

Технология изготовления изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала

П.Л. ЛЮДОВСКИЙ,

канд. техн. наук,

Н.А. СЕМИН,

А.В. НАУМОВ,

канд. хим. наук,

А.В. ПОЛЯЕВ

(КНИТУ-КАИ, Казань)

12962281@mail.ru

Описана технология изготовления изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала. Разработана и апробирована методика определения необходимого количества армирующего материала.

Композиционные материалы, радиопрозрачность, термостойкость, технология, коэффициент толщины монослоя

Важной задачей на современном этапе развития самолетостроения и ракетостроения является создание термостойких и радиопрозрачных материалов, изделия из которых могут эксплуатироваться при температурах 1200...1800 °С от 1 мин до 1 ч и более [1–3]. Таким материалом является высокотемпературный радиопрозрачный композиционный материал, разработанный в КНИТУ-КАИ (Казань) и МГУ (Москва) [4, 5]. После получения характеристик этого материала по результатам испытаний и лабораторных исследований необходимы разработка и отработка технологий для производства изделий из него – жестких деталей с плоскими и криволинейными поверхностями, а также тонкостенных оболочек сложного профиля сечения и низкой жесткостью. Практически ко всем деталям предъявляются жесткие требования по их геометрическим размерам и формам.

Основными компонентами высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала являются порошкообразное связующее ФНИ350 с различными модификациями и наполнитель – армирующий материал (плетеные полотна или пряжи различных типов на основе кремнеземной нити K11C6-170БА). После анализа конструктивно-технологических особенностей полученных образцов и деталей из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала, проведенных комплексных испытаний по определению параметров термостойкости, радиопрозрачности, прочностных и других характеристик, а также взаимосвязей значений этих параметров с множеством реализованных экспериментально-опытных формовок были выделены четыре технологии получения указанных образцов-заготовок деталей из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала: 1) автоклавное формование; 2) формование высоким давлением; 3) вакуумное формование с высоким коэффициентом наполнения; 4) вакуумное формование с низким коэффициентом наполнения. В данной статье рассматриваются особенности использования второй технологии для ее реализации в серийном производстве изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала.

Технология автоклавного формования, достаточно подробно описанная в работах [3, 4], предназначена в основном для формования плоских заготовок высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала. Для получения готовых деталей используется последующая механическая обработка этих заготовок. Из-за высокой абразивности обрабатываемого высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала заготовок и других факторов этот трудоемкий процесс требует частой смены режущего инструмента вследствие его быстрого износа. В связи с этим снижается производительность и увеличивается стоимость изготовления готовых деталей из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала.

Для изготовления плоских заготовок толщиной до 12 мм разработана технология формования высоким давлением. Эта технология предполагает использование технологической оснастки замкнутого типа из алюминиевого сплава Д16Т с механизмом обеспечения требуемого давления в зоне формования с помощью нагнетания воздуха компрессором, выполненным в одном разъемном блоке с возможностью его нагрева до температуры 200 °С в термопечи. Принципиальная схема реализации рассматриваемой технологии показана на рис. 1. Здесь: 1 – преформа высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала; 2 – силиконовая мембрана; 3 – рамка; 4 – прижимная часть рамки; 5 – основание с

вакуумным контуром; 6 – съемная крышка со штуцером для нагнетания давления компрессором; 7 – элементы герметизирующего контура.

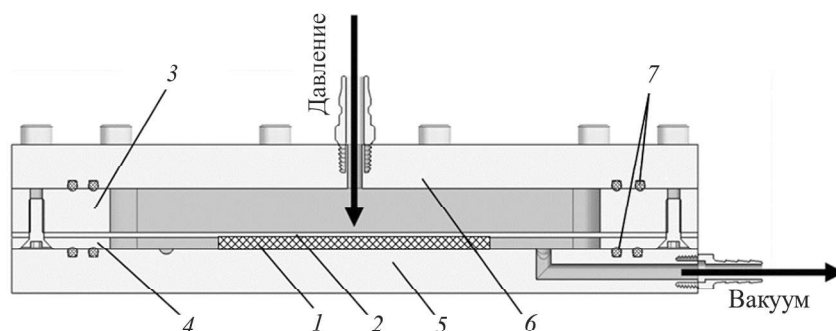


Рис. 1

Этап выкладки преформы высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала на основную часть технологической оснастки для формирования высоким давлением совпадает с методом автоклавного формирования, описанным в работе [4]. Перед выкладкой вспомогательных технологических материалов устанавливается рамка с силиконовой мембраной и проводится предварительная подформовка преформы высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала при нормальной температуре под полным вакуумом. Далее устанавливается крышка, и технологическую оснастку перемещают в термопечь, где подключается компрессор для нагнетания давления и вакуумный насос на соответствующие выходы технологической оснастки. Затем выполняется процесс формирования в соответствии с разработанным графиком (рис. 2).

