

ОБЗОРЫ

OVERVIEWS

УДК 629.78

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ВЕРИФИКАЦИИ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА ВНУТРИ ГЕРМООТСЕКА

Н.Н. Ситников, И.А. Залетова, Р.Н. Ризаханов, В.И. Дубинин,
О.А. Лукьянова, Н.А. Матюшин, С.С. Игнатъев, Н.П. Тымко

Канд. техн. наук Н.Н. Ситников; И.А. Залетова; канд. физ.-мат. наук,
с.н.с. Р.Н. Ризаханов; Н.А. Матюшин; С.С. Игнатъев; Н.П. Тымко
(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)

Канд. техн. наук, с.н.с. В.И. Дубинин; О.А. Лукьянова
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В работе представлен запланированный к реализации космический эксперимент, направленный на подтверждение функциональности слоистых самовосстанавливающихся композиционных материалов в условиях микрогравитации. Разработка нового класса искусственных самовосстанавливающихся материалов, которые по аналогии с природой смогут автоматически реагировать на повреждения, устраняя их, позволит достичь саморемонта (самовосстановления) в процессе эксплуатации. Результаты работы рекомендованы для развития и использования на предприятиях Госкорпорации «Роскосмос» при разработке перспективных разворачиваемых орбитальных и напланетных модулей в части формирования самовосстанавливающихся оболочек для устранения утечек внутренней среды и восстановления герметичности отсеков космических аппаратов.

Ключевые слова: самовосстанавливающиеся материалы, слоистые композиционные материалы, космический эксперимент, орбитальный полет

**Organization of an Experiment on Verification of Layered
Composite Materials with Self-Healing Effect under Orbital Flight
Conditions inside a Pressurized Compartment. N.N. Sitnikov,
I.A. Zaletova, R.N. Rizakhanov, V.I. Dubinin, O.A. Lukyanova,
N.A. Matyushin, S.S. Ignatyev, N.P. Tymko**

The paper presents a planned space experiment aimed at confirming the functionality of layered self-healing composite materials in microgravity conditions. The development of a new class of artificial self-healing materials

that, by analogy with nature, will be able to respond automatically to damage, eliminating it, will allow achieving self-repair (self-restoration) during operation. The results of the work are recommended for development and use at enterprises of the Roscosmos State Corporation in the development of promising deployable orbital and planetary modules in terms of forming self-healing shells to eliminate leaks of the internal environment and restore the tightness of spacecraft compartments.

Keywords: self-healing materials, layered composite materials, space experiment, orbital flight

В настоящее время все больше разрабатываются и создаются новые поколения космических аппаратов с увеличенным временем автономной работы. Поэтому для долгосрочного безопасного функционирования систем космических аппаратов (КА) становятся востребованными материалы, способные автономно определять и устранять повреждения при появлении дефектов. Искусственные самовосстанавливающиеся материалы и композиционные системы при использовании в составе изделий направлены на повышение надежности КА, снижение затрат на замену составных элементов и продление срока службы.

В предыдущей статье авторов «Самозалечивающиеся материалы для решения функциональных задач в космической технике» [1] были рассмотрены достижения последних лет в области проектирования и изготовления искусственных самовосстанавливающихся материалов и композиционных систем, которые могут быть использованы в качестве защиты от агрессивных факторов космического пространства, приводящих к механическому повреждению элементов конструкции космических аппаратов (таких как: активное УФ излучение, атомарный кислород, микрометеороиды, термоциклирование, заряженные ионы, низкое давление). Обсуждались принципы самовосстановления в искусственных материалах и прототипы таких материалов, имеющих потенциал применения в космической технике.

Разрабатываемые в АО ГНЦ «Центр Келдыша» самовосстанавливающиеся слоистые композиционные материалы (ССКМ) направлены главным образом на защиту целостности и герметичности системы при возможных повреждениях высокоскоростными мелкими объектами (микрометеороидами и частицами мелкого космического мусора). Такие материалы становятся особенно востребованными в космической технике при изготовлении оболочек разворачиваемых надувных конструкций с большой площадью поверхности, отсеков космических аппаратов и станций.

