция композитной формообразующей оснастки

Композитная формообразующая оснастка (КФО) содержит формообразующую поверхность с ребром жесткости и опорную реберную структуру, которые выполнены из композиционного материала на основе угольного волокна (рис. 1). Формообразующая поверхность представляет собой параболическую поверхность, повторяющую форму изделия с технологическим припуском, переходящую в прямолинейную часть с отбортовкой (толщина 8 мм). Ребро жесткости толщиной 8 мм устанавливается вдоль линии, эквидистантной границе перехода криволинейной части в прямолинейную. Опорная структура состоит из плоских ребер (толщина каждого ребра 6 мм), контур которых повторяет формообразующую поверхность.

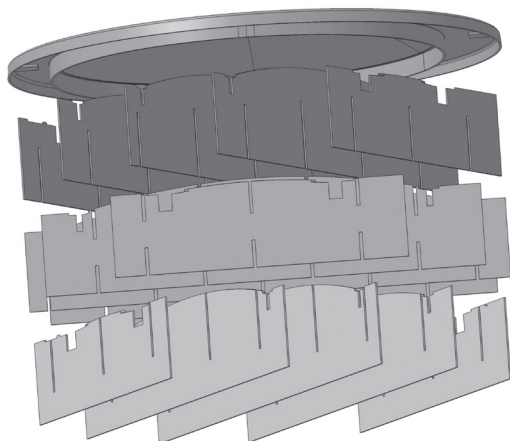


Рис. 1. Детали КФО

Тепломеханический анализ композитной формообразующей оснастки

Для проверки цикла производства и эксплуатации оснастки было проведено моделирование процесса нагрева оснастки до 120 °С.

Конечно-элементный анализ проводился в ABAQUS. После назначения основных геометрических параметров формообразующей поверхности необходимо было определить высоту радиального ребра, расположенного вдоль линии перехода параболической поверхности в прямую. Для этого был проведен параметрический анализ по критерию наибольшей величины собственной частоты колебаний (рис. 2).

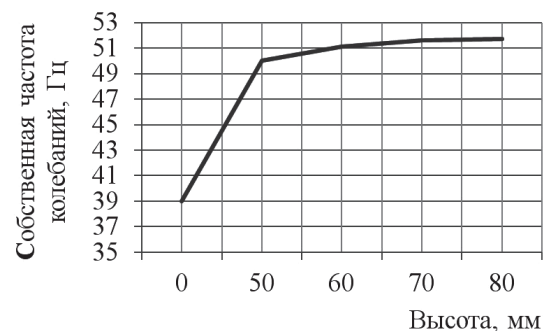


Рис. 2. Зависимость величины собственной частоты колебаний формообразующей оболочки от высоты радиального ребра

Как видно из графика (рис. 2), наличие радиального ребра увеличивает собственную частоту колебаний формообразующей поверхности почти в два раза. При этом увеличение или уменьшение ребра относительно 70 мм приводит к ухудшению результатов.

Анализ тепловых деформаций формообразующей поверхности показан на рис. 3. Тепловые деформации рабочей поверхности оснастки не превышают 0,08 мм.

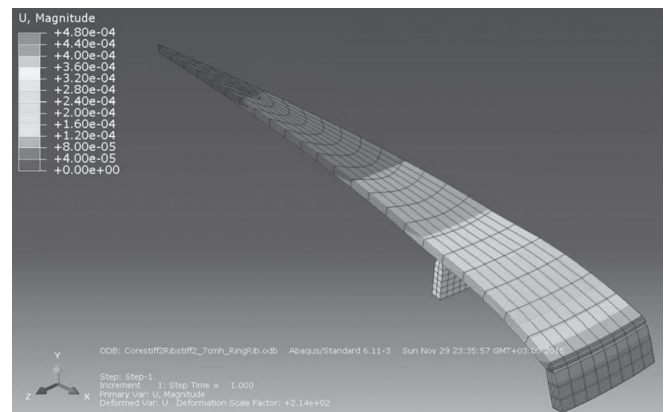


Рис. 3. Картина тепловых деформаций

Далее к тыльной стороне формообразующей поверхности были установлены ребра на жесткий контакт. В этом случае при нагреве до 120°C наблюдается сильное искажение формы, как показано на рис. 4.

