

## Реализация технологии вакуумного формования в производстве тонкостенных высокотемпературных радиопрозрачных композиционных изделий

**П.Л. ЛЮДОГОВСКИЙ**,  
канд. техн. наук,  
**А.В. НАУМОВ**,  
канд. хим. наук,  
**Н.В. СЕМИН**,  
аспирант  
(КНИТУ-КАИ, Казань)  
12962281@mail.ru

*Описана технология вакуумного формования изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала. Разработана и апробирована методика определения необходимого количества компонентов композиционного материала.*

**Композиционные материалы, радиопрозрачность, термостойкость, вакуумное формование, методика расчета**

В современной мировой практике наблюдается устойчивая тенденция увеличения значений скоростных и маневренных характеристик летательных аппаратов, управляемых радиолокационными системами. Важнейшими элементами являются антенные радиопрозрачные обтекатели, предназначенные для защиты антенных блоков от аэродинамических воздействий, а также теплозащитные панели планера, воспринимающие значительные тепловые и механические нагрузки. Эксплуатация указанных элементов предполагает работу в условиях высоких температур, составляющих 1200–1800 °С, в течение временного интервала от 1 мин до 1 ч и более [1–3].

С учетом функционального назначения к таким элементам предъявляется широкий спектр требований. Например, обеспечение требуемых радиотехнических характеристик обуславливает толщину стенки оболочки обтекателя, что, в свою очередь, накладывает ограничения на его прочностные и теплофизические свойства. При этом сложные формы панелей зачастую определяют их тонкостенную конструкцию [4].

Для производства указанных изделий используется высокотемпературный радиопрозрачный композиционный материал, созданный в КНИТУ-КАИ (Казань) и МГУ (Москва), подвергнутый комплексным испытаниям по оценке таких характеристик, как термоустойчивость, прочность, теплостойкость, а также параметров радиопрозрачности [4, 5]. По результатам проведенных испытаний образцов разработанного высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала подтверждено соответствие основных характеристик заданным требованиям и их стабильность в условиях эксплуатации.

Дальнейшие исследования в этой области связаны с выбором и производством модификаций армирующих материалов и одновременно с технологиями изготовления изделий из указанного материала. Для изготовления обтекателей и их элементов из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала применяется технология, реализующаяся в два последовательных этапа. На первом этапе автоклавным формованием, или формованием высоким давлением, изготавливаются плоские плиты высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала. На втором этапе для получения готовых изделий выполняется их механическая обработка в соответствии с геометрией готовых изделий [4, 5].

Вместе с тем в конструкцию летательного аппарата входит множество тонкостенных панелей с различной формой их поверхности, работающих в условиях высоких температур (противопожарные перегородки, элементы обшивки планера летательного аппарата и др.). Результаты термических и прочностных испытаний разработанного высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала создают объективные предпосылки для его использования в производстве таких изделий. Для реализации технологического процесса их изготовления была апробирована и доработана известная методика вакуумного формования [6–10].

Принципиальная схема реализации указанной технологии для формования высокотермостойкой тонкостенной панели двойной кривизны приведена на рис. 1. Здесь: 1 – формообразующая оснастка; 2 – преформа высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала; 3 – жертвенный/дренажный слой; 4 – высокотемпературная вакуумная пленка; 5 – перфорированные силиконовые трубки для создания вакуума; 6 – высокотемпературная герметизирующая лента.

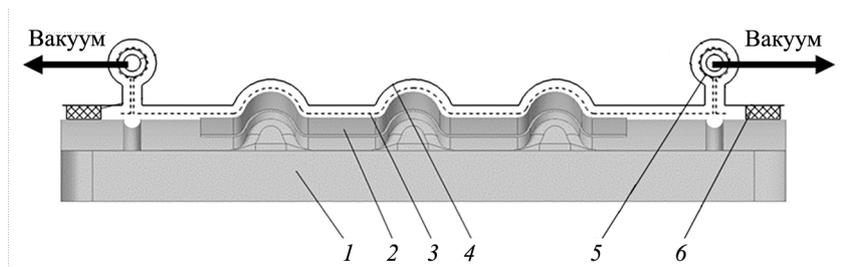


Рис. 1

Основой технологии является процесс уплотнения и формования слоев армирующего материала с равномерно распределенным между его слоями порошкообразным фталонитрильным связующим ФНИ350А, осуществляемый при действии разрежения для удаления воздуха и при высокой температуре.

Типовой технологический процесс изготовления изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала вакуумным формованием выполняется в несколько этапов.

