

УДК 678.026.2:678.067.2

DOI 10.18698/0536-1044-2017-12-94-102

Обоснование технологических режимов многократной пропитки–сушки и последующей автоклавной обработки для обеспечения требуемого состава материала теплозащитного покрытия и минимального времени его изготовления

В.А. Нелюб¹, В.А. Тарасов¹, В.А. Романенков², М.А. Комков¹,
Р.В. Боярская¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, 141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 4А

Justification of the Technological Modes of Repeated Impregnation-Drying and the Subsequent Autoclave Processing to Provide the Required Composition of the Thermal Protection Material and its Minimal Production Time

V.A. Nelyub¹, V.A. Tarasov¹, V.A. Romanenkov², M.A. Komkov¹,
R.V. Boyarskaya¹

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² ZAO Experimental Machine-Building Plant, S.P. Korolev Space and Rocket Corporation Energia, 141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4A



e-mail: Vladimir_Nelub.mail@emtc.ru, tarasov_va@mail.ru, Vladimir.Romanenkov@rsce.ru,
m_komkov@list.ru, brv152@mail.ru



Рассмотрены технологические вопросы обеспечения требований к содержанию и однородности распределения фенольно-формальдегидной смолы в тепловой защите спускаемых космических аппаратов. Обосновано требование к допустимому содержанию летучих компонентов перед автоклавным формованием, соблюдение которого обеспечивает достижение в готовом изделии определенного соотношения объемов волокнистого наполнителя и фенольно-формальдегидной смолы, необходимого для функционирования тепловой защиты. Исследована динамика содержания летучих компонентов в препреге при увеличении числа циклов пропитки наполнителя связующим и последующей вакуумной сушки. Показано, что для обеспечения необходимого содержания фенольно-формальдегидной смолы в готовом изделии и однородности структуры теплозащитного материала целесообразно применять трехкратную пропитку. Определены технологические режимы повторяющихся циклов пропитка–сушка, которые обеспечат минимальное время изготовления теплозащиты космических аппаратов.

Ключевые слова: тепловая защита, композиционный материал, волокнистый наполнитель, связующее, фенольно-формальдегидная смола, летучие компоненты

i This paper examines technological questions to ensure adherence to the requirements to the content and uniformity of distribution of phenol-formaldehyde resin in thermal protection systems of descending spacecraft. It justifies the requirement to the permissible content of volatile constituents before autoclave treatment. The adherence to this requirement guarantees achieving a certain ratio of the volumes of fibrous filler and phenol-formaldehyde resin, necessary for the functioning of the thermal protection system. The dynamics of the volatile constituent content in prepreg is studied under the increasing number of cycles of filler impregnation by the binder and the subsequent vacuum drying. It is shown that to provide the desired content of phenol-formaldehyde resin in the finished product and a homogeneous structure of the thermal protection material, triple impregnation is required. The technological modes of the repeated impregnation-drying cycles that ensure the minimal manufacturing time of the spacecraft thermal protection material are determined.

Keywords: thermal protection, composite material, fibrous filler, binder, phenol-formaldehyde resin, volatile constituents

Интенсивное силовое и тепловое воздействия на спускаемый космический аппарат (СКА) диктуют применение композитных материалов в тепловой защите абляционного типа. Силовую нагрузку воспринимает полимерная матрица и передает ее тканому волокнистому наполнителю, изготовленному из стеклянного и капронового волокон и представляющему собой вязально-прошивное многослойное полотно. Самой эффективной матрицей является фенольно-формальдегидная смола (ФФС), обеспечивающая максимальный выход кокса при нагреве [1–3]. При этом важной регламентируемой характеристикой служит доля ФФС в композиционном материале, выбираемая в интервале 35...37 %.

Наиболее распространенным связующим для пропитки теплозащитного покрытия (ТЗП) является бакелитовый лак ЛБС-4, содержащий в массовых долях 55 % ФФС, 8,5 % фенола и 36,5 % водного раствора спирта (спирт — 31,5 %, вода — 5 %), который снижает вязкость ФФС и повышает производительность пропитки. В объемных долях состав лака следующий: ФФС — $q_{\text{ФФС}} = 46,5\%$; фенол — $q_{\text{ф}} = 8,05\%$; водный раствор спирта — $q_{\text{в.р.сп}} = 45,45\%$ (спирт — 40,45 %, вода — 5 %). Сумма долей фенола и водного раствора спирта представляет собой максимальную долю удаляемых из связующего компонент, называемых летучими компонентами (ЛК): $q_{\text{ЛК}} = q_{\text{ф}} + q_{\text{в.р.сп}}$.