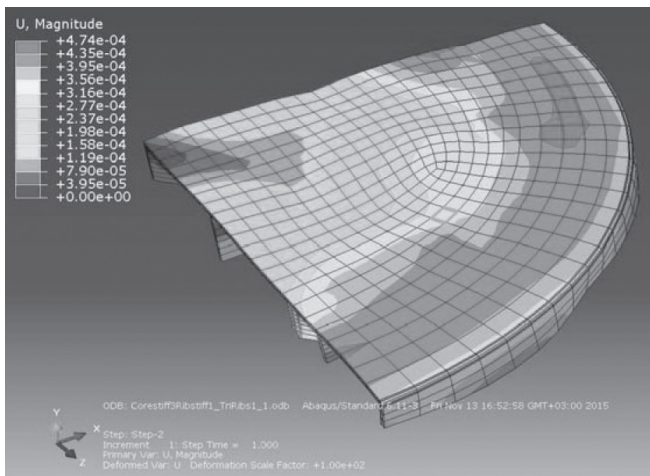


Рис. 4. Картина деформаций оснастки с приформованной опорной структурой при нагреве до 120°C

Искажение геометрии происходит в связи с большим коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР) материала оснастки и ребер перпендикулярно направлению укладки слоев. Ребра начинают «расталкивать» друг друга, что приводит к искажению формообразующей поверхности оснастки.

Таким образом, для обеспечения жесткости и минимальных тепलोдеформаций необходимо наличие опорной сетчатой структуры, поддерживающей формообразующую поверхность, но при этом нельзя жестко скреплять их между собой в связи с описанными выше тепловыми деформациями. Такое соединение может быть обеспечено путем склеивания деталей силиконовым клеем-герметиком.

Результаты изготовления композитной формообразующей оснастки

Оснастка изготавливается на мастер-модели, форма которой повторяет будущее изделие (рис. 5).

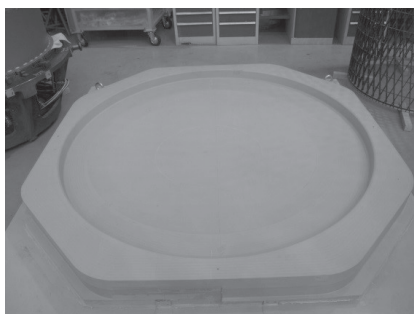


Рис. 5. Мастер-модель

После окончательного отверждения и механической обработки получена оснастка со среднеквадратичным отклонением рабочей поверхности менее 15 мкм, что соответствует требованиям, предъявляемым к высокоточному технологическому оснащению (рис. 6, 7).