1. Подготовка формообразующей оснастки и компонентов.
2. Послойная выкладка армирующего материала в определенной последовательности на формообразующую оснастку с равномерным распределением порошкообразного однокомпонентного фталонитрильного связующего на каждом слое.
3. Укладка вспомогательных материалов.
4. Сборка вакуумного пакета на формообразующей оснастке.
5. Проверка герметичности вакуумного пакета.
6. Проведение цикла полимеризации в термопечи в соответствии с разработанным и апробированным режимом полимеризации (рис. 2).
7. Распрессовка вакуумного пакета и извлечение изделия из формообразующей оснастки.
8. Постотверждение изделия в муфельной печи согласно режиму нагрева-охлаждения (рис. 3).
9. Механическая обработка по контуру обрезки.
10. Контроль геометрии, структуры и толщины изделия.

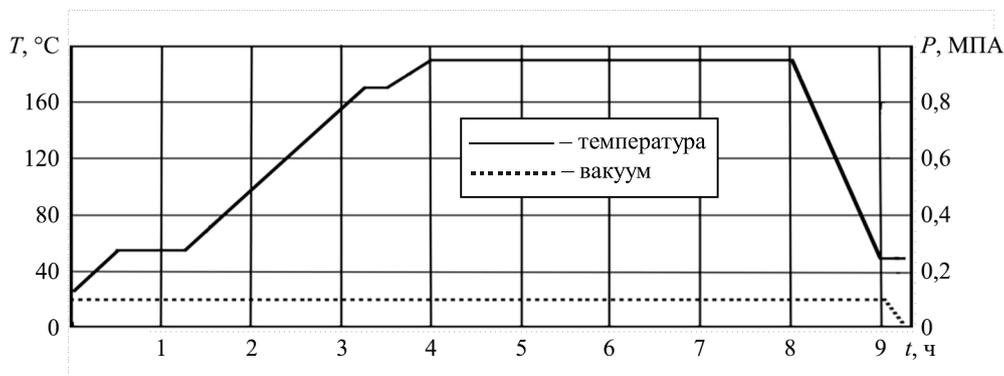


Рис. 2

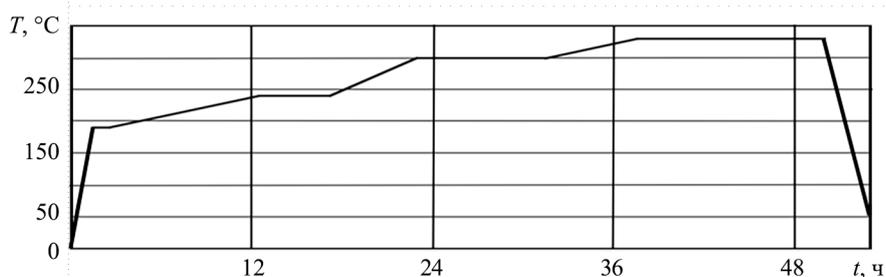


Рис. 3

Расчетное значение массы готового изделия  $m_n$  и толщина одного слоя армирующего материала с учетом связующего материала (монослоя) готового изделия будут зависеть не только от суммы объема армирующего материала  $V_a$  и объема связующего материала  $V_m$ , но и от вариации их значений в процессе формования, а также от величины давления, времени выдержки уложенных слоев армирующего материала с находящимся между ними порошкообразным связующим и др. При этом порошкообразное связующее в этом процессе переходит в жидкое, а затем в стеклообразное состояние с выходом его технологических отходов из отформованного объема изделия. В связи с этим получить точную формулу для расчета массы изделия в зависимости от количества связующего в настоящий момент невозможно из-за отсутствия необходимого количества статистических данных и технологических параметров для этого расчета. С целью получения таких данных для выполнения эмпирических расчетов по определению необходимого количества связующего для процесса формования и расчетной массы изделия из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала, а также отработки процессов их формования было выполнено более двадцати формовок плоских образцов с одинаковой структурой композитного пакета, одинаковой площадью и единым режимом формования. При этом общая масса связующего материала, равномерно распределяемого между слоями армирующего материала, варьировалась.

Для каждой формовки вычислялся коэффициент армирования, а также фиксировалась толщина полученного монослоя образца высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала:

$$\Psi_a = \frac{V_a}{V_{\text{км}}} = \frac{V_a}{V_a + V_m}, \quad (1)$$

где  $\Psi_a$  – коэффициент армирования;  $V_a$  – объем, занимаемый армирующим материалом;  $V_{\text{км}}$  – объем всего композита;  $V_m$  – объем, занимаемый связующим материалом;

$$\Delta_3 = \frac{h_3}{n}, \quad (2)$$

где  $\Delta_3$  – экспериментальная толщина монослоя;  $h_3$  – полученная толщина детали;  $n$  – количество слоев армирующего материала в полученной детали.