Наличие спирта в лаке создает две проблемы: за одну пропитку сложно обеспечить требуемую долю ФФС и равномерность распределения, так как объем межволоконного про-

странства вязально-прошивного полотна составляет 50 %; при сушке лака в нем появляются поры, объем которых соответствует объему ЛК. Одним из эффективных способов компенсации этого недостатка является многократное повторение циклов пропитка–сушка препрега ТЗП (многократная пропитка–сушка). В технологическом процессе используется вакуумная сушка при температуре $T \leq 50^\circ\text{C}$, что предотвращает дополнительную проблему — полимеризацию лака ЛБС-4 при большей температуре и резкое снижение вязкости [4–7].

В качестве базовой рассмотрим вакуумную поперечную пропитку [8–10], производительность которой в 30 раз выше, чем у классической капиллярной пропитки под действием сил поверхностного натяжения [11–13]. Схема установки для принудительной поперечной пропитки ТЗП СКА при создании перепада давления в заготовке комбинированным способом приведена на рис. 1.

Эмпирические рекомендации предлагают не менее трех циклов пропитка–сушка и последующую автоклавную обработку по схеме, представленной на рис. 2. Рекомендуемые режимы пропитки: давление в емкости 10 — 760 мм рт. ст., давление после вакуумирования в пропиточной камере 2 — 100 мм рт. ст., время пропитки — 24 ч.

Цель работы — обоснование технологических режимов для достижения требуемой доли ФФС в материале ТЗП путем многократной пропитки–сушки и последующей автоклавной обработки, которые обеспечат сокращение времени изготовления ТЗП.

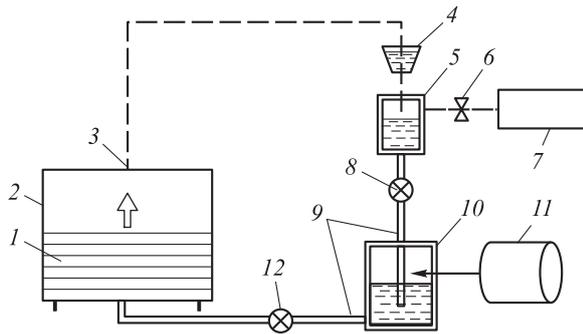


Рис. 1. Схема установки для принудительной поперечной пропитки ТЗП СКА при создании перепада давления в заготовке комбинированным способом:

1 — заготовка; 2 — пропиточная камера; 3 — вакуумная линия; 4 — индикатор; 5 — сборник; 6, 8, 12 — вентили; 7 — вакуумный насос; 9 — трубопровод; 10 — емкость для связующего; 11 — баллон

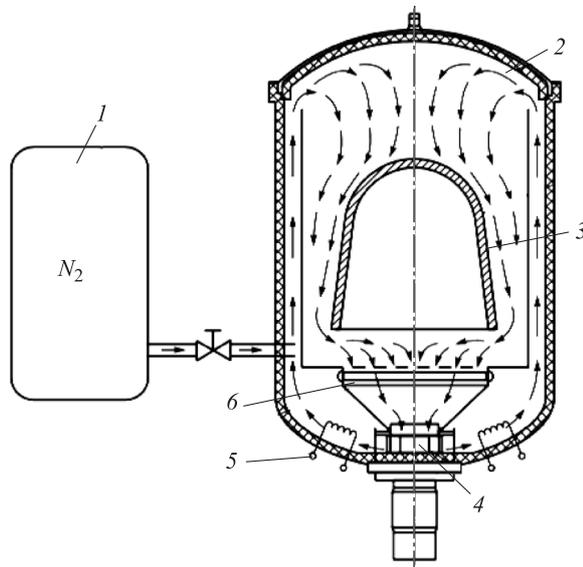


Рис. 2. Схема нагрева заготовки и движения азота в реакционной камере автоклава:

1 — ресивер; 2 — реакционная камера; 3 — заготовка теплозащиты СКА; 4 — вентилятор; 5 — термоэлектрический нагреватель; 6 — теплообменник

Как было указано ранее, постепенное ступенчатое увеличение доли ФФС достигается повторением процесса заполнения пор межволоконного пространства лаком при пропитке и образованием пор в меньшем количестве при вакуумной сушке. Заключительной стадией изготовления ТЗП является автоклавная обработка, при которой совмещаются два процесса: окончательное удаление ЛК в результате температурного воздействия; создание беспористой структуры композиционного материала путем обжата препрега давлением азота и вытеснение излишков ФФС.

