

УДК 678.026.2:678.067.2

Технологические основы снижения длительности цикла и повышения безопасности изготовления тепловой защиты спускаемых космических аппаратов*

В.А. Тарасов¹, В.А. Романенков², М.А. Комков¹¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.² ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, Ленина ул., д. 4А.

Technological principles of reducing the cycle time and improving the manufacturing safety of the thermal protection system for spacecraft reentry

V.A. Tarasov¹, V.A. Romanenkov², M.A. Komkov¹¹ Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.² S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energiya», Lenina str., 4A, 141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation.

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



Современное развитие пилотируемой космонавтики невозможно без надежной защиты космических кораблей и экипажа. Изложены основы технологии изготовления теплозащитного покрытия (ТЗП) спускаемых космических аппаратов (СКА) и обоснована необходимость осуществления многократной пропитки ТЗП. Представлен методический подход для оценки длительности цикла пропитки ТЗП связующим. Приведены соотношения для расчета времени пропитки, учитывающие пористость тканного наполнителя, вязкость фенолформальдегидного связующего, перепад давления на входе и выходе тракта пропитки и эффективный диаметр волокон наполнителя. Показано, что увеличение времени каждой последующей пропитки подчиняется экспоненциальной зависимости. Сформулированы две важные проблемы, требующие решения: снижение времени пропитки и обеспечение пожаробезопасности технологической операции сушки полуфабриката со спиртосодержащим связующим в автоклавном комплексе. Предложены инновационные пути сокращения длительности цикла пропитки ТЗП и повышения безопасности технологического процесса. В результате исследования установлено: 1) при модифицировании связующего углеродными нанотрубками следует ожидать существенного снижения вязкости и, как следствие, уменьшения длительности пропитки ТЗП; 2) использование автоклавного оборудования позволяет совместить на одном рабочем месте несколько операций и обеспечить бескислородный режим сушки, прессования стенки изделия и термообработки, что полностью исключает опасность возникновения пожаров.

Ключевые слова: спускаемые космические аппараты, теплозащитное покрытие, тканый наполнитель, фенолформальдегидное связующее, время пропитки пористого материала, модифицирование связующего углеродными нанотрубками, автоклавный комплекс.

* Материалы работы были представлены на 4-й Международной научной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» (Москва, 2013).

i The development of manned space flights is impossible without reliable protection of spacecraft and crew. The fundamentals of TPS technologies for reentry spacecraft (RSC) are discussed, and the necessity of multiple TPS impregnation is proved. A technical approach for estimating the cycle time of TPS impregnation by a binder is presented. Relationships are deduced to calculate the impregnation time taking into account the porosity of the woven phenol-formaldehyde filler, binder viscosity, the pressure drop at the inlet and outlet paths, and the effective diameter of the filler fibers. It is shown that the time of each subsequent impregnation changes exponentially. The two most important problems to be solved include the problem of reducing the impregnation time and the problem of ensuring fire safety during drying the preformed material containing alcohol in a complex autoclave. Innovative ways to reduce the impregnation cycle time and improve the technological process safety are proposed. The results of study prove that: 1) the modification of a binder by carbon nanotubes can cause a significant reduction in viscosity and, consequently, decrease the TPS impregnation time; 2) the use of the autoclave equipment makes it possible to combine several operations at one workplace and provide drying, pressing, and heating operations without oxygen, which completely eliminates the risk of fires.

Keywords: reentry spacecraft, thermal protection system, woven filler, phenol-formaldehyde binder, porous material impregnation time, modification of a binder by carbon nanotubes, complex autoclave.

Развитие пилотируемой космонавтики невозможно без решения проблемы тепловой защиты космических кораблей и экипажа при их возвращении на Землю. При вхождении в плотные слои атмосферы со скоростью 8...12 км/с давление и температура воздуха на поверхности спускаемых космических аппаратов (СКА) со стороны набегающего потока достигают высоких значений в результате адиабатического сжатия. Длительность приземления при возникающих тепловых потоках оказывается достаточной для деструкции любого из известных материалов — как конструкционных, так и теплоизолирующих. Поэтому в СКА применяется особая лобовая теплозащита абляционного типа [1–4].