На основании анализа полученных данных, а также оценки качества отформованных изделий, их прочностных характеристик, плотности и пористости при использовании технологии вакуумного формования возможно получение изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала двух групп. К первой группе относятся изделия с высоким коэффициентом армирования  $\Psi_b = 0,43$ , во второй – с низким коэффициентом армирования  $\Psi_n = 0,32$ .

Для выполнения дальнейших расчетов введем коэффициент  $k_m$  как отношение толщины монослоя образца  $\Delta_3$  к толщине армирующего материала  $\Delta_1$ :

$$k_m = \frac{\Delta_3}{\Delta_1} = \frac{h_3}{n\Delta_1}. \quad (3)$$

С учетом измеренных средних значений указанных параметров отформованных образцов и после некоторых расчетов определим, что для технологии формования с высоким коэффициентом армирования значение  $k_{mb} = 1,19$ , а для формования изделий с низким коэффициентом армирования  $k_{mn} = 1,55$ .

В рамках реализации этой технологии можно с высокой степенью достоверности выполнять расчеты для получения заданной в конструкторской документации толщины формуемых изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала.

На первом этапе этих расчетов с учетом технологии и требуемого значения толщины детали определяется количество слоев армирующего материала:

$$n = \frac{h_n}{\Delta k_m}, \quad (4)$$

где  $h_n$  – требуемая толщина детали из конструкторской документации;  $k_m$  – коэффициент толщины монослоя в зависимости от технологии;  $\Delta$  – средняя толщина армирующей ткани в зависимости давления формования, методика определения которой приведена в работе [11].

Далее рассчитывается требуемая масса порошкового связующего. При этом для определения количества матричного материала, обеспечивающего требуемый коэффициент армирования, приведем формулу (1) к следующему виду:

$$V_M = \frac{V_a(1-\Psi_a)}{\Psi_a} = V_a \left( \frac{1}{\Psi_a} - 1 \right); \quad (5)$$

$V_a$  рассчитывается по формуле

$$V_a = \frac{\rho_{nk} S_n n}{\rho_k}, \quad (6)$$

где  $\rho_{nk}$  – поверхностная плотность армирующего материала;  $S_n$  – площадь изделия;  $\rho_k$  – плотность сырья армирующего материала.

Объем связующего можно рассчитать из соотношения

$$V_M = \frac{m_M}{\rho_M}, \quad (7)$$

где  $m_M$ ,  $\rho_M$  – масса и плотность связующего материала.

Используя формулы (4) – (7), получим конечную формулу для определения массы связующего в изделии в зависимости от технологии формования:

$$m_M = \frac{\rho_M \rho_{nk} S_n h_n}{\rho_k \Delta k_m} \left( \frac{1}{\Psi_a} - 1 \right). \quad (8)$$

С помощью представленной методики возможно изготавливать тонкостенные криволинейные панели из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала с заявленной толщиной от 0,8 мм с точностью  $\pm 0,1$  мм по технологии вакуумного формования.

На основе разработанной методики расчета компонентов композиционного материала с использованием порошкового связующего, а также технологии формования изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала обеспечивается возможность его применения для изготовления тонкостенных термостойких и радиопрозрачных элементов конструкций с различными формами поверхности, предназначенных для эксплуатации в условиях высоких температур в широком диапазоне временных интервалов.

Для испытаний на термостойкость изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала были изготовлены плоские образцы толщиной 2 мм с размерами 100×100 мм. Испытания заключались в воздействии источника воспламенения на центр квадратного образца, плоскость которого расположена вертикально, в течение заданного времени экспозиции (выдержки в струе пламени) и определении наличия сквозного прогорания и способности к самостоятельному затуханию после удаления источника воспламенения. Длина пламени источника воспламенения была отрегулирована таким образом, чтобы его конец находился на расстоянии 38–45 мм от поверхности образца. В ходе испытаний осуществлялся контроль температуры на внешней и внутренней поверхностях относительно источника нагрева.

Испытания проводились при температуре пламени не менее 1200 °С и времени экспозиции 5 и 15 мин.

В состав экспериментальной установки входит метановоздушная горелка с наддувом воздуха для обеспечения температуры пламени не менее 1200 °С, цифровой мультиметр Inforce, термоэлектрический преобразователь S-типа (платинородий-платиновая термопара); термоэлектрический преобразователь K-типа (хромель-алюмелевая термопара), регистратор температуры многоканальный «Термодат».

Приведем результаты испытаний на термостойкость пластин высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала.

График зависимости температуры от времени на лицевой и тыльной сторонах образца высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала показан на рис. 4: *a* – время экспозиции 5 мин; *б* – время экспозиции –15 мин.