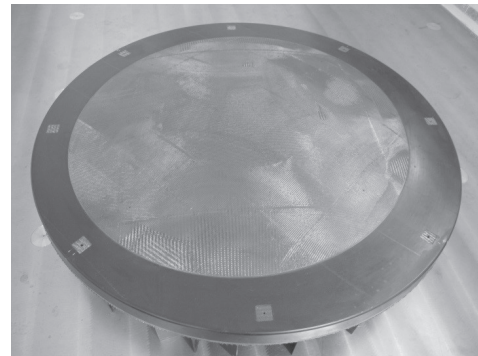


Рис. 6. Оснастка после механической обработки

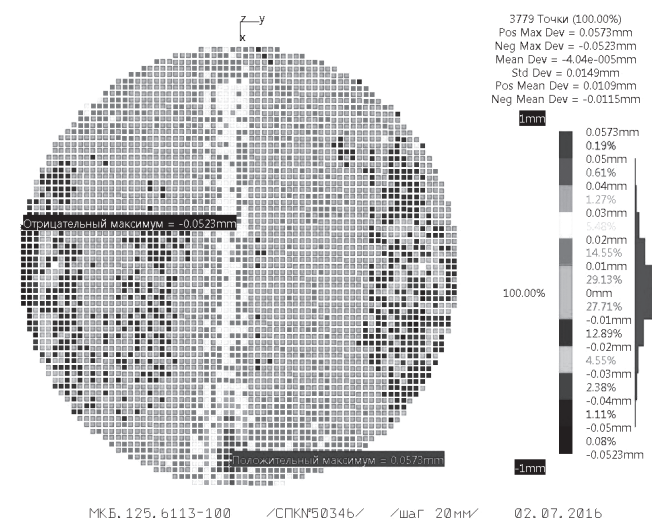


Рис. 7. Отклонения рабочей поверхности оснастки от теоретического параболоида

Моделирование автоклавной полимеризации

Как известно, свойства изделия из композиционных материалов во многом определяются процессом изготовления. В зависимости от равномерности нагрева фронтальной и тыльной сторон изделия будут меняться внутренние напряжения в композиционном материале, что в результате повлияет на геометрическую точность и стабильность формы изделия при внешнем воздействии.

Нагрев изделия внутри автоклава происходит в результате конвективного теплообмена или теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи представляет собой функцию потока газа, его теплофизических свойств и геометрических параметров системы. Как правило, за исключением незначительного числа простейших случаев, получить точные аналитические решения этого уравнения не представляется

возможным, и поэтому привлекаются приближенные методы [6]. Для большинства практических задач коэффициент теплоотдачи оценивают по эмпирическим уравнениям [7].

Проведение эксперимента по оптимизации параметров цикла полимеризации очень затратное мероприятие, поэтому для лучшего понимания процесса автоклавной полимеризации в работе проведены расчеты, связанные с моделированием работы автоклава.

Решение задачи моделирования работы автоклава произведено на примере автоклава Olmag ATC-2800/5000 в ANSYS. В расчете используется модуль CFD (Calculation Fluid Dynamics) и решается стационарная задача (установившейся поток) с применением модели турбулентности SST (Shear Stress Transport). На всех стенках автоклава ставится условие непротекания (скольжения без трения).

Калибровка модели автоклава

Используемый в натурных экспериментах автоклав Olmag ATC-2800/5000 состоит из внутренней и внешней камер, крышки, рабочего стола, воздухозаборника и блока с вентилятором.

Скорость потоков воздуха в автоклаве определяется расходом воздуха через выпускную поверхность вентилятора, представляющую собой прямой круговой цилиндр в рассматриваемой модели.

Сложность в том, что для моделируемого автоклава не известны как геометрические параметры этой поверхности, так и расход воздуха через нее. Однако был проведен эксперимент, в ходе которого производились включение автоклава с открытой крышкой и замер скоростей воздуха при температуре 25 °С на выходе из межстеночного пространства. В результате были получены значения скоростей в диапазоне 20 ± 3 м/с.

На основании этих данных была произведена калибровка модели автоклава для достижения схожих скоростей воздуха. Для этого был смоделирован автоклав без крышки и подобрано значение расхода воздуха на выходе из вентилятора так, чтобы на выходе из межстеночного пространства скорости воздуха лежали в заданном промежутке.

Конечно-элементная сетка модели для калибровки автоклава (рис. 8) состоит из тетраэдров со стороной 30 мм. Модель насчитывает 0,45 млн узлов и 2,34 млн элементов.

В расчете задавались следующие граничные условия:

- расход воздуха на выпускной поверхности вентилятора 21,5 кг/с;
- давление на выходе из межстеночного пространства, равное 1 атм.

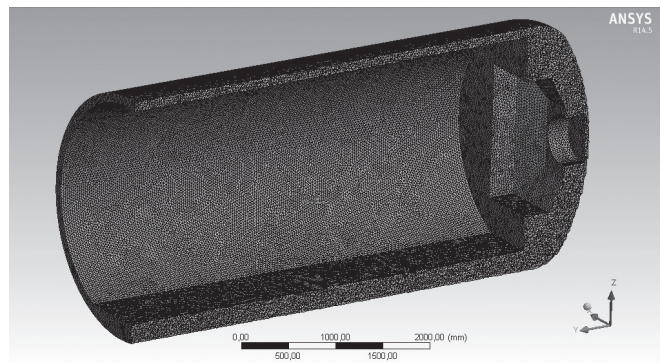


Рис. 8. Конечно-элементная сетка в разрезе для моделирования течения воздуха в автоклаве с открытой крышкой

Принимая во внимание значение плотности воздуха при температуре 25 °С, которое составляет 1,185 кг/м³, получаем объемный расход воздуха в вентиляторе, равный 18,143 м³/с. Площадь сечения межстеночного пространства составляет 908573 мм². Отсюда можно вычислить среднюю скорость воздуха по сечению, которая в данной модели составляет 19,97 м/с.