Оценим допустимое содержание ЛК в связующем перед автоклавной обработкой. Пористая структура пропитываемой заготовки вязально-прошивного полотна характеризуется начальной пористостью Π_0 , которая равна доле объема пор в объеме заготовки. Перед пропиткой объемы наполнителя и пор приблизительно равны, т. е. в единице объема заготовки объем пор $V_{\text{пор}} = \Pi_0$, а объем наполнителя $V_{\text{нап}} = 1 - \Pi_0 \approx \Pi_0$. После первой пропитки поры заполняются лаком ЛБС-4, т. е. $V_{\text{св}} = \Pi_0$.

После автоклавной обработки освобождается объем $V_{\text{ЛК}} = V_{\text{св}} q_{\text{ЛК}n}$, где $q_{\text{ЛК}n}$ — доля ЛК после n пропиток, а после обжата препрега давлением азота объем оставшейся ФФС уменьшится на то же значение: $V_{\text{ФФС}} = V_{\text{св}} - V_{\text{ЛК}} = V_{\text{св}}(1 - q_{\text{ЛК}n})$.

Окончательно для оценки долей наполнителя и ФФС в готовом ТЗП получим соответствующие соотношения

$$\eta_{\text{нап}} = \frac{1}{1 + \frac{V_{\text{св}}}{V_{\text{нап}}}(1 - q_{\text{ЛК}n})};$$

$$\eta_{\text{ФФС}} = \frac{\frac{V_{\text{св}}}{V_{\text{нап}}}(1 - q_{\text{ЛК}n})}{1 + \frac{V_{\text{св}}}{V_{\text{нап}}}(1 - q_{\text{ЛК}n})}.$$

С учетом того, что $V_{\text{св}}/V_{\text{нап}} \approx 1$, эти выражения принимают вид

$$\eta_{\text{нап}} \approx \frac{1}{2 - q_{\text{ЛК}n}}; \quad \eta_{\text{ФФС}} = \frac{1 - q_{\text{ЛК}n}}{2 - q_{\text{ЛК}n}}.$$

Последнюю формулу можно использовать для определения допустимого количества ФФС перед автоклавным формованием:

$$q_{\text{ЛК}n} = \frac{1 - 2\eta_{\text{ФФС}}}{1 - \eta_{\text{ФФС}}}. \quad (1)$$

При подстановке требования к содержанию ФФС в ТЗП получим интервал допустимых значений содержания ЛК $q_{\text{ЛК}n} = 0,4127 \dots 0,4615$ перед автоклавной обработкой. Для обеспечения надежности пропитки при оценке содержания ФФС в ТЗП потребуем, чтобы перед автоклавной обработкой $q_{\text{ЛК}n} = 20\%$, т. е. ЛК должно быть более чем в 2 раза меньше допустимого значения, рассчитанного по формуле (1).

Рассмотрим путь увеличения доли ФФС в исходном объеме межволоконного пространства путем многократных циклов пропитка-сушка, в процессе которых оно разделяется на

области (слои). После первой пропитки лак заполняет всю область, незанятую наполнителем. После сушки образуются поры, поверхность которых и ограничивает первую область. После повторной пропитки и сушки вновь образуются поры, их поверхность ограничивает очередную область. В дальнейшем процесс может многократно повторяться.

Воспользуемся методом индукции для описания динамики изменения структуры и состава лака в межволоконном пространстве исходной заготовки при многократных пропитках и сушках. Объем пор и характер накопления ФФС зависит от того, какая часть ЛК w удаляется при сушке каждой из областей межволоконного пространства. При этом динамику удаления можно представить как

$$w = 1 - e^{-\alpha t_s},$$

где α — параметр, характеризующий интенсивность удаления ЛК; t_s — время сушки; αt_s назовем приведенным временем сушки.

В разных областях время сушки неодинаковое и зависит от их индекса. Так, для i -й области после j -й сушки удаленная часть ЛК

$$w_{ij} = 1 - \exp(-\alpha t_{ij}) = 1 - (1 - w)^{j-i+1} \quad (j-i+1 \geq 1),$$

а приведенное время сушки

$$\alpha t_{ij} = \ln \frac{1}{(1-w)^{j-i+1}}. \quad (2)$$

В соответствии с методом индукции после первого цикла пропитка-сушка исходная пористость Π_0 исчезает вследствие заполнения связующим, а в процессе сушки часть ЛК $w_{11} = w$ от их общей доли q удаляется. В результате образуется пористость $\Pi_1 = \Pi_0 q w$, а также область жидкого остатка объемом $V_{ж1} = \Pi_0 (1 - q w)$. В области 1 концентрации ФФС и фенола увеличиваются до $q_{ФФС11} = q_{ФФС} / (1 - q w)$ и $q_{ф11} = q_{ф} / (1 - q w)$, а доля ЛК уменьшается до $q_{ЛК11} = q(1 - w)$.