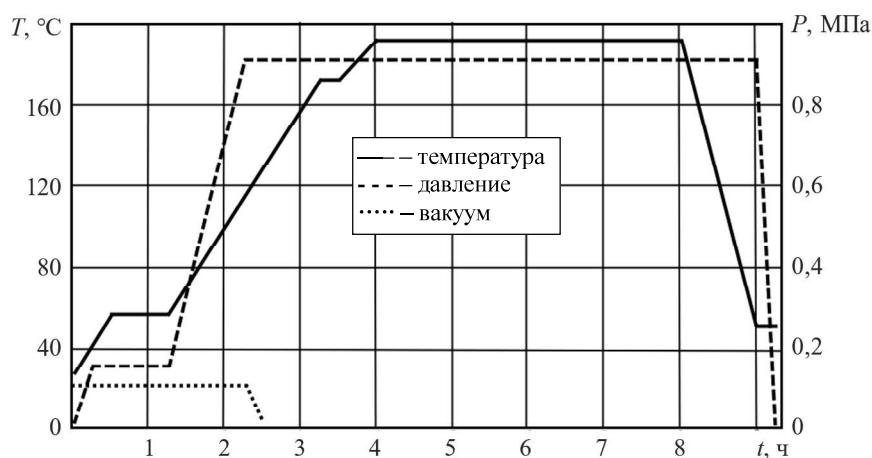


Рис. 2

Данная технология позволяет формировать плоские образцы или заготовки из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала с последующей их механической обработкой для получения готовых изделий. Габариты (длина и ширина) получаемых заготовок ограничены интервалом 50...800 мм ввиду значительной разницы коэффициента линейного термического расширения формируемого образца высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала и элементов технологической оснастки. Именно в этом интервале размеров и при высокой серийности производства заготовок из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала проявляются следующие преимущества рассматриваемой технологии в сравнении с технологией автоклавного формирования: уменьшение затрат на эксплуатацию и амортизация специального технологического оборудования (автоклава), отсутствие вспомогательных материалов, необходимых для формирования в автоклаве, снижения трудоемкости и цикла формирования. Важной особенностью указанных технологий является укладка паке-

та из необходимого количества слоев наполнителя (армирующих компонентов) с учетом выбираемой экспериментально массой связующего с целью получения требуемых значений плотности, пористости и толщины заготовок после формования указанного слоистого пакета. На толщину обрабатываемых в дальнейшем заготовок желательно оставлять минимальный припуск на обработку, и, соответственно, для их формования перед укладкой слоев армирующего материала и их пропитки связующим необходимо по возможности точнее определить количество этих слоев. Чаще всего такой расчет выполняется по результатам анализа образцов после выполнения ряда экспериментальных формовок и выбору оптимальных по количеству слоев и массы (объема) связующего. Однако такое использование данного метода неэффективно в серийном композитном производстве с большой номенклатурой деталей и существенно повышает их себестоимость.

Существуют методы определения или прогнозирования толщины отформованного изделия в зависимости от толщины слоя, их количества и массы (объема) связующего при укладке пакета из препрега или при послойной пропитке наполнителя жидким связующим. Расчет массового содержания армирующего наполнителя W_a в образце для испытаний выполняют по формуле [6]

$$W_a = \frac{m_2}{m_1} 100, \quad (1)$$

где m_2 – масса образца после испытания, г; m_1 – масса образца до испытания, г.

Содержание армирующего наполнителя в образце для испытаний V_a , выражаемое как процент по объему, вычисляют по формуле

$$V_a = W_a \frac{\rho_{\text{км}}}{\rho_a}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{км}}$ – плотность композиционного материала, г/см³; ρ_a – плотность армирующего наполнителя, г/см³.

Исходя из этих данных, можно получить расчетную толщину отформованной детали. Для определения массы образца после испытания необходимо удалить матрицу из его структуры, например, методом сжигания или растворения.

На практике часто встречается задача, когда по известному количеству слоев армирующего наполнителя необходимо определить объем связующего, который необходим для обеспечения требуемого коэффициента армирования (коэффициента объемного содержания волокон) [7], определяемого по формуле

$$\psi_a = \frac{V_a}{V_{\text{км}}} = \frac{V_a}{V_a + V_m}, \quad (3)$$

где V_a – объем, занимаемый армирующей компонентой (волокнами); V_m – объем, занимаемый матричным материалом; $V_{\text{км}}$ – объем всего композиционного материала.

Для определения количества матричного материала, обеспечивающего требуемый коэффициент армирования, можно воспользоваться формулой

$$V_m = \frac{V_a (1 - \psi_a)}{\psi_a} = V_a \left(\frac{1}{\psi_a} - 1 \right). \quad (4)$$

Таким образом, чтобы найти необходимый объем матричного материала, необходимо сначала определить объем волокон и задать коэффициент армирования. Реальные значения коэффициента армирования в волокнистых композитных материалах варьируются в диапазоне $\psi_a = 0,3 \div 0,7$ [8].