Результаты моделирования автоклава с открытой крышкой показаны на рис. 9—12.

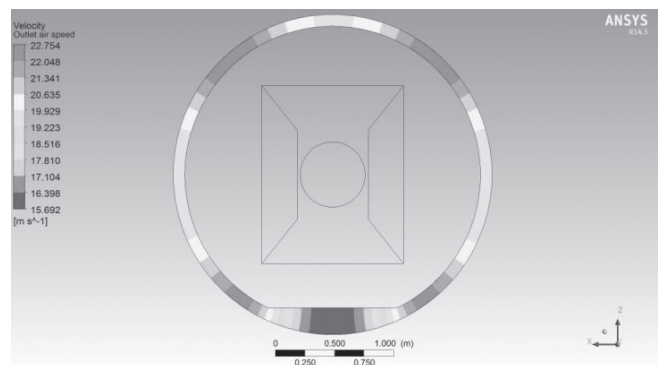


Рис. 9. Скорости воздуха на выходе из межстеночного пространства автоклава

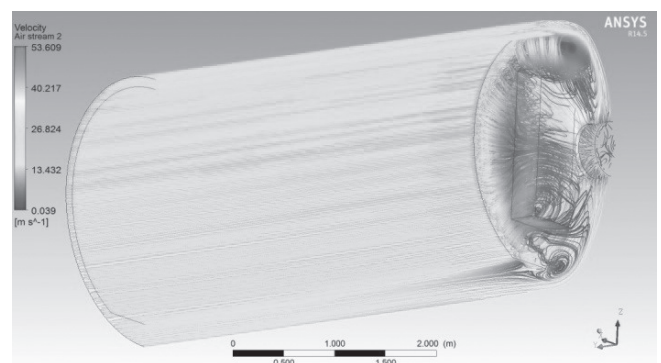


Рис. 10. Линии тока воздуха в межстеночном пространстве автоклава



Рис. 11. Давление воздуха в центральном сечении автоклава



Рис. 12. Плотность воздуха в центральном сечении автоклава

Необходимый расход воздуха при температуре 25 °С на выходе из вентилятора составил 21,5 кг/с.

Течение воздуха в пустом автоклаве при температуре 25 °С

В данном разделе производится расчет течения воздуха в пустом автоклаве при температуре 25 °С и давлении 1 атм. Это означает, что в автоклаве циркулирует такая постоянная масса воздуха при температуре 25 °С, которая в неподвижном состоянии дает давление в 1 атм в том же объеме. Принимается, что массовый расход воздуха через вентилятор в данных условиях составляет 21,5 кг/с (значение, найденное в предыдущей части).

Конечно-элементная сетка состоит из тетраэдров со стороной 50 мм и насчитывает 430 тыс. узлов и 2,35 млн элементов (рис. 13).

В расчете задавались следующие граничные условия:

- приток воздуха через выпускную поверхность вентилятора 21,5 кг/с;
- сток воздуха через поверхность решетки 21,5 кг/с.

Модель в данном варианте не учитывает возможное закручивание воздуха в рабочей камере автоклава при его заборе вентилятором. Результаты расчета показаны на рис. 14 и 15.

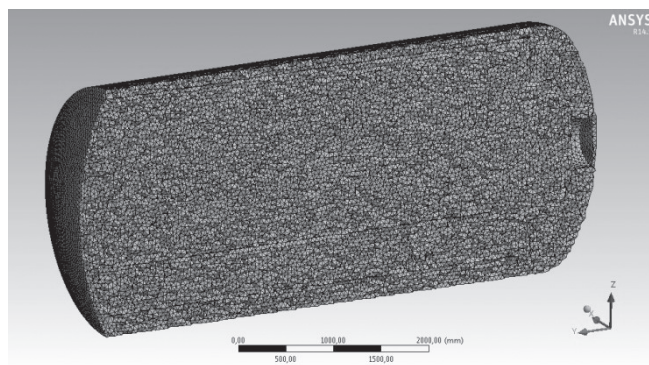


Рис. 13. Конечно-элементная сетка в разрезе для моделирования течения воздуха в автоклаве при температурах 25 °С и 180 °С