Во втором цикле пропитка-сушка пористость Π_1 также исчезает за счет заполнения связующим, а в процессе сушки часть ЛК $w_{21} = w$ от их общей доли q удаляется. В итоге появляется пористость $\Pi_2 = \Pi_1 q w = \Pi_0 (q w)^2$, а также область жидкого остатка объемом $V_{ж2} = \Pi_1 (1 - q w)$. В области 2 концентрации ФФС и фенола возрастают до $q_{ФФС21} = q_{ФФС} / (1 - q w)$ и $q_{ф21} = q_{ф} / (1 - q w)$, а доля ЛК снижается до $q_{ЛК21} = q(1 - w)$.

Однако поскольку при второй сушке из области 1 продолжают удаляться ЛК, доля удаленных ЛК составляет $w_{12} = 1 - (1 - w)^2$. В области 1 концентрации ФФС и фенола возрастают до

$$q_{ФФС12} = \frac{q_{ФФС}}{1 - q [1 - (1 - w)^2]}$$

и

$$q_{ф12} = \frac{q_{ф}}{1 - q [1 - (1 - w)^2]},$$

а доля ЛК уменьшается до $q_{ЛК12} = q(1 - w)^2$.

Согласно методу индукции, для произвольной i -й области и j -й пропитки можно записать следующие соотношения. Часть ЛК, удаленных от их общей доли q , определяется выражением $w_{ij} = 1 - (1 - w)^{j-i+1}$. Вновь образуются пористость $\Pi_j = \Pi_{j-1} q w = \Pi_0 (q w)^j$ и область жидкого остатка объемом $V_{жi} = \Pi_0 (q w)^{i-1} (1 - q w)$. В i -й области после j -й сушки концентрации ФФС и фенола возрастают до

$$q_{ФФСij} = \frac{q_{ФФС}}{1 - q [1 - (1 - w)^{j-i+1}]}$$

и

$$q_{фij} = \frac{q_{ф}}{1 - q [1 - (1 - w)^{j-i+1}]},$$

а доля ЛК падает до $q_{ЛКij} = q(1 - w)^{j-i+1}$.

Окончательно формулы для расчета средних значений содержания ФФС и ЛК после n пропиток и сушек примут вид

$$q_{ФФСn} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{жi} q_{ФФСij}}{\sum_{i=1}^n V_{жi}}; \quad q_{ЛКn} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{жi} q_{ЛКij}}{\sum_{i=1}^n V_{жi}},$$

где i и j — номера области и пропитки, $i = n + 1 - j$, $j - i + 1 = 2j - n$; $V_{жi}$ — объем i -й жидкой области; $q_{ФФСij}$ — доля ФФС в i -й жидкой области после j -й пропитки; $q_{ЛКij}$ — доля ЛК в i -й жидкой области после j -й пропитки.

Нижняя оценка содержания ЛК в межволоконном пространстве при повторении циклов пропитка-сушка приведена на рис. 3. Расчеты выполнены в предположении, что в процессе вакуумной сушки такие компоненты ЛК, как фенол и вода, не удаляются и остаются до автоклавной обработки. Анализ результатов расчетов показал, что требования к наличию ЛК в препреге перед автоклавной обработкой при одной пропитке выполняются в очень узком диапазоне изменения w , при двух — в ограни-

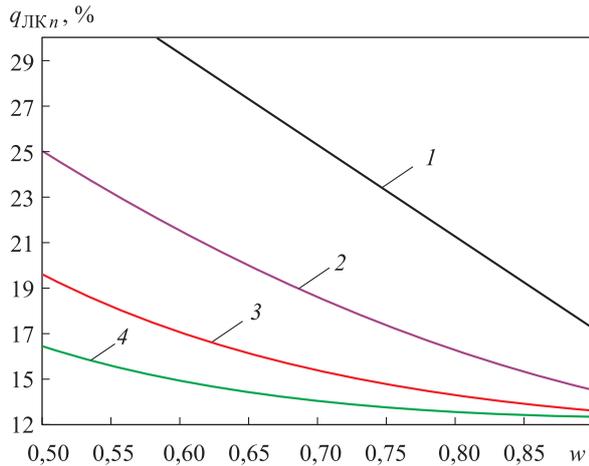


Рис. 3. Зависимость остаточной доли ЛК $q_{ЛКn}$ лака ЛБС-4 перед автоклавной обработкой от доли w удаляемых при сушке ЛК после одной (1), двух (2), трех (3) и четырех (4) пропиток

ченном и только при трех — во всем диапазоне изменения w .