Действие абляционной теплозащиты основано на протекании ряда физико-химических процессов. Интенсивный тепловой поток Q

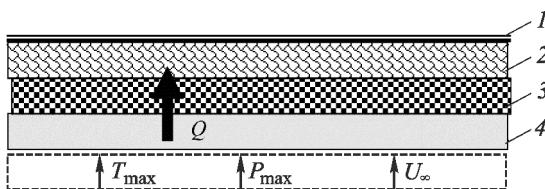


Рис. 1. Схема формирования областей влияния теплового воздействия на структуру и свойства теплозащитного материала:

1 — металлическая стенка СКА; 2 — слой исходного материала ТЗП; 3 — слой пиролиза связующего (выделения жидкой и газовой фазы) и образования обугленного остатка; 4 — жертвенный слой;

U_{∞} — скорость набегающего потока воздуха;

T_{\max} , P_{\max} — максимальные температура и давление, возникающие при адиабатическом сжатии набегающего потока воздуха в точке торможения; Q — тепловой поток

обуславливает формирование в материале теплозащитного покрытия (ТЗП) нескольких областей (рис. 1). В области 2 в направлении от конструктивной стенки 1 СКА материал выполняет функции теплоизоляции, поэтому он должен обладать низкой теплопроводностью.

Поскольку на материал ТЗП действует интенсивная силовая нагрузка, он должен иметь композиционную структуру, состоящую из наполнителя и матрицы (отвержденного связующего), и минимальную пористость. Волокнистый наполнитель представляет собой пакет сшитых по толщине заготовок из тканей на основе асбестовых, базальтовых, кварцевых или каолиновых волокон.

В области 3 при высокой температуре происходит процесс разложения высокомолекулярных полимеров матрицы с образованием летучих продуктов распада (низкомолекулярные газы) и обугленного остатка (кокса), который препятствует эрозионному уносу вещества в виде твердой, жидкой и газовой фазы с поверхности ТЗП. На протекание эндотермических реакций превращения (разложения) полимеров расходуется часть поступающего тепла. Кокс, в соответствии с законом Стефана–Больцмана, в процессе теплового излучения выполняет функции абсолютно черного тела. Использование матрицы теплозащитного материала (ТЗМ) абляционного типа на основе фенолформальдегидных и кремнийорганических терморезистивных связующих обеспечивает наиболее эффективный процесс коксообразования.

В области 4 при температуре свыше 2 500...2 600 К происходит отделение от сохрани-

няющего прочность раскаленного кокса газообразной, жидкой и твердой фаз, которые уносятся набегающим потоком атмосферного воздуха. Это так называемый жертвенный слой ТЗП СКА, который подвергается эрозионному уносу.

Таким образом, ТЗП СКА абляционного типа должны удовлетворять следующим требованиям:

1) связующее при разложении должно обеспечивать высокий выход кокса (до 65%);

2) ТЗМ должно обладать: минимальной теплопроводностью ($\lambda \leq 0,2$ Вт/(м·к)) и пористостью; достаточной вязкостью расплава связующего на уровне $\eta \cong 1,0$ Па·с; минимальной плотностью $\rho \leq 1,6$ кг/дм³; высокой эрозионной стойкостью $U_y \leq 0,1$ мм/с; невысокой стоимостью.

Цель работы — исследование технологических особенностей обеспечения требований к ТЗП СКА и определение перспектив дальнейшего совершенствования технологических процессов.

Основы технологии изготовления ТЗП СКА и роль многократной пропитки в обеспечении его качества. Технология производства теплозащиты для СКА была разработана ракетно-космической корпорацией (РКК) «Энергия» им. С.П. Королева, которая в настоящее время является единственной в стране организацией, владеющей и развивающей технологии создания тепловой защиты СКА для пилотируемых космических полетов.

За длительный период времени, начиная с полета Ю.А. Гагарина, РКК «Энергия» были освоены технологии термовакуумного формования, термокомпрессионного и прямого пресования, механической обработки теплозащитных экранов, а также оболочек шпангоутов, крышек, окантовок СКА из полимерно-волоконистых композиционных материалов (ПКМ) (рис. 2). Разработка теплозащитных покрытий (рис. 3) обеспечила высокое аэродинамическое качество и надежность спускаемого космического корабля «Союз». Накоплен также неоценимый опыт создания тепловой защиты СКА «Зонд», созданного для пилотируемых полетов на Луну и преодолевающего атмосферу Земли при возвращении со второй космической скоростью.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований были обобщены в совместных трудах специалистов РКК «Энергия» им. С.П. Королева и МГТУ им. Н.Э. Баумана [1–8], включая вопросы применения автоклавного

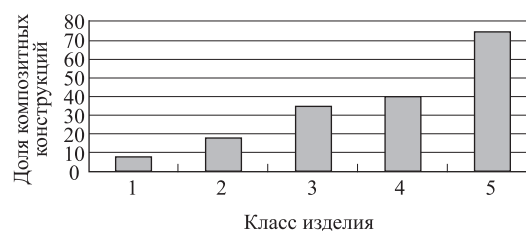


Рис. 2. Доля композитных конструкций в изделиях РКК «Энергия» им. С.П. Королева:

1 — космический аппарат «Союз»; 2 — многоуровневая транспортная космическая система «Энергия-Буран»; 3 — спутники связи и дистанционного зондирования Земли; 4 — пилотируемый космический корабль нового поколения; 5 — трансформируемая космическая антенна

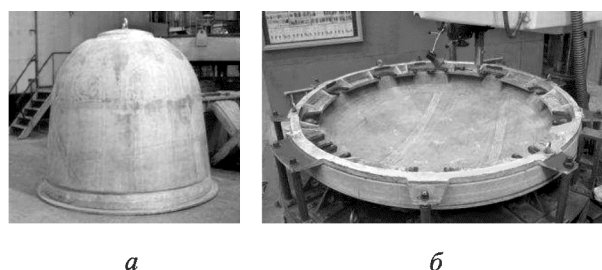


Рис. 3. Теплозащитная оболочка корпуса СКА (а) и лобовой теплозащитный экран (б)

оборудования для баротермического формования крупногабаритных конструкций из ПКМ в бескислородной среде. По техническим параметрам созданный уникальный автоклавный комплекс ЗАО «ЗЭМ РКК «Энергия» для баротермического и термовакуумного формования крупногабаритных конструкций из ПКМ не имеет равных в мире.

Основным направлением формирования беспористой структуры материала ТЗП СКА в настоящее время является многократное чередование комбинации технологических операций пропитки связующим порового пространства между волокнами пакета тканых заготовок, последующей сушки, опрессовки и термообработки. Необходимость многократного чередования пропитки и сушки обусловлена тем, что фенолформальдегидное связующее приготовлено на спиртовой основе. В процессе сушки спиртовая основа испаряется, образуя меньший объем пор по сравнению с первоначальным объемом.

На практике применяется технология пропитки, представленная на упрощенной принципиальной схеме, приведенной на рис. 4.

Можно указать такую последовательность явлений, протекающих в процессе пропитки. Заготовка изделия 1, подлежащая пропитке, помещается в полость технологической оснастки 2, которая соединяется вакуумной линией 3

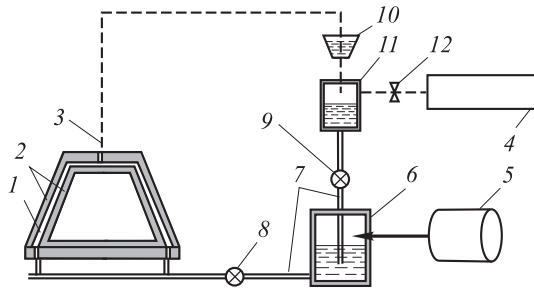


Рис. 4. Принципиальная схема установки для пропитки ТЗП СКА под давлением:
1 — заготовка; 2 — оснастка; 3 — вакуумная линия;
4 — вакуумный насос; 5 — баллон; 6 — емкость;
7 — трубопровод; 8, 9, 12 — вентили; 10 — индикатор;
11 — сборник

с вакуумным насосом 4. Насос вакуумирует поровое пространство в заготовке. Баллон 5 со сжатым газом создает в емкости 6 со связующим избыточное давление вытеснения. В результате связующее по трубопроводу 7 подается в поровое пространство заготовки при открытом вентиле 8. Для того чтобы предотвратить движение связующего в сборник излишков связующего 11 вентиль 9 закрыт. Процесс пропитки продолжается до тех пор пока в индикаторе 10 полного заполнения порового пространства не появится жидкое связующее. После этого вакуумный насос прекращает работать, открывается вентиль 12, обеспечивающий дренаж воздуха в вакуумированное пространство установки, закрывается вентиль 8 и открывается вентиль 9. Излишки из сборника 11 стекают в емкость связующего 6.

Далее выполняется термовакуумная сушка при температуре $T_{\text{суш}} = 50...60^\circ\text{C}$ и давлении $P_{\text{суш}} = 10...20$ кПа в течение $\tau_{\text{суш}} = 8...10$ ч, которая может осуществляться в камерной электровакуумной печи или автоклаве.

После окончательной пропитки полуфабрикат «одевается» на оправку и производится операция термообработки в течении 2–4 суток при температуре $T_{\text{т.о}} \approx 135^\circ\text{C}$ и давлениях $P_{\text{т.о}} = 0,2$ и 1 МПа соответственно для боковой стенки и лобового щита (с учетом времени подъема температуры и ее уменьшения до нормального значения длительность операции термообработки составляет 18 ч).