Рис. 14. Скорости воздуха в вертикальном сечении автоклава



Рис. 15. Скорости воздуха в вертикальном сечении автоклава (показаны значения в диапазоне 0–11 м/с)

Течение воздуха в пустом автоклаве при температуре 180 °С

В данном разделе производится расчет течения воздуха в пустом автоклаве при температуре 180 °С и давлении 1 атм. В автоклаве циркулирует такая постоянная масса воздуха при температуре 180 °С, 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. Как следствие, средняя плотность воздуха

в автоклаве может быть вычислена из уравнения состояния совершенного газа $p = \rho RT$. Ее значение при температуре 180 °С составляет

$$\frac{298 \text{ K}}{453 \text{ K}} \cdot 1,185 \text{ кг/м}^3 = 0,77954 \text{ кг/м}^3.$$

Объемный расход воздуха через вентилятор сохраняется и равен расходу при 25 °С. Тогда массовый расход воздуха через вентилятор уменьшается пропорционально его плотности и в рассматриваемых условиях равен

$$\frac{0,77954 \text{ кг/м}^3}{1,185 \text{ кг/м}^3} \cdot 21,5 \text{ кг/с} = 14,1435 \text{ кг/с}.$$

В расчете задавались следующие граничные условия:

— приток воздуха через выпускную поверхность вентилятора 14,1435 кг/с;

— сток воздуха через поверхность решетки 14,1435 кг/с.

Модель в данном варианте не учитывает возможное закручивание воздуха в рабочей камере автоклава при его заборе вентилятором. Результаты расчета показаны на рис. 16 и 17.

Результаты, приведенные в двух предыдущих разделах, показывают, что температура воздуха

практически не влияет ни на картину течения, ни на скорости воздуха в пустом автоклаве.

Таким образом, можно заключить, что в рассмотренных условиях течение в пустом автоклаве в большей степени определяется градиентом давления, нежели вязкостью среды.

Поэтому близкие к точным распределения скоростей на поверхностях изделия в условиях автоклава могут быть получены без моделирования нагретого воздуха.

Моделирование обдува оснастки в автоклаве

В данном разделе производится расчет обдува композитной оснастки в автоклаве при температуре 25 °С и давлении 1 атм. Это означает, что в автоклаве циркулирует такая постоянная масса воздуха при температуре 25 °С, которая в неподвижном состоянии дает давление в 1 атм в том же объеме.

Конечно-элементная сетка состоит из тетраэдров со стороной 50 мм в регулярной зоне и сгущается до размера стороны элемента в 10 мм в зоне обтекания оснастки. Модель насчитывает 1,93 млн узлов и 10,4 млн элементов.

В расчете задавались следующие граничные условия:

— приток воздуха через выпускную поверхность вентилятора 25,1 кг/с;

— сток воздуха через поверхность решетки 25,1 кг/с.

Выводы

В соответствии с настоящими исследованиями предложена конструкция и технология изготовления высокоточной композитной формообразующей оснастки из углепластика. Оснастка имеет параболическую поверхность, переходящую в плоскость, которая заканчивается отбортовкой. Плоская часть оснастки несет в себе две функции. Во-первых, она используется для установки технологического оборудования при изготовлении рефлектора, а во-вторых — для размещения ребра жесткости, что позволяет значительно увеличить жесткость рабочей поверхности. Отсутствие на рабочей поверхности конструктивных элементов, жестко связанных с ней, позволяет свести к минимуму тепловые деформации. Использование в качестве материала оснастки углепластика позволяет наиболее эффективно решить проблему остаточных напряжений в изделии из УКМ за счет одинакового механизма возникновения и релаксации внутренних напряжений при воздействии теплового поля во время цикла полимеризации.