Эти расчеты могут быть рекомендованы для определения количества слоев наполнителя и объема связующего и определения толщины готовых деталей (после их формования), в структуре которых содержится связующее в виде смол, армирующий материал из стеклотканей или готовые слои препрега. В состав высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала входит связующее ФНИ350 в виде порошка перед пропиткой слоев армирующего материала, а армирующая ткань имеет

разнотолщинность по сечениям, так как на ее поверхностях после плетения обнаруживаются множественные петли из нитей с разными высотами, из-за чего практически невозможно измерить толщину одного слоя, подсчитать количество слоев и, соответственно, спрогнозировать толщину будущей детали или заготовки перед формованием.

Процесс пропитки и последующее формование высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала предусматривает выполнение трех основных последовательных стадий. На первой стадии равномерно наносится порошкообразное связующее. Эта технологическая операция реализуется вручную с использованием специальной сетчатой оснастки с калиброванными ячейками, через которые просыпают частицы порошка на поверхность армирующего материала независимо от ее формы – плоской или криволинейной. Связующее наносится в необходимом (расчетном или экспериментально определенном) количестве на каждый слой армирующего материала, а слои накладываются друг на друга согласно схеме укладки. На второй стадии уложенную таким образом слоистую конструкцию помещают в технологическую оснастку, которую в свою очередь помещают в термопечь и выдерживают таким образом в течение 9 ч при температуре до 190 °С (см. рис. 2). Происходит расплавление порошка и первичная пропитка слоев армирующего материала. Далее полученную заготовку нагревают в течение 53 ч при температуре 190–330 °С с постотверждением в соответствии с разработанным графиком реализации этого режима (рис. 3).

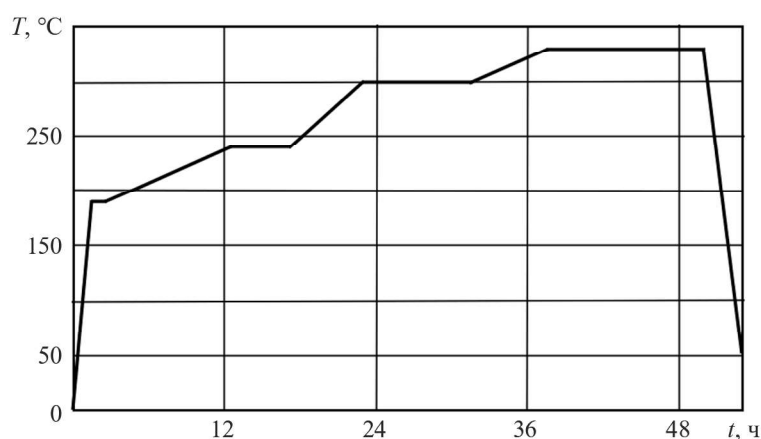


Рис. 3

Таким образом, значение толщины слоя будет изменяться в процессе формования заготовки, в связи с этим использование формул (1), (4) для расчета требуемой толщины отформованных заготовок из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала и определение количества слоев армирующего материала и массы связующего не представляется возможным.

В результате множества выполненных формований образцов заготовок из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала с использованием технологии формования высоким давлением установлено, что наиболее равномерная структура материала получается при массовом содержании связующего 55–60 % от массы материала. Плотность высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала составила $1500 \div 1550 \text{ кг/м}^3$. Для решения задачи определения потребного количества слоев используемого армирующего материала была разработана методика расчета, которая в дальнейшем может быть использована и в серийном производстве, в том числе и для реализации других технологий формования изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала.

Для определения количества слоев с учетом заданной толщины $h_{об}$ готового образца из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала и указанного оптимального массового содержания связующего перед его формованием измеряется толщина слоя ткани армирующего материала. Ее поверхности, как было указано, неравномерно волнистые независимо от вида плетения ткани с обеих сторон, из-за чего возникает разнотолщинность слоя по всей его площади. В связи с этим рационально определить усредненное значение толщины каждого слоя материала перед их укладкой.

Для измерения толщины слоя ткани используется конструкция, состоящая из двух плоских металлических пластин, между которыми располагают образец армирующего материала габаритами 100×100 мм (рис. 4).