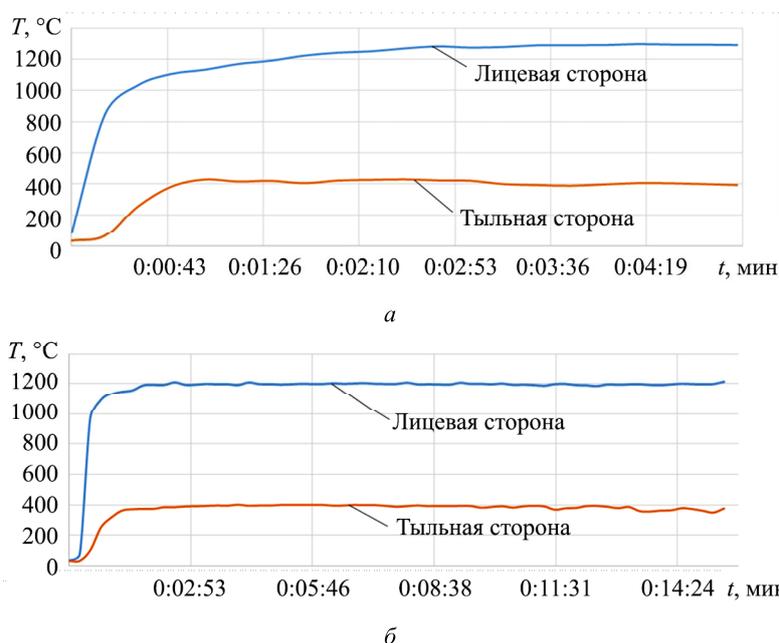


Рис. 4

Согласно результатам проведенных испытаний на термостойкость после выдержки образца высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала в течение 5 мин при температуре 1200 °С нарушение целостности материала не наблюдалось. Присутствует не критичное нарушение структуры поверхности материала. После выдержки образца высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала в течение 15 мин при температуре 1200 °С минут сквозного прогорания образца не выявлено.

В работе рассмотрены технологии вакуумного формования тонкостенных изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала, предназначенного для эксплуатации в условиях температур 1200–1800 °С. Разработаны и апробированы методики расчета соотношения компонентов композиционного материала, позволяющие обеспечивать заданные требования к толщине и качеству изделий. Испытания на термостойкость продемонстрировали высокую устойчивость разработанных образцов высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала к воздействию высоких температур без нарушения целостности материала.

Проведенные испытания опытных образцов подтвердили возможность применения высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала для изготовления термостойких тонкостенных криволинейных изделий с высокой точностью геометрических размеров. При этом рассмотрена технология вакуумного формования изделий с различным коэффициентом армирования, что позволяет гибко адаптировать процесс под конкретные требования конструкции. Полученные результаты подтверждают перспективность применения вакуумного формования для серийного производства термостойких радиопрозрачных конструкций сложной формы из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала для авиационной техники нового поколения.

#### 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: 30.04.2025).

2. Булгаков Б.А. и др. Механические и физико-химические свойства связующих для полимерных композиционных материалов на основе легкоплавких фталонитрильных мономеров // Изв. АН. Сер. химическая. 2016. № 1. С. 287–290.
3. Бабкин А.В. и др. Термостойкие фталонитрильные матрицы, содержащие силоксановые фрагменты // Высокмолекулярные соединения. Серия 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. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов. Долгопрудный: Интеллект, 2014. 328 с.
7. Караваев Р.Ю., Городилова Н.А., Донецкий К.И. Изготовление полимерных композиционных материалов на основе семипрегов // Тр. ВИАМ. 2023. № 5 (123). С. 64–74.
8. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Тр. ВИАМ. 2016. № 2 (38) С. 53–63.
9. Федяев В.Л. и др. Математическое моделирование вакуумирования сухого технологического пакета семипрегов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 150–158.
10. Пузырецкий Е.А. и др. Теоретико-экспериментальное исследование вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (ленты и ткани) и расплавленного эпоксидного связующего // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). С. 109–121.
11. Людоговский П.Л. и др. Технология изготовления изделий из высокотемпературного радиопрозрачного композиционного материала // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 4. С. 156–161.

Поступила в редакцию 30.05.25

После доработки 3.06.25

Принята к публикации 3.06.25

## Implementation of Vacuum Forming Technology in the Production of Thin-Walled High-Temperature Radio-Transparent Composite Structures

P.L. LYUDOGOVSII, A.V. NAUMOV, AND N.V. SEMIN

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

*The paper describes the technology of vacuum forming of products made of high-temperature radio-transparent composite material. A technique was developed and tested for determining the required amount of components in the composite material.*

**Composite materials, radio-transparency, heat resistance, vacuum infusion, calculation technique**