Для всех рассмотренных задач газовой динамики получены сходящиеся решения с уровнем невя-

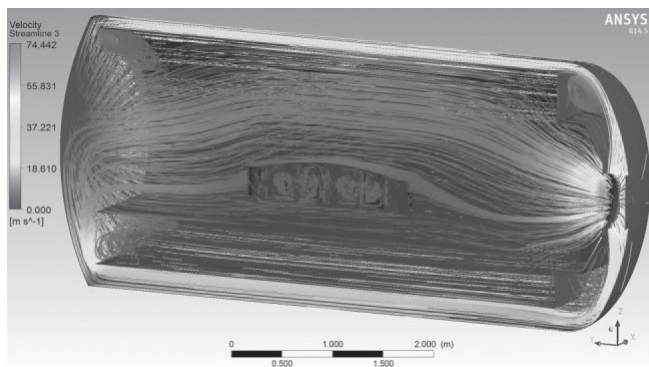


Рис. 16. Линии тока воздуха в автоклаве

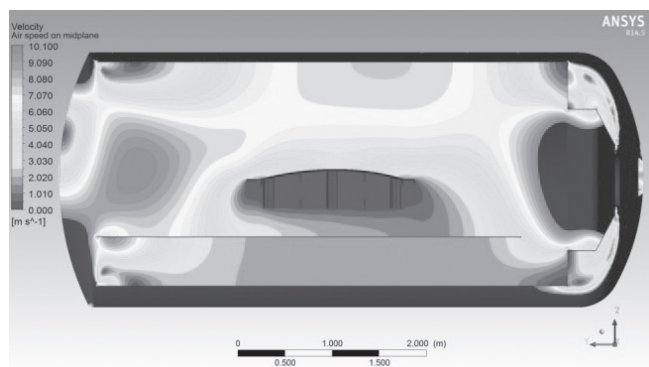


Рис. 17. Скорости воздуха в вертикальном сечении автоклава (показаны значения в диапазоне 0—11 м/с)

зок ниже стандартного, что говорит о хорошем качестве представленных решений.

Предложена методика моделирования работы автоклава. Имеющийся автоклав Olmag АТС-2800/5000 численно смоделирован и откалиброван в соответствии с результатами натуральных испытаний. Произведены расчеты течения воздуха в пустом автоклаве при комнатной температуре и температуре 180°C. Получены картины распределения скоростей по сечениям, которые для рассмотренных условий совпадают.

Из результатов расчета видно, что решение задачи зависит от действующего градиента давления в автоклаве. Поэтому для точного моделирования прогрева необходимо получать картины их обтекания только в условиях автоклава. На результат решения задачи прогрева изделия в автоклаве будут сильно влиять позиционирование в нем изделия и наличие других вспомогательных конструкций, в связи с чем эти факторы также нужно принимать в расчет.

Исследования показали, что получение равномерного прогрева рефлектора в автоклаве может быть получено, если:

— установить теплоизолирующие материалы на тыльную поверхность рефлектора;

— установить экран внутри автоклава, снижающий скорость потока воздуха на тыльной стороне рефлектора.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ
по договору №02.G25.31.0114 в рамках выполнения
комплексного проекта по постановлению
Правительства №218 (шифр 2014-218-05-8228).*

Библиографический список

1. *Каблов Е.Н.* Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии.* 2012. №5. С. 7-17.
2. *Бердникова Н.А., Иванов А.В., Белов О.А., Чичурин В.Е.* Проектирование крупногабаритного высокоточного рефлектора антенны космического аппарата с контурной диаграммой направленности // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева.* 2016. Т. 17. №2. С. 378-387.
3. *Бахрах Л.Д., Галимов Г.К.* Зеркальные сканирующие антенны. Теория и методы расчета. — М.: Наука, 1981. С.15-30.
4. *William A. Imbriale, Steven Gao, Luigi Boccia.* Space Antenna Handbook. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom. 2012. Pp. 9, 81-83, 114.
5. *Бердникова Н.А., Чичурин В.Е.* Проектирование и технология изготовления сектора центрального зеркала космической обсерватории «Миллиметр» // *Труды МАИ.* 2015. №80. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56908>
6. *Алифанов О.М., Ненарокомов А.В., Ненарокомов К.А., Титов Д.М.* Параметрическая идентификация нелинейных математических моделей распространения продольных волн в материалах // *Вестник Московского авиационного института.* 2013. Т. 20. № 5. С. 185-195.
7. *Belov D.A., Makarenko I.V., Dunaev A.V., Babkin A.V., Solopchenko A.V., Yablokova M.Yu., Kepman A.V., Tretyakov A.V., Ulyanov A.V., Gromashev A.G.* Curing processes simulation of complex shape carbon fiber reinforced composite components produced by vacuum infusion // *Polymer Composites.* 2016. Vol. 37. Issue 7, pp. 2252-2259.