Разработанный материал находится на стадии лабораторных и демонстрационных образцов, которые успешно прошли испытания в вакуумной камере при воздействии объектов (диаметром 1 мм) со скоростью 0,5 км/с, что было рассмотрено на Рабочих группах и заседании Секции № 16 НТС Госкорпорации «Роскосмос» и рекомендовано проведение исследований и испытаний изготовленных прототипов в условиях наиболее приближенных к факторам космического полета.

Потребность проведения исследований в натуральных условиях орбитального полета обосновывается необходимостью проверки реализуемых эффектов самовосстановления с учетом ключевого фактора космического пространства – микрогравитации, также представляют интерес ионизирующие излучения, ультрафиолетовое излучение Солнца и условия космического вакуума. Поэтому космический эксперимент предлагается реализовать в два этапа: первый этап «Защита-Н1» – внутри гермоотсека; второй этап «Защита-Н2» – вне гермоотсека при воздействии факторов космического пространства.

Задел, созданный в результате проведения эксперимента «Защита-Н1», целесообразно использовать при реализации эксперимента «Защита-Н2» (возможно планирование проведения на РС МКС или РОС) для отработки технологии обеспечения герметичности гибких слоистых композиционных материалов и жестких композиционных панелей с внутренним самовосстанавливающимся вязкотекучим наполнителем в условиях орбитального полета вне гермоотсека при воздействии факторов космического пространства: вакуум, солнечное излучение и радиационные потоки.

В ходе космического эксперимента «Защита-Н1» сквозные дефекты наносятся на образец ССКМ космонавтом для образования модельных отверстий с параллельной регистрацией на видеокамеру процесса самовосстановления герметичности.

На втором этапе («Защита-Н2») прокол будет осуществляться механическим устройством с управлением из модуля МИМ2, после чего образец будет экспонироваться в условиях открытого космоса.

Целью космического эксперимента «Защита-Н1» является верификация процессов самовосстановления герметичности в случае прокола ССКМ и исследование характеристик вязкотекучих наполнителей в условиях орбитального полета внутри гермоотсека МКС.

Задачи, решаемые в процессе проведения эксперимента «Защита-Н1»:

1. Регистрация процессов перемещений самовосстанавливающегося полимерных композиций (СПК) и восстановления герметичности после прокола в ССКМ с различной внутренней архитектурой в условиях микрогравитации. Определение временных параметров самовосстановления и характеристик поврежденных областей:

а) в образце ССКМ с внутренним вязкотекучим наполнителем и волокнами;

б) с внутренним вязкотекучим наполнителем и функциональными добавками.

2. Подтверждение и анализ технологических решений реализации эффекта самовосстановления герметичности в слоистом композиционном материале в условиях орбитального полета при отсутствии объемных сил.

3. Оценка потенциальной возможности применения ССКМ с внутренними СПК в качестве дополнительного материала для защиты от течей и восстановления герметичности отсеков КА.

Участниками и непосредственными исполнителями эксперимента «Защита-Н1» являются следующие организации: АО ГНЦ «Центр Келдыша», АО «ЦНИИмаш», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ПАО «РКК «Энергия». Постановщик – ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина».

Объектами исследований эксперимента «Защита-Н1» являются ССКМ и СПК на основе соединений боросилоксана, способные восстанавливать свою герметичность за короткий интервал времени – около 1 с.

Слоистая архитектура композиционных материалов обладает рядом преимуществ, позволяющих включать различные механизмы самовосстановления в одну систему. При этом каждый слой подбирается так, чтобы его свойства в сочетании со свойствами материалов других слоев способствовали эффективной реализации процесса самовосстановления во всей структуре слоистого композита.

В ходе рассмотрения механизмов самовосстановления в различных материалах в предыдущих работах авторов [1, 2] были выделены общие принципы их реализации, которые заключаются в наличии, по крайней мере, двух факторов: направленный массоперенос в область дефекта и восстановление (образование) устойчивых связей в данной области. Такие свойства эффективно проявляются в полимерных материалах, обладающих вязкотекучими, пластичными и эластичными свойствами, в которых подвижность молекулярных цепей позволяет провести структурную перестройку для восстановления связей.

Материалами, обладающими рядом перечисленных свойств, являются боросилоксаны, представляющие собой олигомерные соединения на основе полиорганосилоксанов (кремнийорганических эластомеров), состоящих из линейных (нитеобразных) молекул, скелет которых представляет собой наноразмерную спиральную структуру связанных между собой чередующихся атомов кремния, кислорода, а также бора с боковыми органическими радикалами.

Подобные соединения проявляют свойства дилатантной (неньютоновской) жидкости, сочетая свойства силиконовых масел и полимерных материалов, демонстрируя такие характеристики как текучесть при статической нагрузке (растекание по поверхности подложки под действием силы тяжести), эластичность при нагрузках средней величины и непластичность (хрупкость) при кратковременной или ударной нагрузке. Эти свойства обусловлены донорно-акцепторными взаимодействиями атомов бора и кислорода, а также межмолекулярными водородными связями. Боросилоксановые соединения отличаются повышенной адгезией к другим однотипным материалам, а также аутогезией (самослипанием), проявляющейся при консолидации границ [3, 4]. Функциональные свойства боросилоксановых соединений были также исследованы в работах [5, 6].

При получении боросилоксановых соединений за основу был взят способ, описанный в патенте RU 2714203 С1 «Способ получения органоборси-

локсана» [7]. В данном патенте для получения боросилоксановых соединений проводят реакцию взаимодействия органосилоксана с борной кислотой при нагревании в реакционной емкости цилиндрической формы. В качестве исходных материалов были взяты следующие вещества [7, 8]:

– каучук синтетический термостойкий низкомолекулярный (СКТН) марки А (полидиметилсилоксан с концевыми гидроксильными группами), ГОСТ 13835-73 [9];

– борная кислота марки Б, ГОСТ 18704-78 [10].

Способ, описанный в данном патенте, является наиболее подходящим для синтеза боросилоксановых соединений с массовым содержанием борной кислоты от 2 до 15 %. При синтезе соединений боросилоксана с меньшим содержанием борной кислоты (от 0,5 до 2 %) для ее равномерного распределения в каучуке организуется механическое перемешивание, а для повышения эффективности взаимодействия борная кислота вводится в виде водного раствора.

Добавление в боросилоксан различных наполнителей, например, углеродных волокон или функциональных сшивающих добавок приводит к уменьшению текучести, при этом благодаря невысокой молекулярной массе сохраняется высокая диффузия макромолекул, обеспечивающих повышенную аутогезию.

В результате проведенных работ были разработаны различные по архитектуре слоистые композиционные материалы, обладающие эффектом самовосстановления внутренней структуры и восстановления герметичности в случае пробоя, прокола или пореза. В общем случае ССКМ содержит в себе один или несколько внутренних слоев с СПК на основе боросилоксана, которая осуществляет направленный массоперенос в область дефекта и восстанавливает герметичность материала (рис. 1).

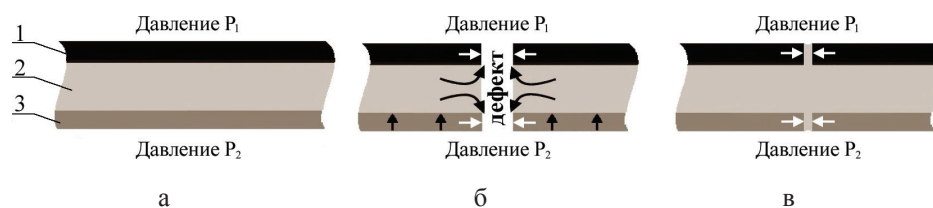


Рис. 1. Схематическая модель ССКМ на основе СПК:

а – слои: 1 – стеклоткань с силиконовым покрытием; 2 – СПК; 3 – монолитная силиконовая резина; *б* – слои с дефектом и со сформированным массопереносом СПК; *в* – слои с восстановленной герметичностью

Принцип действия основан на том, что внутренний слой СПК (2) находится в сжатом состоянии, зажатый между двумя внешними слоями (1, 3). Для обеспечения сжатого состояния самовосстанавливающегося слоя слоистый композит должен функционировать в условиях разницы давлений с внутренней и внешней стороны, как и предполагается в системах

с внутренней атмосферой в космическом пространстве. При образовании сквозного дефекта в слоистом композите из-за разницы давлений ($P_2 > P_1$) СПК стремится заполнить объем дефектной области (см. рис. 1 б, в). Характер и размер дефекта, разница давлений P_1 и P_2 , вязкость СПК, капиллярные взаимодействия между материалами и другие параметры определяют скорость самогерметизации и сохранение материала СПК в границах дефекта.

Использование ансамблей из последовательных слоев боросилоксана с различной текучестью в одном многослойном материале позволяет получать высокие характеристики самовосстановления итогового композиционного материала после нанесения сквозного дефекта.

Для проверки эффективности самовосстанавливающихся свойств ССКМ в АО ГНЦ «Центр Келдыша» используется лабораторная установка, позволяющая изучать процессы самовосстановления в плоских композитах после их сквозного повреждения каким-либо объектом. Данная установка представляет собой камеру, имеющую фланцевое окно, в котором герметично фиксируется образец ССКМ, клапаны для напуска и выпуска газа, создающего давление в объеме установки, манометр для контроля давления. При испытаниях в камеру напускается газ для создания избыточного давления в интервале от 20 до 50 кПа (от 0,20 до 0,50 ат), затем клапан подачи газа перекрывается. Оценка реализации эффекта самовосстановления в образце ССКМ проводится при понижении давления в камере при образовании в композите сквозного дефекта. Когда давление перестает снижаться и стабилизируется, то принимается, что отверстие от повреждения затянулось и фиксируется время самогерметизации (рис. 2).

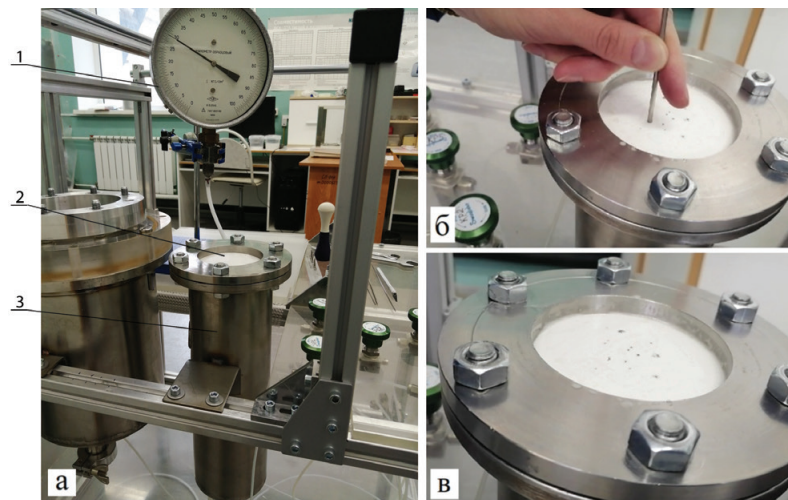


Рис. 2. Лабораторная установка для испытаний образцов ССКМ:

a – общий вид; *1* – манометр; *2* – образец, герметично закрепленный во фланцевом окошке; *3* – камера для испытаний; *б* – пример испытания самовосстанавливающих свойств образца ССКМ (прокол спицей диаметром 2 мм); *в* – вид восстановившихся дефектов во время испытания

Испытания свойств образца ССКМ осуществляются посредством его сквозного прокола пробойниками по диаметру (от 0,6 до 3 мм) и характеру повреждения (с острым, тупым и округлым кончиками) и регистрации времени восстановления герметичности объема камеры.

Представленный образец ССКМ продемонстрировал эффективные самовосстанавливающиеся свойства: отверстия от проколов диаметром от 0,6 до 1,2 мм самогерметизировались за время около 1 с, при этом понижение давления в камере было незначительным. При извлечении спицы диаметром 2 мм в процессе восстановления проколов вырывалась струя газа, что сопровождалось перепадом давления в камере от 0,003 до 0,005 ат. Давление в камере стабилизировалось за время около 2 с. Сопоставимые характеристики самогерметизации наблюдались и при проколах спицей диаметром 2,5 мм, при которых среднее время восстановления составило 4 с.

Отмечено, что на скорость восстановления оказывает влияние характер повреждения: прокол острым или тупым пробойником, формирование дефекта с ровной или рваной кромкой. Острый прокол оставляет аккуратную кромку и при таком повреждении время самогерметизации минимально.

Примеры испытаний таких ССКМ, содержащих различные СПК, были представлены в работах [1–3, 5, 11].

Подобно представленному примеру исследований будет осуществляться запланированный космический эксперимент.

Эксперимент «Защита-Н1» заключается в исследовании двух образцов самовосстанавливающихся материалов на научной аппаратуре (НА) «Тамбора», представляющей собой установку для испытаний по восстановлению герметичности.

НА «Тамбора» состоит из двух цилиндрических емкостей, установленных на платформе и образующих камеру с единым объемом посредством соединительной перемычки (рис. 3). Камера, имитирующая объем технологической конструкции КА, соединяется с помощью газовой магистрали с воздушным насосом для создания в ней необходимого давления (планируется использовать бортовой компрессор «Компрессор-Н»). Давление в объеме камеры измеряется манометром. Объем камеры может быть перекрыт с помощью газового крана, установленного на магистрали. Каждое фланцевое соединение с установленным в нем образцом ССКМ герметично закрывается защитной крышкой.

Образцы ССКМ вакуумноплотно фиксируются во фланцевых соединениях на емкостях испытательной камеры (рис. 4).

Во время реализации космического эксперимента космонавт осуществляет контролируемое механическое воздействие с применением соответствующей оснастки (пробойника), обеспечивающей сквозной прокол исследуемого образца ССКМ. В итоге в образце формируются модельные отверстия (дефекты). После извлечения пробойника из самовосстанавливающегося материала происходит затягивание образованного дефекта и восстановление

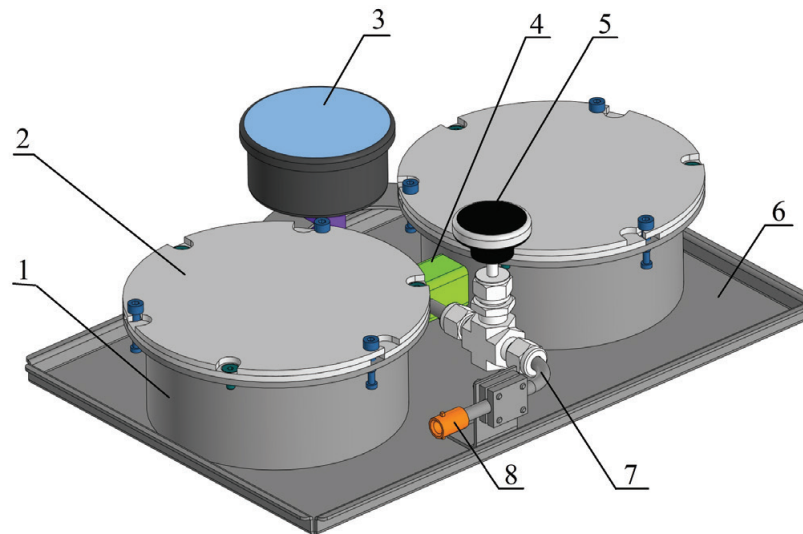


Рис. 3. Общий вид НА «Тамбора»:

1 – камера; 2 – защитная крышка; 3 – манометр; 4 – переключатель; 5 – газовый кран; 6 – основа; 7 – магистраль; 8 – соединение с насосом

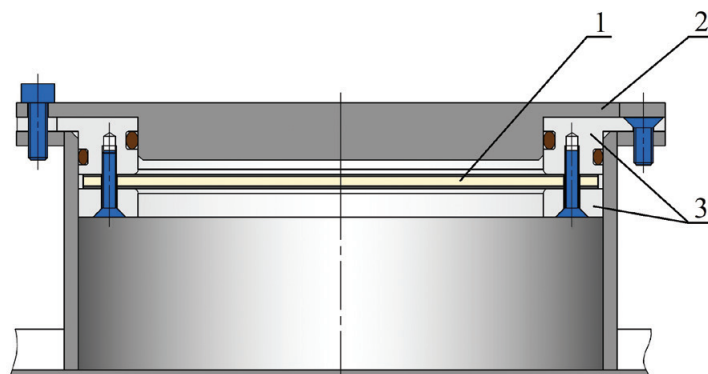


Рис. 4. Вид одной из емкостей НА «Тамбора» в разрезе:

1 – образец ССКМ; 2 – защитная крышка; 3 – фланцевое соединение

герметичности камеры. Для регистрации происходящих при испытании особенностей и параметров реализации эффекта самовосстановления герметичности в ССКМ после его прокола в условиях микрогравитации используются измерительные устройства: манометр для измерения давления в камере и секундомер для регистрации временной составляющей процесса. В ходе эксперимента непосредственно измеряется временной интервал от извлечения пробойника из исследуемого материала до затягивания образованного отверстия с восстановлением герметичности, при этом фиксируется

соответствующий перепад давления в камере. Дополнительно ведется видеосъемка процесса самовосстановления герметичности.

Испытания проводятся при давлении во внутреннем объеме камеры от 49 (0,5) до 98 кПа (1,0 ат), погрешность при выставлении давления ± 5 кПа ($\pm 0,05$ ат).

В космическом эксперименте планируется два сеанса испытаний при различных значениях давления в камере НА «Тамбора» (0,5 и 1 ат) с двумя различными образцами ССКМ № 1 и 2, отличающимися внутренним наполнением. Воздействие на образец будет осуществляться посредством двух конических пробойников диаметром 1 и 1,5 мм.

До сеанса испытаний космонавт записывает в лист регистрации параметров номер образца и давление в камере в начале испытания.

После извлечения пробойника из испытываемого образца необходимо записать перепад давления в камере и временной интервал стабилизации давления.

При выполнении исследований на борту РС МКС необходимо участие двух космонавтов: первый – для проведения эксперимента; второй – для записи данных в лист регистрации параметров и операторской видеофиксации. Для обеспечения подготовки космонавтов к проведению космического эксперимента будет изготовлен образец НА.

После окончания экспериментальной работы возможно повторное проведение аналогичных исследований через одну неделю или один месяц по согласованию, что представляет интерес для исследования сохранения эффекта самовосстановления герметичности в ССКМ в условиях микрогравитации при повторном воздействии. Последующие циклы экспериментов можно проводить в областях залеченных дефектов и в областях, ранее не подвергнутых воздействию пробойников.

В случае если дальнейших экспериментов не планируется необходимо отсоединить фланцевые соединения с образцами ССКМ № 1 и 2 от НА «Тамбора» и поместить в укладку для возврата на Землю для дальнейшего анализа и тематической обработки данных в АО ГНЦ «Центр Келдыша».

После проведения исследований со всеми образцами, помогающий космонавт сохраняет полученные данные на электронный носитель, который возвращается вместе с экипажем на Землю.

Основным результатом эксперимента «Защита-Н1» будет подтверждение работоспособности разработанной технологии получения эффекта самовосстановления герметичности в прототипах слоистых композиционных материалов в условиях космического полета.

Выводы

Проведение космического эксперимента позволит оценить и изучить влияние условий космического пространства на параметры растекания СПК на основе боросилоксана, их втекание в образованные отверстия, что определяет

скорость реализации эффектов самовосстановления и восстановления герметичности в ССКМ при повреждениях.

Результаты эксперимента «Защита-Н1» могут быть использованы в смежных областях науки и техники для разработки самовосстанавливающихся конструкций, а также способствовать популяризации и развитию данного направления в гражданских сферах человеческой деятельности и образовательном процессе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Самозалечивающиеся материалы для решения функциональных задач в космической технике / А.В. Блошенко, В.И. Дубинин, И.А. Залетова [и др.] // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2023. – № 1(59). – С. 30–44.
- [2] Самозалечивающиеся материалы для космической техники, организация экспериментальных исследований в условиях космического полета / Н.Н. Ситников, С.В. Грешнякова, И.А. Залетова, Т.Ф. Исхаков [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. – Звездный городок, 2023. – С. 130–132.
- [3] Слоистые самозалечивающиеся композиты с внутренним функциональным слоем на основе боросилоксана / Н.Н. Ситников, И.А. Хабибуллина, В.И. Мащенко [и др.] // Перспективные материалы. – 2020. – № 4. – С. 11–23.
- [4] Ситников, Н.Н. Синтез соединений боросилоксана и изготовление композиций на его основе со свойствами дилатантной жидкости / Н.Н. Ситников, И.А. Залетова, В.И. Мащенко // Пластические массы. – 2022. – № 1, 2. – С. 24–27.
- [5] Залетова, И.А. Самозалечивающиеся слоистые композиционные материалы с полимерным вязкотекучим наполнителем на основе соединений боросилоксана с различными функциональными добавками / И.А. Залетова, Н.Н. Ситников // Актуальные вопросы прочности. Сборник тезисов LXIV Международной конференции. – Уральский государственный горный университет: Екатеринбург, 2022. – С. 325–327.
- [6] Влияние борной кислоты на структуру и свойства боросилоксанов / В.И. Мащенко, Н.Н. Ситников, И.А. Хабибуллина, Д.Н. Чаусов [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2021. – Т. 63, № 2. – С. 83–91.
- [7] Патент № 2714203 Российская Федерация, МПК C08G 79/08 (2006.01), C08G 77/56 (2006.01), C08G 77/22 (2006.01). Способ получения органоборосилоксана: № 2019128033: заявл. 06.09.2019; опубл. 13.02.2020 / Мащенко В.И., Ситников Н.Н., Хабибуллина И.А. – 5 с. – Текст: непосредственный.
- [8] Залетова, И.А. Получение боросилоксана и композиции на его основе со свойствами пластичной игрушки для рук «Silly putty» / И.А. Залетова, В.И. Мащенко, Н.Н. Ситников // Видеонаука. – 2021. – № 2(22). – С. 1.
- [9] ГОСТ 13835-73. Каучук синтетический термостойкий низкомолекулярный СКТН = Low-molecular thermal shock resistant synthetic rubber СКТН. Specifications: Государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26.02.1973 № 413: введен впервые: дата введения 1973-03-15 // разработан и внесен Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. – Москва: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с. – Текст: непосредственный.

- [10] ГОСТ 18704-78. Кислота борная. Технические условия = Boric acid. Specifications: Государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 04.11.78 № 2893: введен впервые: дата введения: 1980-01-01 // разработан Министерством по производству минеральных удобрений. – Москва: Изд-во стандартов, 1993. – 33 с. – Текст: непосредственный.
- [11] Ситников, Н.Н. Слоистые материалы с внутренним вязкотекучим наполнителем, обеспечивающим самовосстановление герметичности / Н.Н. Ситников, И.А. Залетова // Идеи К.Э. Циолковского в теориях освоения космоса. Материалы 58-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. – Калуга: ИП Стрельцов И.А., 2023. – С. 103–107. – ISBN: 978-5-907678-44-6.

REFERENCES

- [1] Self-Healing Materials for Solving Functional Problems in Space Technology / A.V. Bloshchenko, V.I. Dubinin, I.A. Zaletova [et al.] // Bulletin of the Lavochkin Scientific and Production Association. – 2023. – No 1(59). – P. 30–44.
- [2] Self-Healing Materials for Space Technology, Organization of Experimental Research Under Space Flight Conditions / N.N. Sitnikov, S.V. Greshnyakova, I.A. Zaletova, T.F. Iskhakov [et al.] // Manned Spaceflight. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. Star City, 2023. – P. 130–132.
- [3] Layered Self-Healing Composites With an Internal Functional Layer Based on Borosiloxane / N.N. Sitnikov, I.A. Khabibullina, V.I. Mashchenko [et al.] // Perspective materials. – 2020. – No 4. – P. 11–23.
- [4] Sitnikov, N.N. Synthesis of Borosiloxane Compounds and Production of Compositions Based on it With the Properties of a Dilatant Liquid / N.N. Sitnikov, I.A. Zaletova, V.I. Mashchenko // Plastics. – 2022. – No 1, 2. – P. 24–27.
- [5] Zaletova, I.A. Self-Healing Layered Composite Materials With a Polymer Viscous Filler Based on Borosiloxane Compounds With Various Functional Additives / I.A. Zaletova, N.N. Sitnikov // Actual Issues of Strength. Collection of Abstracts of the LXIV International Conference. – Ural State Mining University: Ekaterinburg, 2022. – P. 325–327.
- [6] Effect of Boric Acid on the Structure and Properties of Borosiloxanes / V.I. Mashchenko, D.N. Chausov, N.N. Sitnikov, I.A. Khabibullina [et al.] // Polymer Science, Series A. – 2021. – Vol. 63, No 2. – P. 91–99.
- [7] Patent No 2714203 Russian Federation, IPC C08G 79/08 (2006.01), C08G 77/56 (2006.01), C08G 77/22 (2006.01). Method for Obtaining Organobor-Siloxane: No 2019128033: Application 06.09.2019: publ. 02/13/2020 / V.I. Mashchenko, N.N. Sitnikov, I.A. Khabibullina. – 5 p. – Text: direct.
- [8] Production of Borosiloxane and a Composition Based on it with the Properties of the Plastic Hand Toy “Silly putty” / I.A. Zaletova, V.I. Mashchenko, N.N. Sitnikov // Videoscience. – 2021. – No 2(22). – P. 1.
- [9] GOST 13835-73. Low-Molecular Thermal Shock Resistant Synthetic Rubber CKTH. Specifications: State Standard of the USSR: Official Publication: Approved and Put Into Effect by Resolution of the USSR State Committee for Standards Dated 26/02/1973 No 413: Introduced for the First Time: Date of Introduction 1973/03/15 //

- Developed and Introduced by the Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry of the USSR. – Moscow: Publishing House of Standards, 1992. – 7 p. – Text: direct.
- [10] GOST 18704-78. Boric acid. Specifications: State Standard of the USSR: Official Publication: Approved and Put into Effect by Resolution of the USSR State Committee for Standards dated 04.11.78 No 2893: Introduced for the First Time: Date of Introduction: 1980-01-01 // Developed by the Ministry for the Production of Mineral Fertilizers. – Moscow: Publishing House of Standards, 1993. – 33 p. – Text: direct.
- [11] Sitnikov, N.N. Layered Materials with Internal Viscous Filler Providing Self-Healing Tightness. In the Collection /N.N. Sitnikov, I.A. Zaletova // Ideas of K.E. Tsiolkovsky in Theories of Space Exploration. Materials of the 58th Scientific Readings Dedicated to the Development of the Scientific Heritage and the Development of the Ideas of K.E. Tsiolkovsky. – Kaluga: IP Streltsov I.A. – P. 103–107. – ISBN: 978-5-907678-44-6.