Установленная закономерность важна при назначении технологических режимов заполнения фенольно-формальдегидной смолой пространства пор заготовки ТЗП.

Продемонстрируем применение диаграммы, приведенной на рис. 3, при проектировании операции пропитки в технологическом процессе изготовления ТЗП для заготовки, представляющей собой вязально-прошивное полотно толщиной 40 мм с исходной пористостью $\Pi_0 = 50\%$. Будем считать, что при пропитке заготовка расположена в кассете на сетке. Подача лака осуществляется через 9 штуцеров (3 ряда по 3 штуцера), расстояние между которыми составляет 640 мм. Тогда максимальный путь движения лака соответствует диагонали и равен 450 мм.

В основе оценки времени пропитки заготовки $t_{прn}$ лежит закон Дарси [14–16], описывающий движение вязкой жидкости в пористых материалах:

$$t_{прn} = \frac{\eta \delta l (1 - \Pi_{n-1})^2}{C \Delta p d^2 \Pi_{n-1}^2},$$

где η — вязкость связующего; δ — толщина заготовки; l — фактический путь движения связующего вдоль полотна; Π_{n-1} — пористость препрега перед n -й пропиткой; C — коэффициент пропорциональности в уравнении Дарси; Δp — перепад давления, определяющий движение жидкости в поровом пространстве заготовки, принятый равным 0,08 МПа; d — диа-

метр волокон, между которыми движется вязкая жидкость.

Преобразуем это уравнение к виду

$$t_{прn} = \frac{K^o (1 - \Pi_{n-1})^2 l}{d^2 \Pi_{n-1}^2 \delta},$$

где K^o — обобщенный коэффициент для расчета времени пропитки, $K^o = 1881,378$ мин·мм².

Во время пропитки параллельно происходят два процесса — пропитка пор между нитями и пор в нитях, т. е. заполнение пор между волокнами нитей. Поскольку диаметр нитей на порядок больше диаметра волокон, которых в нитях примерно 100...200 шт., а пористость в нитях составляет около 30%, второй процесс будет более продолжительным. Поэтому анализ времени пропитки начнем со второго процесса.

Используя полученные выше рекуррентные соотношения, проведем нижнюю оценку пористости (рис. 4) и времени пропитки нитей (рис. 5). Изменение ЛК демонстрирует рис. 3.

При расчетах учитывалось, что уменьшение доли ЛК в связующем приводит к его сгущению, что в конечном итоге усложняет процесс

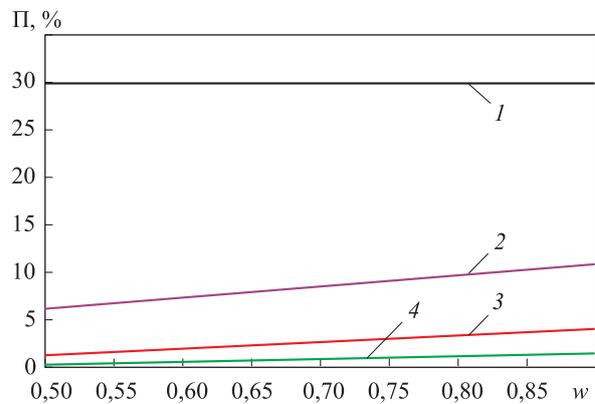


Рис. 4. Зависимость пористости в нитях Π от доли w удаляемых при сушке ЛК после одной (1), двух (2), трех (3) и четырех (4) пропиток

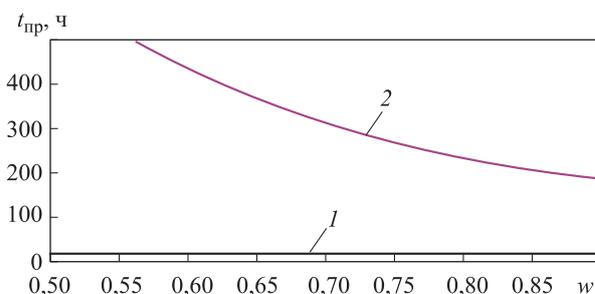


Рис. 5. Зависимость времени пропитки $t_{пр}$ нитей от доли w удаляемых при сушке ЛК после одной (1) и двух (2) пропиток

течения вязкой жидкости через остаточные поры. Если трактовать это явление как увеличение эквивалентного диаметра волокон, то для него можно предложить зависимость

$$d_{эф} = d \left(\sqrt{1 + \frac{\Pi_{n-1}}{1 - \Pi_{n-1}} (1 - qw)} \right)^{n-1},$$

где n — число предшествующих сушек.