COMPOSITE SHAPE-GENERATING TOOL SET FOR SPACECRAFT ANTENNAE REFLECTOR MANUFACTURING

Belov O.A.^{1*}, Berdnikova N.A.^{2**}, Babkin A.V.^{3***}, Kozlov M.V.^{3****}, Belov D.A.^{3*****}

¹ Information Satellite Systems named after acad. M.F. Reshetnev,
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

² Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev,
SibSAU, 31, Krasnoyarsky Rabochy av., Krasnoyarsk, 660037, Russia

³ Institute of new carbon materials and technologies,
1, bldg. 11, Leninskie Gory str., Moscow, 119234, Russia

* e-mail: boa@iss-reshetnev.ru

** e-mail: berdnikova-nataly@mail.ru

*** e-mail: ababkin@inunit.ru

**** e-mail: ichebroller@gmail.com

***** e-mail: studd_belov@list.ru

Abstract

Irregular shape items manufacturing from polymeric composite materials (PCM) requires the tool set, which geometry duplicates geometry of the item. The material is spread on the shape-generating tool set, and then its polymerization is carried out at the predetermined pressure and temperature that can achieve up to 200°C. In this respect, the most complicated problem while forming precision items from PCM consists in temperature deformation occurrence while polymerization process.

For years, metal hybrid tool sets have prevailed in high-precision composite parts manufacturing. A hybrid tool set has invar (nickel alloy with CLTE close to zero) shaping plate and a support structure made of some other metal with sufficient thermal conductivity. The tool set of such kind involves shape-generating plate attachment to the support structure means, which ensure the possibility of their free thermal extension. The drawback of metal tool sets consists in their high cost, low material utilisation ratio and long manufacturing cycle.

The next step in tool sets for high-precision items made of PCM evolution was creation of composite shape-generating tool sets. Fiberglass and carbon reinforced plastics are implemented for such tool set manufacturing. Its surface can be coated with ceramic or gel coat layer of precise thickness, providing minimum roughness, maintainability, and increasing the items takeoffs. Composite tool sets does not have disadvantages of their metal counterparts, though several design problems are still stay unsolved.

This paper proposes a carbon composite tool set design for satellite antenna reflector producing. The main requirements to this tool set are precision and stability of the shaping surface. Design solutions are validated by thermal and static mechanical analyses based on finite elements method. In addition, the paper

presents the results of autoclave operation simulation, which allows analysing the tool set optimal positioning inside the autoclave to provide uniform heating.

Keywords: carbon composite, heat transfer, gas dynamics modeling, autoclave molding, tool set, antennae reflector.

References

1. Kablov E.N. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2012, no. 5, pp. 7-17.
2. Berdnikova N.A., Ivanov A.V., Belov O.A., Chichurin V.E. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 378-387.
3. Bakhrakh L.D., Galimov G.K. *Zerkal'nye skaniruyushchie anteny. Teoriya i metody rascheta* (Antenna mirror scanning. Theory and design methods), Moscow, Nauka, 1981, pp. 15-30.
4. William A. Imbriale, Steven Gao, Luigi Boccia. *Space Antenna Handbook*. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2012, pp. 9, 81-83, 114.
5. Berdnikova N.A., Chichurin V.E. *Trudy MAI*, 2015, no. 80, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=56908>
6. Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Nenarokomov K.A., Titov D.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 5, pp. 185-195.
7. Belov D.A., Makarenko I.V., Dunaev A.V., Babkin A.V., Solopchenko A.V., Yablokova M.Yu., Kepman A.V., Tretyakov A.V., Ulyanov A.V., Gromashev A.G. Curing processes simulation of complex shape carbon fiber reinforced composite components produced by vacuum infusion. *Polymer Composites*, 2016, vol. 37, issue 7, pp. 2252–2259.