Методика оценки длительности пропитки наполнителя связующим и термообработки ТЗП СКА. Пропитка наполнителя ТЗП связующим для процесса движения жидкости в твердой среде с открытой пористостью математически описывается с помощью уравнения Дарси [9]:

$$q = \frac{K}{\eta_c} \frac{\Delta p}{l},$$

где q — объемный секундный расход жидкости через сечение единичной площади в твердой среде с открытой пористостью; K — коэффициент пропорциональности; η_c — вязкость жидкого связующего; Δp — перепад давлений внутри заполняемой жидкостью твердой среде с открытой пористостью; l — максимальная длина пути, проходящая жидкостью при заполнении порового пространства.

Коэффициент пропорциональности Козени-Кармана [10] рассчитывается по формуле

$$K = \frac{C}{\bar{l}} \frac{d_{\text{эф}}^2}{16} \frac{\Pi^3}{(1-\Pi)^2}, \quad (1)$$

где C — коэффициент для волокнистого наполнителя круглого сечения, $C \approx 0,5$; \bar{l} — коэффициент, учитывающий криволинейность пути движения жидкости в поровом пространстве, $\bar{l} = 1,2-1,25$; $d_{\text{эф}}$ — эффективный диаметр волокон; Π — пористость материала заготовки ТЗП СКА, $\Pi = 1 - \rho_3 / \rho_b$; ρ_b — плотность волокна; ρ_3 — средняя плотность материала заготовки.

На основании уравнения Дарси можно определить время пропитки пористого материала

$$\tau = \frac{\Pi \eta_c l^2}{2K \Delta p}. \quad (2)$$

Представленная математическая модель позволяет оценить длительность процесса пропитки и остаточную пористость после сушки. В качестве примера на рис. 5 представлены результаты расчета пористости и времени пропитки пакета тканых заготовок при следующих исходных данных: 1) наполнителем и связующим являются сухая ткань на основе стеклянных волокон и спиртовой раствор фенолформальдегидного связующего (содержание спирта в растворе принято равным 40 и 50 %); 2) размер заготовки ТЗП, подлежащей пропитке, $l = 800$ мм; перепад давления при пропитке по показаниям манометров $\Delta p_1 = 0,1$ МПа; вязкость раствора связующего при первой пропитке $\eta_c = 0,2$ Па·с (по показаниям вискозиметра ВЗ-1 $\eta_c \approx 15$ с); исходная пористость наполнителя $\Pi_1 = 0,40$; эффективный диаметр нити в стеклоткани $d_{\text{эф}} \approx 0,2$ мм (диаметр стеклонити из 200 элементарных волокон $d_b = 6...9$ мкм); коэффициент искривленности пути движения жидкости принимаем $\bar{l} = 1,25$. Исходные данные выбраны таким образом, чтобы содержание связующего в готовом мате-

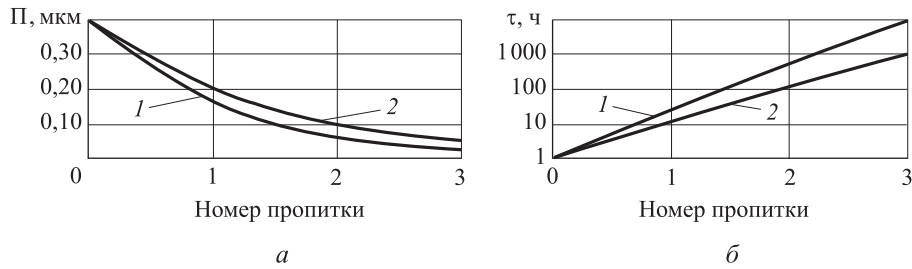


Рис. 5. Зависимости пористости и времени пропитки тканной заготовки связующим от номера операции пропитки и процентного содержания спирта в растворе связующего: 1 — 40 %; 2 — 80 %

риале ТЗП составляло 28...30 %, а содержание волокна в готовом материале ТЗП — $\vartheta_v = 67...70$ %.

Расчеты проведены в предположении, что при испарении спирта в матрице образуются поры. Объем остаточных пор равен содержанию спирта в растворе связующего.

На рисунке видно, что время пропитки подчиняется экспоненциальной зависимости.

В связи со сказанным выше особую остроту приобретает проблема снижения времени пропитки. Другой проблемой использования спиртосодержащих связующих является повышенная пожароопасность.

Инновационные направления сокращения длительности цикла пропитки ТЗП и повышения безопасности его технологического процесса. Улучшение технико-экономических показателей технологического процесса пропитки наполнителя связующим ТЗП СКА на основе модифицирования углеродными нанотрубками. Широкие перспективы совместного повышения механических свойств матрицы и технологичности жидкого связующего открывает его модифицирование углеродными нанодобавками: фуллеренами и нанотрубками. Уникальность механических и физических характеристик нанодобавок заключается в идеальной структуре пространственного расположения атомов углерода (графена) на сферической и цилиндрической поверхности [11–14]. Однослойные углеродные нанотрубки (УНТ) имеют прочность на растяжение 600...1 500 ГПа, модуль упругости 1 000...5 000 ГПа и предельную деформацию 20...30 %. Многослойные УНТ характеризуются более низкими свойствами: прочность на растяжение 300...600 ГПа и модуль упругости 300...1 000 ГПа при плотности 1,3...1,6 г/см³.