Динамика роста эквивалентного диаметра волокон показана на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что время второй пропитки нитей выходит за разумные границы, поэтому следует ограничиться одной пропиткой. В этом случае время первой пропитки, при которой происходит заполнение пор в нитях, составляет 19,2 ч.

Сравнение с приведенными выше результатами динамики пропитки межнитяного пространства, представленной на рис. 7, показало, что время пропитки пространства между нитями значительно меньше, чем время пропитки нитей.

Общее время сушки с использованием формулы (2) зависит от числа пропиток и доли удаляемых ЛК (рис. 8, а).

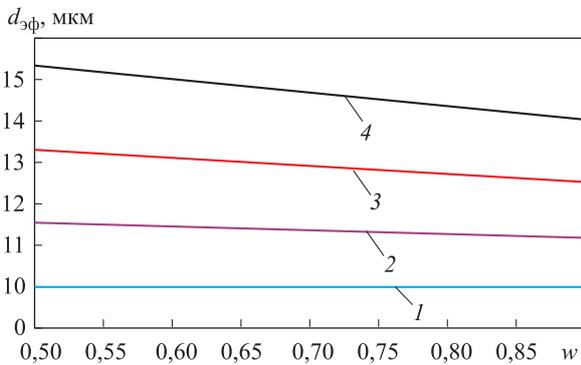


Рис. 6. Зависимость эквивалентного диаметра $d_{эф}$ волокон от доли w удаляемых при сушке ЛК после одной (1), двух (2), трех (3) и четырех (4) пропиток

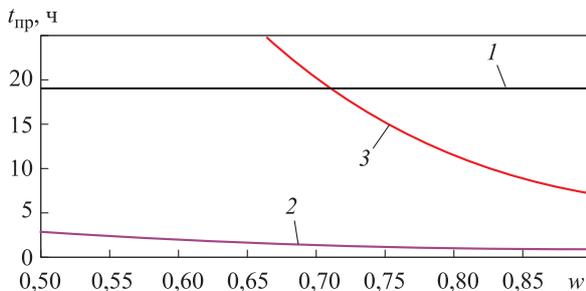


Рис. 7. Зависимость времени пропитки $t_{пр}$ межнитяного пространства от доли w удаляемых при сушке ЛК после одной (1), двух (2) и трех (3) пропиток

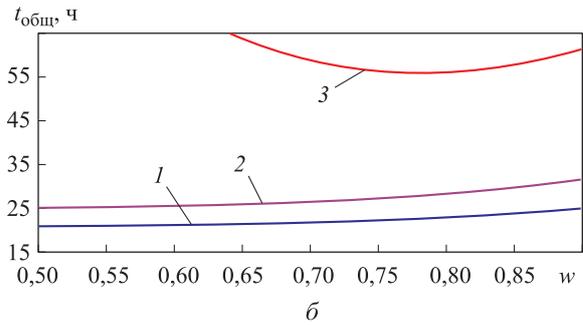
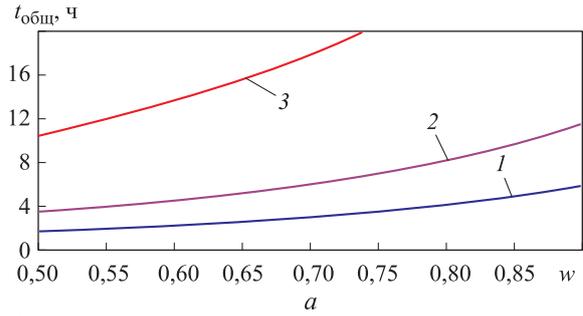


Рис. 8. Зависимости общего времени $t_{общ}$ циклов сушка (а) и пропитка-сушка (б) от доли удаляемых ЛК w после одной (1), двух (2) и трех (3) пропиток

Анализ результатов расчета общего времени многократной пропитки-сушки (рис. 8, б) показал, что его минимальное значение соответствует одной пропитке. Однако надежность этого процесса невелика. С ростом числа пропиток увеличивается надежность, а также время процесса, которое при трехкратной пропитке имеет минимум, соответствующий доле удаляемых при сушке ЛК $w = 0,75$.

Выводы

1. Соблюдение сформулированного в работе требования к допустимому содержанию ЛК перед автоклавным формованием обеспечивает необходимое функционирование тепловой защиты.

2. Построена математическая модель расчета содержания ФФС и ЛК в препреге при увеличении числа циклов пропитки наполнителя связующим и последующей вакуумной сушки.

3. Показано, что для обеспечения необходимого содержания ФФС в готовом изделии и однородности структуры теплозащитного материала целесообразно применять трехкратную пропитку.