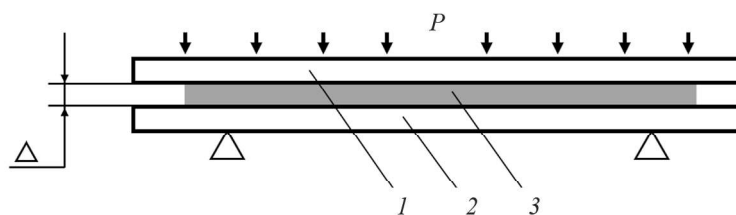


Рис. 4

Нижняя пластина 2 неподвижно фиксируется на столе. На ее верхнюю поверхность укладывается образец ткани армирующего материала 3, который прижимается верхней пластиной 1 равномерно распределенным по ее внешней поверхности давлением в соответствии с режимом формования. Для формования под высоким давлением величина давления составила $P = 0,9$ МПа. В зажатой таким образом конструкции измеряется усредненная толщина слоя ткани армирующего материала с прижатыми к внутренним плоскостям пластин 1, 2 петлями из нитей.

В рассматриваемой технологии используется армирующий материал в виде трикотажного полотна 07000B12.995 по ТУ РАТ.1382867.001-2022 на основе кремнеземной нити K11C6-170 БА. Средняя измеренная толщина слоя l данной ткани для технологий формования под высоким давлением составляет 0,3 мм.

После определения значения толщины слоя l армирующего материала можно определить необходимое количество слоев армирующего материала по известному из конструкторской документации значению толщины заготовки или детали из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала:

$$n = \frac{h_{об}}{kl}, \quad (5)$$

где k – коэффициент толщины монослоя.

Произведение в знаменателе формулы (5) является расчетной толщиной монослоя композиционного материала. Для определения значения k можно использовать следующее соотношение:

$$\rho = \frac{m_{об}}{Sn_{об}lk}, \quad (6)$$

где $m_{об}$ – масса образца из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала; S – площадь образца (заготовки) из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала; $n_{об}$ – количество слоев армирующего материала в образце высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала.

Значения составляющих формулы (6) были получены эмпирически в результате обработки данных о структуре и свойствах более двадцати образцов из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала, изготовленных с одинаковым количеством слоев, одинаковой площадью, при одинаковых количествах связующего и режимах формования. Используя формулу (6), получим выражение для расчета k :

$$k = \frac{Sn_{об}l\rho}{m_{об}}. \quad (7)$$

Расчетное значение коэффициента толщины монослоя для формования под высоким давлением составило $k = 1,118$.

Представленная методика, использованная для расчета количества слоев армирующего материала при последующих формовках плоских заготовок из высокотемпературного радиопрозрачного компози-

ционного материала с толщинами 5...15 мм из армирующих материалов разной структуры и толщины, может быть применена при разработке серийных технологических процессов в производстве заготовок из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала. Были получены образцы заготовок с толщинами, близкими к их расчетным значениям, и с отклонением $\pm 0,5$ мм, что для дальнейшей их механической обработки в промышленных производствах можно считать вполне эффективным технологическим решением. Данная методика также может быть реализована в композитном производстве при формовании тонкостенных криволинейных изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала с толщиной 1,5...3 мм.

Представленная в работе технология формования высоким давлением заготовок и изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала, а также методические расчеты по определению потребного количества армирующего материала различных видов и других параметров могут быть рекомендованы к использованию в серийных технологиях производства таких изделий.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева («Приоритет-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев И.Н. и др. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // Тр. ВИАМ [Электронный журнал]. 2014. № 1. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/636.pdf> (дата обращения: 14.10.2024).
2. Булгаков Б.А. и др. Механические и физико-химические свойства связующих для полимерных композиционных материалов на основе легкоплавких фталонитрильных мономеров // Изв. РАН. Серия химическая. 2016. № 1. С. 287–290.
3. Бабкин А.В. и др. Термостойкие фталонитрильные матрицы, содержащие силоксановые фрагменты // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 2016. № 3. С. 252–261.
4. Людоговский П.Л., Наумов А.В., Лунев И.В. Разработка, изготовление и испытания высокотермостойкого радиопрозрачного композиционного материала // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 4. С. 167–177.
5. Способ получения высокотемпературного композиционного материала: пат. 2784939 Рос. Федерация, № 2022116215; заявл. 15.06.2022; опубл. 1.12.2022, Бюл. № 34.
6. ГОСТ 56682-2015. Композиты полимерные и металлические. Методы определения объема матрицы, армирующего наполнителя и пустот. М.: Стандартинформ, 2016. 30 с.
7. Кордикова Е.И. Композиционные материалы. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2007. 182 с.
8. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов. Научное издание. Долгопрудный: Интеллект, 2014. 328 с.

Поступила в редакцию 14.11.24

После доработки 18.11.24

Принята к публикации 18.11.24

Manufacturing Technology of High-Temperature Radio-Transparent Composite Material

P.L. LYUDOGOVSKII, N.A. SEMIN, A.V. NAUMOV, AND A.V. POLYAEV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

The technology of manufacturing products of high-temperature radio-transparent composite material is described. A method for determining the required amount of reinforcing material has been developed and tested.

Composite materials, radio transparency, heat resistance, technology, monolayer thickness coefficient