В работах [5–6] экспериментально исследовалось изменение вязкости полиэфирной нанокomпозиции на основе смолы В71731АL при

введении различного количества УНТ. Значение вязкости измерялось на вискозиметре ВЗ-4 (ГОСТ 9070–75). Результаты исследований представлены на рис. 6. Установлено снижение вязкости на 30 % при оптимальном содержании углеродных трубок фирмы «Таунит» [14].

Полученный результат позволяет предположить, что введение УНТ в бакелитовый лак уменьшит его вязкость, и тем самым, сократит длительность цикла пропитки.

В процессе подготовки образцов из полиэфирного нанокomпозита к испытаниям на растяжение и изгиб наносuspension обрабатывалась в вакуумной камере в течение нескольких минут, заливалась в формы и подвергалась дополнительно вибрационной обработке в течение 10...15 мин.

Результаты испытаний образцов полиэфирного связующего модифицированного многослойными УНТ показали заметное (~ на 30...60 %) повышение механических характеристик матрицы на растяжение и изгиб (рис. 7). При этом выявлено существование оптимальной доли (концентрации) УНТ в связующем, составляющей 0,005...0,015 %. Однако равномерное распределение УНТ по объему связующего вызывает значительные трудности в силу склонности нанотрубок к образованию агломератов.

Для однородного распределения наночастиц в объеме связующего в работе применялся ультразвуковой лабораторный диспергатор ЛУЗД-1,5/21-3,0 с компьютерным мониторингом

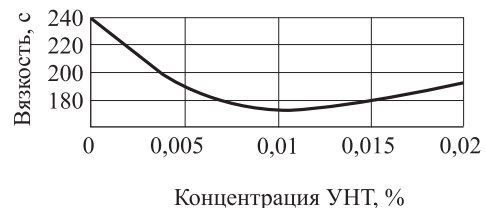


Рис. 6. Изменение вязкости наносuspension полиэфирной смолы с различным содержанием УНТ

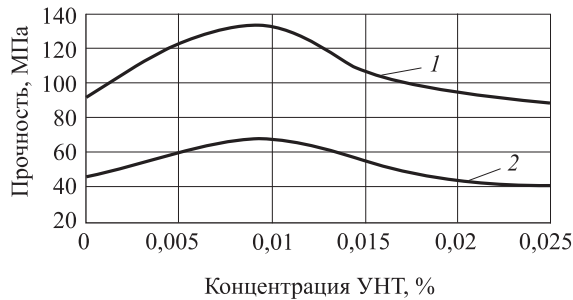


Рис. 7. Зависимость механических характеристик нанокompозита от концентрации УНТ:
1 — при сгибе; 2 — при растяжении

гом. Основные параметры установки с погруженным волноводом диаметром 35 мм: частота 21,7 кГц; амплитуда 25,5 мкм; мощность 1 500 Вт; интенсивность ультразвуковых колебаний в эксперименте 123 Вт/см²; объем связующего 1,5...2,0 л.

Разрушение агломератов из УНТ (диспергирование) сопровождается увеличением площади границы раздела фаз, а также проявлением других нелинейных эффектов воздействия ультразвука на вещество, например, дегазация связующего, разогрев, молекулярные преобразования и др.

Из анализа экспериментальных данных можно предположить, что максимальные механические характеристики достигаются именно тогда, когда после диспергирования все УНТ разделены между собой и вновь не соединяются друг с другом, не образуют под действием сил

Ван-дер-Ваальса новые агломераты. Этому условию соответствует расстояние между УНТ, превышающее длину нанотрубки.

Характеристика автоклавного оборудования для баротермического формования и термообработки элементов конструкции тепловой защиты СКА. Автоклавный комплекс — автономная автоматизированная система, объединяющая в единое целое теплоизолированный вертикальный сосуд высокого давления объемом 293 м³ с диаметром рабочего пространства 5,5 м и высотой 6 м, блоки нагревателя и охлаждения, станцию по производству сжатого до 3,5 МПа газообразного азота, азотную накопительную установку емкостью 300 м³, вакуумную станцию, блок водоподготовки с градирнями и агрегатом химической очистки трубопроводов, центр управления процессами и множество других устройств, необходимых для баротермического и термовакuumного формования любых композитов с полимерной матрицей (рис. 8).