4. Определены технологические режимы повторяющихся циклов пропитка-сушка, которые обеспечат минимальное время изготовления теплозащиты СКА.

Литература

- [1] Семенов А.А. *Спускаемая капсула космического аппарата*. Санкт-Петербург, Нева, 2009. 72 с.
- [2] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б., Лыков А.В., ред. *Тепловая защита*. Москва, Энергия, 1976. 392 с.
- [3] Suong V.H. *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*. Lancaster, Pennsylvania, DEStech Publications Inc., 2009. 352 p.
- [4] Тарасов В.А., Беляков Е.В. Математическое моделирование процесса неизотермического отверждения полимерных композитных конструкций РКТ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 1, с. 113–120.
- [5] Тарасов В.А., Боярская Р.В., Илюхина А.А., Карягин А.А., Кудрявцев А.А. Исследование перспектив ультразвуковой интенсификации процесса пропитки бакелитовым лаком ЛБС-4 пористых стеклопакетов. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2016, № 9, с. 10–14.
- [6] Жилин А.А., Федоров А.В. Физико-математическое моделирование процессов капиллярной пропитки пористых материалов. *Прикладная механика и техническая физика*, 2009, т. 50, № 1, с. 42–51.
- [7] Senoguz M.T., Dungan F.D., Sastry A.M., Klamo J.T. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part II – the Variable Gap Model and Prediction of Permeability. *Journal of composite materials*, 2001, vol. 35, no. 14, pp. 1258–1322.
- [8] Глебов И.В., Котенко В.Д., Романенков В.А. Математическая модель многократной пропитки пористых тел растворами полимеров. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 11, с. 238–252. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/820714.html> (дата обращения 15 июля 2017).
- [9] Ferland P., Guittard D., Trochu F. Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding. *Polymer composites*, 1996, vol. 17, no. 1, pp. 149–158.
- [10] Кузнецова Л.Н., Романенкова Е.И., Романенков В.А., Стрекалов А.Ф., Абраумов В.В., Пащенко В.А., Котенко В.Д., Сапожников И.В., Глебов И.В. *Способ изготовления препрега с автоматическим контролем технологического процесса*. Пат. № 2565709 РФ, 2015, бюл. № 29, 11 с.
- [11] Нелюб В.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П., Малышева Г.В. Капиллярная гидродинамика олигомерных связующих. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2016, № 3, с. 43–48.
- [12] Бородулин А.С., Марычева А.Н., Малышева Г.В. Моделирование кинетики процессов пропитки тканых наполнителей при производстве изделий из стеклопластиков. *Физика и химия стекла*, 2015, т. 41, № 6, с. 892–898.
- [13] Бородулин А.С., Малышева Г.В., Романова И.К. Оптимизация реологических свойств связующих, используемых при формовании изделий из стеклопластиков методом вакуумной инфузии. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2015, № 3, с. 40–44.
- [14] Беляев А.Ю. *Усреднение в задачах теории фильтрации*. Москва, Наука, 2004. 200 с.
- [15] Parnas R., Flynn K., Dal-Favero M. A permeability Database for Composite Manufacturing. *Polymer Composites*, 1997, vol. 18, no. 5, pp. 623–633.
- [16] Komkov M.A., Tarasov V.A., Kuznetsov V.M. The influence of epoxide resin viscosity on impregnation of fiber reinforcement. *Polymer Science. Series D*, 2015, vol. 8, is. 4, pp. 292–295, doi: 10.1134/S1995421215040073.

References

- [1] Semenov A.A. *Spuskaemaia kapsula kosmicheskogo apparata* [Landing capsule of the spacecraft]. Sankt-Petersburg, Neva publ., 2009. 72 p.
- [2] *Teplovaia zashchita* [Thermal protection]. Ed. Polezhaev Iu.V., Iurevich F.B., Lykov A.V. Moscow, Energiia publ., 1976. 392 p.