Комплекс компактно размещен в отдельном сооружении, оснащенном контурами кондиционирования, вентилирования и мониторинга состояния воздушной среды, системами безопасности, транспортным оборудованием и другими необходимыми системами для ведения высокоэффективной и безопасной тепловой обработки материалов при высоких давлениях в бескислородной среде.

Особое внимание уделено созданию условий

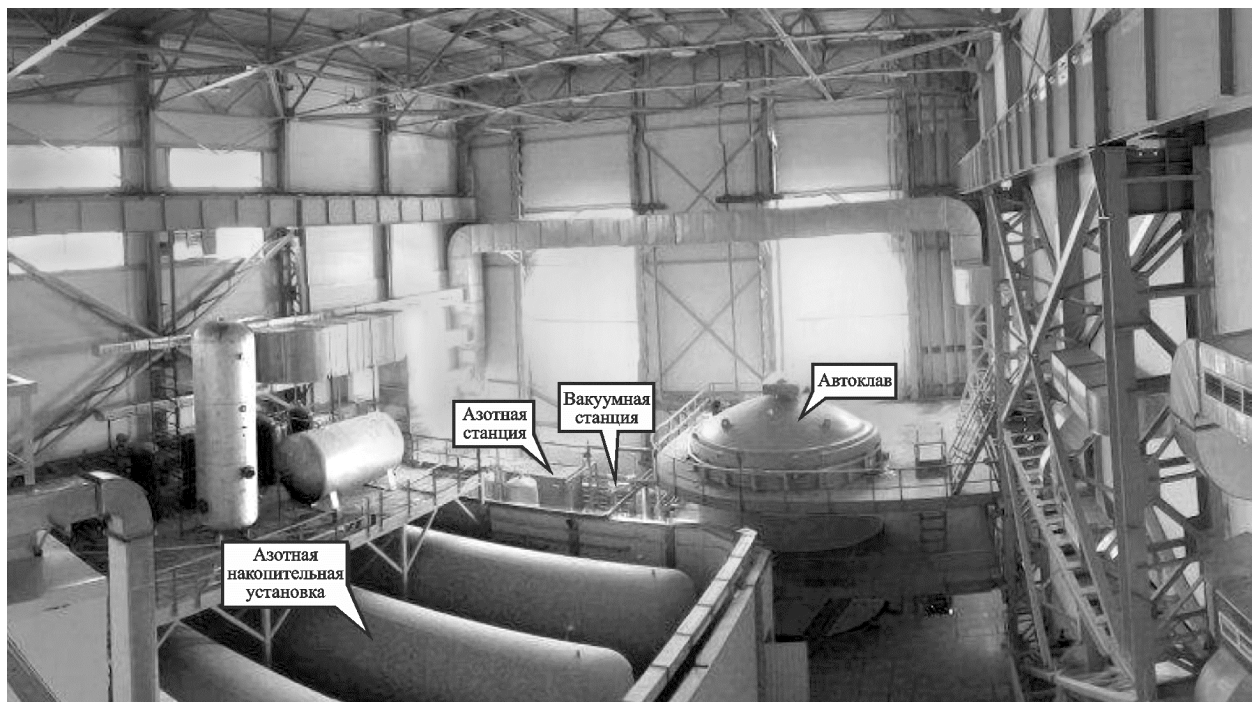


Рис. 8. Автоклавный комплекс для формообразования композитных конструкций СКА

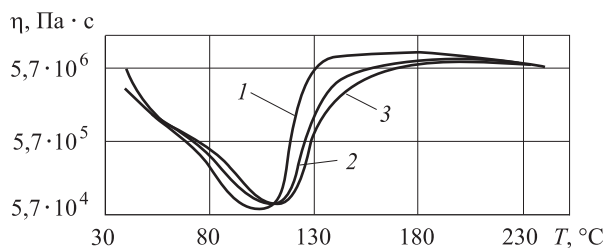


Рис. 9. Зависимость вязкости эпоксидного связующего ЭНФБ/3692 в препреге от температуры: 1 — 1 °C/мин; 2 — 2 °C/мин; 3 — 3 °C/мин

для обеспечения минимальных градиентов температур на изделиях при нагреве, термостабилизации и охлаждении, а также обеспечению равномерного распределения связующего в материале в процессе формирования сложноконтурных многослойных крупногабаритных объектов. Для достижения данного результата создана рециркуляционная система движения ламинарного потока теплоносителя с оптимальной ориентацией относительно поверхности изделия, обеспечивающей однородность температурного поля.

На базе комплекса была создана технология производства тепловой защиты транспортного корабля «Союз ТМА» в нейтральной среде, обеспечившая не только безопасность и устойчивость производства, но и повышение качества, надежности ТЗП, сокращение трудоемкости и расхода энергоресурсов.

Система управления автоклавного комплекса позволяет изменять давление и температуру по заданным программам управления $p(t)$ и $T(t)$, которые подбираются таким образом, чтобы на технологической операции опрессовки стенки ТЗП потребление сжатого азота было минимальным, а процесс вытеснения излишков связующего был согласован со сложной зависимостью [15, 16] вязкости отверждаемого свя-

зующего от температуры (рис. 9). Методика поиска вида программ $p(t)$ и $T(t)$ — сложная научная задача, математическая формализация которой требует отдельного детального обсуждения.

Выводы

1. Обоснована необходимость осуществления многократной пропитки ТЗП СКА.

2. Представлен методический подход для оценки длительности цикла пропитки ТЗП связующим. Предложенная методика расчета времени пропитки, учитывающая пористость полуфабриката, вязкость связующего, перепад давления на входе и выходе тракта пропитки и эффективный диаметр волокон наполнителя позволяет обоснованно назначать число повторений операции пропитки. Показано, что увеличение времени каждой последующей пропитки подчиняется экспоненциальной зависимости.

3. Сформулированы две важные проблемы, требующие решения: снижение времени пропитки и обеспечение пожаробезопасности технологической операции сушки полуфабриката со спиртосодержащим связующим.

4. Сформулированы инновационные пути сокращения длительности цикла пропитки ТЗП и повышения безопасности технологического процесса:

- при модифицировании связующего углеродными нанотрубками следует ожидать существенного уменьшения вязкости и снижение длительности пропитки ТЗП;
- использование автоклавного оборудования позволяет совместить на одном рабочем месте несколько операций и обеспечить бескислородный режим сушки, прессования стенки изделия и термообработки, что полностью исключает опасность возникновения пожаров.

Литература

- [1] Семенов А.А. *Спускаемая капсула космического аппарата*. Санкт-Петербург, Нева, 2009. 72 с.
- [2] Власов В.И., Залогин Г.Н., Ковалев Р.В., Чураков Д.А. Лучисто-конвективный теплообмен спускаемого аппарата с разрушаемой тепловой защитой. *Электронный журнал Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, URL: <http://chemphys.edu.ru/media/files/2012-12-26-001.pdf> (дата обращения 2 июня 2014).
- [3] Камалов В.С. *Производство космических аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1985. 280 с.
- [4] Буланов И.М., Воробей В.В. *Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
- [5] Тарасов В.А., Степанищев Н.А., Романенков В.А., Алямовский А.И. Повышение качества и технологичности полиэфирной матрицы композитных конструкций на базе ультразвукового наномодифицирования. *Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машино-*

- строение. Спец. вып. № 3, *Прогрессивные материалы, конструкции и технологии ракетно-космического машиностроения*, 2012, с. 166–174.
- [6] Тарасов В.А., Степанищев Н.А. Применение нанотехнологий для упрочнения полиэфирной матрицы композиционного материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения*, 2010, с. 207–216.
- [7] Стрекалов А.Ф., Пащенко В.А., Романенков В.А., Морокова Е.В., Базанов В. В., Зимовский А.В., Андриянов В.С., Старостин В.В., Тарасов В.А., Филимонов А.С. *Термовакuumная установка для обработки изделия (ий)*. Пат. RU № 2439455 С1, 2010, бюл. № 26, 9 с.
- [8] Стрекалов А.Ф., Пащенко В.А., Романенков В.А., Морокова Е.В., Базанов В.В., Зимовский А.В., Андриянов В.С., Старостин В.В., Тарасов В.А., Филимонов А.С. *Способ изготовления многослойных изделий*. Пат. RU № 2450921 С2, 2012. бюл. № 26, 9 с.
- [9] Леонтьев Н.Е. *Основы теории фильтрации*. Москва, Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009, 88 с.
- [10] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 431 с.
- [11] Дьячков П.Н. *Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения*. Москва, Бином, 2006. 293 с.
- [12] Раков Э.Г. *Нанотрубки и фуллерены*. Москва, Логос, 2006. 376 с.
- [13] Ray S.S., Bousmina M. *Polymer Nanocomposites and Their Applications*. American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, California, 2006, 600 p.
- [14] Ткачев А.Г., Шубин И.Н., Попов А.И. *Промышленные технологии и инновации. Оборудование для nanoиндустрии и технология его изготовления*. Тамбов, Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 132 с.
- [15] Буланов И.М., Смыслов В.И., Комков М.А., Кузнецов В.М. *Сосуды давления из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов*. Москва, ЦНИИ информации, 1985. 308 с.
- [16] 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(82), с. 106–116.

References

- [1] Semenov A.A. *Spuskaemaia kapsula kosmicheskogo apparata* [Entry capsule spacecraft]. St. Petersburg, Neva publ., 2009. 72 p.
- [2] Vlasov V.I., Zalogin G.N., Kovalev R.V., Churakov D.A. Luchisto-konvektivnyi teploobmen spuskaemogo apparata s razrushaemoi teplovoi zashchitой [Radiant-convective heat transfer from the lander destroyed thermal protection]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike* [Physico-chemical kinetics in gas dynamics]. 2012, vol. 13, issue 2, 17 с. Available at: <http://chemphys.edu.ru/media/files/2012-12-26-001.pdf> (accessed 2 June 2014).
- [3] Kamalov V.S. *Proizvodstvo kosmicheskikh apparatov* [Production spacecraft]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982. 280 p.
- [4] Bulanov I.M., Vorobei V.V. *Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktсий iz kompozitsionnykh materialov* [Missile technology and aerospace composite structures]. Moscow, Bauman Press, 1998. 516 p.
- [5] Tarasov V.A., Stepanishchev N.A., Romanenkov V.A., Aliamovskii A.I. Povyshenie kachestva i tekhnologichnosti poliefirnoi matritsy kompozitnykh konstruktсий na baze ul'trazvukovogo nanomodifitsirovaniya [Improving the quality and technology of polyester matrix composite structures based on ultrasonic nanomodifitsirovaniye]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. Special issue no. 3 Advanced Materials, design and technology of space-rocket engineering, 2012, pp. 166–174.
- [6] Tarasov V.A., Stepanishchev N.A. Primenenie nanotekhnologii dlia uprochneniya poliefirnoi matritsy kompozitsionnogo materiala [The application of nanotechnology to harden polyester matrix composite material]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. Special issue Actual problems of development of rocket and space technology and weapons systems, 2010, pp. 207–216.

- [7] Strekalov A.F., Pashchenko V.A., Romanenkov V.A., Morokova E.V., Bazanov V.V., Zimovskii A.V., Andriianov V.S., Starostin V.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. *Termovakuumnaya ustanovka dlia obrabotki izdeliia (ii)* [Thermal vacuum unit for processing the product (s)]. Patent RF no. 2439455, 2010.
- [8] Strekalov A.F., Pashchenko V.A., Romanenkov V.A., Morokova E.V., Bazanov V.V., Zimovskii A.V., Andriianov V.S., Starostin V.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. *Sposob izgotovleniia mnogosloinykh izdelii* [Method of manufacturing multilayer products]. Patent RF no. 2450921, 2012.
- [9] Leont'ev N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Fundamentals of the theory of filtration]. Moscow, TsPI pri mekhaniko-matematicheskome fakul'tete MGU publ., 2009. 88 p.
- [10] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiia namotki kompozitnykh konstruksii raket i sredstv porazheniia* [Winding technology of composite structures missiles and weapons]. Moscow, Bauman Press, 2011. 431 p.
- [11] D'iachkov P.N. *Uglerodnye nanotrubki: stroenie, svoistva, primeneniia* [Carbon nanotubes: structure, properties, applications]. Moscow, Binom publ., 2006. 293 p.
- [12] Rakov E.G. *Nanotrubki i fullereny* [Nanotubes and fullerenes]. Moscow, Logos publ., 2006. 376 p.
- [13] Ray S.S., Bousmina M. *Polymer Nanocomposites and Their Applications*. American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, California, 2006. 600 p.
- [14] Tkachev A.G., Shubin I.N., Popov A.I. *Promyshlennye tekhnologii i innovatsii. Oborudovanie dlia nanoindustrii i tekhnologiia ego izgotovleniia* [Industrial technology and innovation. Equipment for nanotechnology and its technology is]. Tambov, TSTU publ., 2010. 132 p.
- [15] Bulanov I.M., Smyslov V.I., Komkov M.A., Kuznetsov V.M. *Sosudy davleniia iz kompozitsionnykh materialov v konstruksiiakh letatel'nykh apparatov* [Pressure vessels made of composite materials in the construction of aircraft]. Moscow, TsNII informatsii publ., 1985. 308 p.
- [16] Tarasov V.A., Beliakov E.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa neizotermicheskogo otverzheniia 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. Mechanical Engineering]. 2011, no. 1(82), pp. 106–116.

Статья поступила в редакцию 17.06.2014

Информация об авторах

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «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, Ленина ул., 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).

Information about the authors

TARASOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

ROMANENKOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Chief Chemist of S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia» (Lenina str., 4A, 141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: Vladimir.Romanenkov@rsce.ru).

KOMKOV Mikhail Andreevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: komkov@sm.bmstu.ru).