- [3] Suong V.H. *Principles of the Manufacturing of Composite Materials*. Lancaster, Pennsylvania, DEStech Publications Inc., 2009. 352 p.
- [4] Tarasov V.A., Beliakov E.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa neizotermicheskogo otverzhdeniia polimernykh kompozitnykh konstruksii RKT [Mathematical Simulation of Nonisothermal Hardening of Polymeric Composite Structures of Rocket and Space Machinery]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering]. 2011, no. 1, pp. 113–120.
- [5] Tarasov V.A., Boiarskaia R.V., Iliukhina A.A., Kariagin A.A., Kudriavtsev A.A. Issledovanie perspektiv ul'trazvukovoi intensivatsii protsessa propitki bakelitovym lakom LBS-4 poristykh steklopaketov [A study on the prospects of ultrasonic intensification of the process of impregnation with bakelite varnish LBS-4 porous glass]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik* [Polymer Science. Series D]. 2016, no. 9, pp. 10–14.
- [6] Zhilin A.A., Fedorov A.V. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie protsessov kapilliarnoi propitki poristykh materialov [Physico-mathematical modeling of processes of capillary impregnation of porous materials]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2009, vol. 50, no. 1, pp. 42–51.
- [7] Senoguz M.T., Dungan F.D., Sastry A.M., Klamo J.T. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part II — the Variable Gap Model and Prediction of Permeability. *Journal of composite materials*, 2001, vol. 35, no. 14, pp. 1258–1322.
- [8] Glebov I.V., Kotenko V.D., Romanenkov V.A. Matematicheskaiia model' mnogokratnoi propitki poristykh tel rastvorami polimerov [A Mathematical Model of Repeated Impregnation of Porous Bodies with Solutions of Polymers]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of Bauman MSTU]. 2015, no. 11, pp. 238–252. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/820714.html> (accessed 15 June 2017).
- [9] Ferland P., Guittard D., Trochu F. Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding. *Polymer composites*, 1996, vol. 17, no. 1, pp. 149–158.
- [10] Romanenkov V.A., Strekalov A.F., Pashchenko V.A., Kuznetsova L.N., Romanenkova E.I., Kotenko V.D., Abrazumov V.V., Sapozhnikov I.V., Glebov I.V. *Sposob izgotovleniia preprega s avtomaticheskim kontrolem tekhnologicheskogo protsessa* [A method of manufacturing a prepreg with automatic process control]. Patent RF no. 2565709, 2015. 11 p.
- [11] Neliub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., Malysheva G.V. Kapilliarnaia gidrodinamika oligomernykh sviazuiushchikh [Capillary hydrodynamics of oligomeric binder]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik* [Polymer Science. Series D]. 2016, no. 3, pp. 43–48.
- [12] Borodulin A.S., Marycheva A.N., Malysheva G.V. Simulation of impregnation kinetics of fabric fillers in the production of fiberglass articles. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 660–664.
- [13] Borodulin A.S., Malysheva G.V., Romanova I.K. Optimization of rheological properties of binders used in vacuum assisted resin transfer molding of fiberglass. *Polymer Science. Series D*, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 300–303.
- [14] Beliaev A.Iu. *Usrednenie v zadachakh teorii fil'tratsii* [Averaging in problems of filtration theory]. Moscow, Nauka publ., 2004. 200 p.
- [15] Parnas R., Flynn K., Dal-Favero M. A permeability Database for Composite Manufacturing. *Polymer Composites*, 1997, vol. 18, no. 5, pp. 623–633.
- [16] Komkov M.A., Tarasov V.A., Kuznetsov V.M. The influence of epoxide resin viscosity on impregnation of fiber reinforcement. *Polymer Science. Series D*, 2015, vol. 8, is. 4, pp. 292–295, doi: 10.1134/S1995421215040073.

Статья поступила в редакцию 12.09.2017

Информация об авторах

НЕЛЮБ Владимир Александрович (Москва) — кандидат технических наук, директор межотраслевого инженерингового центра «Композиты России». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Vladimir_Nelub.mail@emtc.ru).

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

РОМАНЕНКОВ Владимир Алексеевич (Москва) — главный химик. ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 4А, e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru).

КОМКОВ Михаил Андреевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

БОЯРСКАЯ Раиса Владимировна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: brv152@mail.ru).

Information about the authors

NELYUB Vladimir Aleksandrovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Director, Interindustry Engineering Centre Composites of Russia. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Vladimir_Nelub.mail@emtc.ru).

TARASOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

ROMANENKOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Chief Chemist. ZAO Experimental Machine-Building Plant, S.P. Korolev Space and Rocket Corporation Energia (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4A, e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru).

KOMKOV Mikhail Andreevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: m_komkov@list.ru).

BOYARSKAYA Raisa Vladimirovna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: brv152@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание монографии
под редакцией **А.С. Бугаева, С.И. Ивашова**
«Биорадиолокация»

Освещены вопросы радиолокации биологических объектов (биорадиолокации) — метода, который может быть использован для обнаружения живых людей, находящихся за преградами, и дистанционного определения параметров их дыхания и сердцебиения. Биорадиолокация может найти применение в различных областях: спасательных операциях, антитеррористической борьбе, медицине и др. Описаны физические основы процесса биорадиолокации, особенности биорадиолокаторов с непрерывным и импульсным зондирующими сигналами, а также методы расчета и моделирования процессов в биорадиолокации.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru