

УДК 678.8

И.Д. Краев¹, О.В. Попков¹, Е.М. Шульдешов¹, А.Е. Сорокин¹, Г.Ю. Юрков²

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ СОЗДАНИИ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНЫХ НАЗНАЧЕНИЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5

Рассмотрены кремнийорганические полимеры, а также композиционные материалы различных назначений на их основе. Отмечены важнейшие свойства кремнийорганических соединений, обуславливающие их широкое применение в различных сферах: авиа- и ракетостроении, электронике и радиотехнике, строительстве, а также в медицине.

Приведен краткий обзор в области современных кремнийорганических герметиков, резин, лакокрасок, материалов для электро- и теплоизоляции, материалов медицинского назначения, а также современных композиционных материалов. Рассмотрены различные способы применения и модификации силоксановых каучуков, в частности полидиметилсилоксанового каучука и других.

Особое внимание уделено кремнийорганическим лестничным блок-сополимерам. Описан ряд полимерных и композиционных материалов, полученных на их основе, в том числе звукопоглощающий материал, а также биосовместимые покрытия.

Ключевые слова: *силоксановый каучук, герметик, теплоизоляционный материал, звукопоглощающие материалы, влагозащитные покрытия, биосовместимые материалы, электроизоляционные материалы, диэлектрическая проницаемость.*

In this paper, organosilicon polymers, as well as composite materials of various purposes on their basis, were considered. The most important properties of organosilicon compounds were identified, which caused their wide application in various spheres: aircraft and rocket engineering, electronics and radio engineering, construction, and medicine.

A brief review was carried out in the field of modern silicone sealants, rubbers, paint and varnish materials, materials for electrical and thermal insulation, medical supplies, as well as modern composite materials. Various applications and methods for the modification of silicone rubbers, in particular polydimethylsiloxane rubber, and others have been considered.

Special attention was paid in the article to organosilicon stair block copolymers. A number of polymer and composite materials obtained on its basis, include sound-absorbing material, as well as biocompatible coatings, are described.

Keywords: *silicone, sealant, rubber heat-insulating material, sound-absorbing materials, moisture-proof coatings, biocompatible materials, electrical insulating materials, dielectric permittivity.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук [Institute of Metallurgy and Materials Science A.A. Baykova of Russian academy of sciences]; e-mail: imet@imet.ac.ru

Введение

Кремнийорганические полимеры (иначе называемые силиконами) – это соединения, содержащие цепочку атомов $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$, модифицированную различными органическими группами. Они обладают уникальными свойствами, что в значительной степени повлияло на развитие науки и техники. Сейчас уже практически нельзя найти ни одной отрасли, развитие которой было бы возможно без применения силиконов. В XXI веке владение кремниевыми технологиями станет критерием стратегической значимости современных государств [1].

Продукты на основе силоксановых каучуков обеспечивают высокую термическую стойкость, атмосферостойкость, стойкость к действию кислорода и озона при повышенных температурах, радиационную стойкость, нетоксичность и биологическую инертность, хорошие изоляционные свойства.

Серьезным преимуществом силоксановых эластомерных материалов является морозостойкость, а также способность длительно сохранять высокие эксплуатационные свойства при длительном воздействии агрессивных сред и высоких температур [2].

Кремнийорганические полимеры подразделяются на линейные, разветвленные, лестничные, сшитые, которые объединяют группу различных жидкостей, каучуков и смол. Подобного типа полимеры (полиорганосилоксаны) содержат кремний, связанный с органическим углеродом непосредственно через кислород. Эти полимеры подразделяются на *мономерные*, состоящие от одного до трех звеньев кремния, и *кремнийорганические полимеры*. Выделяют три основные группы кремнийорганических полимеров, различающихся химическим строением основной цепи: кремнийорганические полимеры с неорганическими главными цепями макромолекул, состоящими из чередующихся атомов кремния и других элементов (кислород, сера, азот, алюминий, бор), причем углерод входит лишь в состав групп, обрамляющих главную цепь (полиорганосилоксаны, полиэлементоорганосилоксаны, полиорганосилазаны, полиорганосилтианы, полиорганосиланы, полиорганосилазоксаны); кремнийорганические полимеры с органонеорганическими главными цепями макромолекул, состоящими из чередующихся атомов кремния и углерода, а иногда и кислорода (полиорганоалкиленсиланы, полиорганофениленсиланы, полиорганоалкиленсилоксаны, полиорганофениленалюмосилоксаны); кремнийорганические полимеры с органическими главными цепями макромолекул (полиалкиленсиланы). Наибольшее значение в промышленности имеют полиорганосилоксаны (полисилоксаны), а также полиметаллоорганосилоксаны и полиорганосилазаны. Силиконовые жидкости – полиметилсилоксаны (ПМС) и полиметилдифенилсилоксаны – находят применение в качестве гидравлических масел. Силиконовые масла включают класс жидких кремнийорганических полимеров (ПМС, трансформаторные масла). Силиконовые масла при обычных условиях не смешиваются с водой, не имеют цвета и запаха, не токсичны. Полидиметилсилоксаны (ПМС) обладают высокой теплоустойкостью и хорошей теплопроводностью. Благодаря хорошим диэлектрическим свойствам ПМС широко используются в энергетике, а также применяются для производства герметиков, клеев и красок.

Благодаря исключительной термостойкости, высоким диэлектрическим показателям, хорошей морозостойкости, резины, изготовленные на основе кремнийорганического каучука, применяются для жароупорных прокладок, уплотнений, мембран и т. д., предназначенных для работы в условиях низких (-60°C) и высоких температур (более $+250^{\circ}\text{C}$). Высокая термостойкость кремнийорганических полимеров объясняется, прежде всего, высокой энергией связи $\text{Si}-\text{O}$. Существуют термостойкие резины, которые могут работать даже при температуре $>300^{\circ}\text{C}$. В процессе нагревания силиконовых каучуков возможна сшивка линейных полимеров поперечными связями. По механической

прочности полиорганосилоксаны уступают таким полимерам, как полиамиды. Полиорганосиланы отличаются невысокой химической и термоокислительной стойкостью. Объясняется это тем, что связь Si–Si под действием щелочей или окислителей легко разрывается с образованием силанольной группы Si–ОН. Поэтому полиорганосиланы имеют меньшее практическое значение, чем полиорганосилоксаны. Полиорганосилоксаны обладают высокой термостойкостью, так как они содержат в основной цепи только связи Si–C и C–C. Такие полимеры отличаются высокой гидролитической устойчивостью и стойкостью к действию щелочей и кислот. Полиорганосилоксаны не нашли широкого практического применения из-за высокой стоимости соответствующих мономеров. Из числа кремнийорганических полимеров различного назначения наибольшее распространение получили полиметилсилоксаны (ПМС), представленные в основном двумя полимерными системами – полиметилсилоксанами и линейными полидиметилсилоксанами с различными молекулярными характеристиками. Изменение их пространственной структуры – от обычных линейных к звездообразным и полимакромономерным ПМС (молекулярным щеткам) – приводит к существенному изменению их характеристик и позволяет значительно расширить области их практического применения.

Кремнийорганические каучуки (силиконовые каучуки) относятся к классу кремнийорганических полимеров с молекулярной массой в пределах 250000–450000, которые широко применяются в медицине и других специальных областях техники. Высокая термостойкость каучука позволяет получать на его основе различные резиновые уплотнения, диафрагмы, прокладки, клапаны, электроизоляционные изделия, а также технические изделия, предназначенные для работы в условиях низких и высоких температур [3].

Материалы на основе полиорганосилоксанов с функциональными группами у атома кремния способны к вулканизации под действием различных катализаторов, инициаторов, облучения и других факторов без выделения побочных продуктов [4].

Кремнийорганические материалы благодаря своим уникальным свойствам нашли широкое применение в различных сферах промышленности и строительной индустрии.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.3. «Материалы и покрытия для защиты от действия ЭМИ, ударных, вибрационных, акустических и электрических воздействий» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Материалы и методы

Лакокрасочные материалы и покрытия

Сезонные колебания температуры, а также воздействие влаги оказывают негативное влияние на эксплуатационные характеристики различных видов техники, а также строительных конструкций [6].

Одной из важнейших задач является защита деталей и узлов конструкции самолета и вертолета от разрушающего воздействия окружающей среды. Поверхность деталей из металлических сплавов и полимерных композиционных материалов (ПКМ) подвергается сложному воздействию многих факторов – например, широкий диапазон температурных перепадов воздушной атмосферы, интенсивная солнечная радиация, повышенная доля ультрафиолета, эрозионный износ, неизбежное воздействие при эксплуатации горючесмазочных веществ и других агрессивных жидкостей.

Для защиты металлических сплавов и ПКМ от нежелательных факторов, как правило, используют лакокрасочные материалы и покрытия [7]. В процессе создания

системы ЛКП – для выравнивания поверхности, устранения дефектов (мелких трещин, сколов, рытвин) – широко применяются шпатлевки, обеспечивающие ровную, гладкую поверхность. С целью повышения адгезионной прочности между лакокрасочными слоями защитного материала используются различные промежуточные покрытия и грунты [8].

Свойства защитных покрытий в основном зависят от свойств применяемых эластомеров. Разработка универсальной полимерной композиции нового поколения как основы защитных материалов многоцелевого назначения имеет важное практическое значение [9].

Широкое распространение в качестве основы для лакокрасочных материалов и покрытий получили кремнийорганические лаки и смолы.

Кремнийорганические лаки представляют собой растворы смол в органических растворителях. Благодаря совокупности ценных свойств они нашли применение в различных отраслях промышленности. Кремнийорганические лаки изготавливают на основе кремнийорганических полимеров. При этом в качестве растворителя, как правило, используют ароматические углеводороды или их смеси с эфирами, спиртами и кетонами. Одной из характерных особенностей кремнийорганических лаков является то, что они в течение суток высыхают медленно. Для ускорения этого процесса в их состав вводят дополнительные органические пленкообразующие вещества – например, алкидные или эпоксидные смолы. Модификация полиорганосилоксанов производится в процессе синтеза полимеров, а также в процессе смешения полиорганосилоксанов с органическими смолами, содержащими реакционноспособные группы. Добавки органических смол способствуют улучшению адгезии, эластичности покрытий, сопротивлению истиранию, ускоряют высыхание кремнийорганических эмалей. Смолы, содержащие ароматические радикалы, обеспечивают более высокую термостойкость, но снижают эластичность покрытия. Добавки этилцеллюлозы или акриловых смол позволяют получить пленку, которая легко высушивается на открытом воздухе.

Введение карбамидной смолы повышает твердость пленки, а эпоксидная смола увеличивает стойкость покрытия к воздействию агрессивных сред. Полиорганосилоксановые смолы по своим свойствам (по стойкости к нагревам) занимают промежуточное положение между органическими и неорганическими соединениями. Группы атомов кремния и кислорода обуславливают жесткость и твердость композиции, а органические радикалы – их эластичность. Кремнийорганические лаки и эмали преимущественно применяют для защиты строительных конструкций из минеральных материалов (кирпич, штукатурка, бетон и т. д.) от воздействия высоких температур, солнечной радиации, влажности и т. д. Термо- и водостойкость, электроизоляционные свойства позволяют применять их для изоляции свечей авиадвигателей, в радио- и рентгеновском оборудовании, антеннах, аккумуляторных батареях и т. д. Они также обеспечивают длительный срок и надежность работы конденсаторов и небольших трансформаторов, предназначенных для использования при высоких температурах. Для улучшения технологических и физико-химических свойств кремнийорганического покрытия используют специальные отвердители [3].

Герметики

Герметики – пастообразные или вязкотекучие композиции на основе полимеров или олигомеров, которые наносят на болтовые, заклепочные и другие соединения с целью предотвращения утечки рабочей среды через зазоры конструкции, гидроизоляции и для герметизации. К основным свойствам герметиков также относятся легкость изготовления и нанесения по месту использования, стабильная адгезия к конструкционным

материалам и сохранение эластичности в широком диапазоне температур при длительной эксплуатации. С появлением высокоскоростных самолетов возросла потребность в герметиках, работающих при температуре $>150^{\circ}\text{C}$. В качестве основы для таких герметиков широкое распространение получили кремнийорганические материалы. Появление нового способа вулканизации (способ «холодной» вулканизации силоксанов) силоксанового каучука без нагрева, а именно путем их каталитической поликонденсации с полифункциональными силанами в присутствии катализаторов на основе солей олова и титана без использования высоких температур, привело к возникновению нового класса герметиков ВИКСИНТ (ФГУП «ВИАМ»). С течением времени возрастала потребность в получении все более термостойких герметиков. Так, к концу 1980-х годов в СССР существовал ряд герметиков марок УФ-11-21, УФ-12ВТ, КЛТФ-75, успешно использовавшихся в условиях высокотемпературного нагрева при $400\text{--}450^{\circ}\text{C}$. Однако в 1990-х годах производство термостойких герметиков было полностью утрачено. Во ФГУП «ВИАМ» и АО «ГНИИХТЭОС» был проведен ряд работ по восстановлению и созданию современных отечественных герметиков [10].

В АО «ГНИИХТЭОС» начиная с 1960-х годов проводились работы по созданию клеев-герметиков типа Эласил для различных отраслей промышленности. Например, клеи-герметики марок Эласил 1106 и Эласил 137-181 предназначались для строительной индустрии. Силиконовые клеи-герметики марок Эласил 137-83 и Эласил 137-352 выпускались для автомобильной промышленности и предназначались для герметизации разъемных соединений, для устранения течи воды, антифриза, масла, а также для герметизации стекол, фар, электронного и электротехнического оборудования салона автомобиля.

Имеется также опыт применения теплостойкого силиконового клея-герметика типа Эласил 137-83 в области теплоэнергоснабжения. К числу достоинств этих клеев-герметиков относятся широкий интервал рабочих температур ($-60\div+300^{\circ}\text{C}$) и хорошие физико-механические характеристики. В настоящее время на опытном производстве АО «ГНИИХТЭОС» выпускаются всего пять марок силиконовых клеев-герметиков: Эласил 137-83, Эласил 137-180, Эласил 137-182, Эласил 137-242, жидкая прокладка ПС, ведутся работы по восстановлению утраченных технологий и получению новых материалов [11].

Отличительной особенностью кремнийорганических герметиков является их способность переходить из пастообразного состояния в эластичное под воздействием вулканизирующих агентов без нагрева. Композиции герметиков на основе кремнийорганических эластомеров обладают высокой стойкостью к различным факторам старения, способны эксплуатироваться в различных климатических условиях в широком интервале температур.

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработаны и рекомендованы к применению более 15 пастообразных герметизирующих композиций, которые нашли широкое применение в промышленности, в том числе в авиационной, для герметизации элементов конструкций, остекления, приборов и т. д. При герметизации некоторых конструкций требуется обеспечить возможность многоразовых разборок и сборок узлов, съема конструктивных элементов с последующей их сборкой. Такую задачу возможно успешно решить путем применения ленточного герметизирующего материала. Для герметизации топливных отсеков летательных аппаратов разработан ленточный герметизирующий материал марки ВГМ-Л, работоспособный при температуре от -60 до $+130^{\circ}\text{C}$. Разработан также ленточный герметик марки ВГМ-Л-3, который может применяться для внутришовной герметизации крупногабаритных отсеков фюзеляжей, крышек, заглушек и т. д. и работоспособен при температуре от -60 до $+180^{\circ}\text{C}$ [12].

Электроизоляционные материалы

Одной из основных задач, стоящих в настоящее время перед отечественной электронной промышленностью, является повышение технико-экономической эффективности производства полупроводниковых приборов на основе применения новых кремнийорганических материалов ускоренной вулканизации с высокими электроизоляционными характеристиками и специальным комплексом технологических свойств: широким диапазоном физико-механических характеристик, отсутствием нитеобразования, сокращенным режимом отверждения компаундов.

Для чувствительных к давлению изделий электронной техники за рубежом и в отечественной практике используются заливочные кремнийорганические компаунды. Высокие свойства компаундов достигаются путем введения новых катализаторов, сшивающих агентов, специально обработанных наполнителей, специальных добавок, улучшающих те или иные свойства вулканизаторов.

Разрабатываются новые составы герметиков – в виде клея и лаковой композиции – для электронно-оптических изделий. В их состав входят отвердители, структурирующие добавки QM-смола, которые ранее в органосилоксановых композициях (клеящих герметиках) для оптоэлектроники не применялись [13].

Длительная и надежная эксплуатация полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных схем (ИС) в значительной мере определяется выбором способа их защиты полимерными материалами. В России и за рубежом выпускается широкая номенклатура электроизоляционных лаков на основе эпоксидных, кремнийорганических, эпоксикремнийорганических смол, полиэфиров, полиамидоимидов, полиимидов. Кремнийорганические покрытия, благодаря специфической структуре цепей полисилоксана, обладают высокими диэлектрическими свойствами и поэтому широко применяются в качестве высокотемпературных электроизоляционных материалов. Фирмой Dow Corning Co. (США) разработаны прозрачные кремнийорганические смолы марок ДС R-4-3117 и ДС QR-4-3117 низкотемпературного отверждения, предназначенные в качестве защитных покрытий жестких и гибких печатных схем, толсто пленочных резисторов (до заливки) и многих других электронных компонентов сборок и приборов. Для защиты активных элементов и плат СВЧ изделий в отечественном электронном приборостроении широкое применение получила композиция на основе силоксанового блок-сополимера лестничного строения и гетеросилоксана, содержащего атомы бора и циркония в силоксановой цепи. Композиция получила название – лак марки ЭКТ [14].

Лаковое покрытие обладает высокой адгезией к меди, алюминию, кремнию, ферриту, поликору, стеклотекстолиту и другим конструкционным материалам; высокими диэлектрическими свойствами в диапазоне температур от -65 до $+250^{\circ}\text{C}$; низким тангенсом угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот. С целью повышения термостойкости защитных покрытий в качестве их основы используется кремнийорганический лестничный блок-сополимер марки Лестосил СМ, отверждаемый по реакции поликонденсации. Пленки лестничных кремнийорганических полимеров обладают высокими диэлектрическими характеристиками (в том числе в СВЧ диапазоне частот) и влагозащитными свойствами, не оказывают коррозионного воздействия на алюминий и медь, сочетают высокую эластичность с прочностью, работают в интервале температур -60 до $+300^{\circ}\text{C}$, что обуславливает их применение в качестве защиты активных элементов и плат СВЧ изделий электронной техники [15].

Одним из перспективных направлений в материаловедении последних лет является создание полимерных нанокомпозитов, физические и диэлектрические свойства которых, определяемые чрезвычайно высокой удельной поверхностью наночастиц и

кластеров, значительно отличаются от свойств как блочного материала, так и индивидуальных соединений.

В настоящее время во ФГУП «НИИСК» выпускается получаемый методом го-мофункциональной поликонденсации полифенилсилсесквиоксан-полидиметилсилоксановый блок-сополимер торговой марки Лестосил СМ. Блок-сополимер Лестосил СМ представляет собой твердую аморфную невальцуемую крошку, применяется в виде раствора для получения наполненных и ненаполненных защитных и антиадгезионных эластичных гидрофобных нетоксичных покрытий для различных конструкций, труб, приборов, изделий и деталей, работающих в широком интервале температур – от -60 до +300°C и при резком перепаде температур [16].

Разработанные в АО «ГНИИХТЭОС» эластомерные композиции, число которых превысило 50 марок, широко применяют для защиты изделий электронной техники: диодов, триодов, транзисторов, тиристоров, различных интегральных схем, датчиков и т. п. Особую группу представляют компаунды СИЭЛ с регулируемым показателем преломления и низким уровнем потерь света, применяемые для создания различных оболочек волоконных световодов и других изделий волоконной оптики.

Теплостойкие и теплоизоляционные материалы

Теплостойкость – это способность материала сохранять свои свойства при воздействии высоких температур в течение длительного времени. Под действием высоких температур значительно ускоряются процессы термического и термоокислительного старения и прочие разрушающие полимерный материал процессы. Стойкость материалов к таким воздействиям определяется в основном природой полимера.

Из эластомерных материалов максимальной теплостойкостью обладают силоксановые каучуки, что обуславливается природой их химических связей основной молекулярной цепи полимера. Так, энергия связи Si–O в кремнийорганических полимерах составляет 450 кДж/моль, в то время как энергия связи фторированных атомов углерода во фторкаучуках лишь 356 кДж/моль [17].

Постоянно возрастающие требования к безопасности энергетических систем обусловили быстрое развитие производства и потребления полимерных изоляционных материалов, позволяющих сохранять работоспособность изделий при повышенных температурах или в условиях пожара. Весьма перспективными материалами для решения этих задач являются силиконовые резины, обладающие высокой теплостойкостью и не образующие токсичных продуктов при термической и термоокислительной де-струкции или горении. Поиск добавок, наполнителей и катализаторов, существенно повышающих ресурс работы силиконовых эластомерных композиций при температурах >300°C или способствующих образованию керамоподобных материалов, является одним из важнейших направлений прикладных исследований [18].

В Китае и Японии повышение термостойкости каучуков является крайне актуальной задачей. В Японии улучшение эксплуатационных характеристик силоксановых и фторсилоксановых эластомеров достигается в основном путем модифицирования силоксановых и фторсилоксановых каучуков, а также применения новых веществ в рецептуростроении, совмещения каучуков и введения в состав композиции олигомеров. Основное внимание в исследованиях силоксанов и фторсилоксанов уделено многокомпонентным рецептурам, а также использованию смесей каучуков, что позволяет добиться улучшения комплекса свойств композиций [2].

Одно из важнейших направлений – создание термо-, жаро-, огнестойких наполненных композитов на основе силиконов для защиты высокотемпературных материалов на основе карбидокремниевых волокон и для склеивания этих материалов между собой

и с высокотемпературными сталями. Так, в АО «ГНИИХТЭОС» разработан жаростойкий легковесный комбинированный керамокомпозит, обладающий достаточной прочностью, стойкостью к растрескиванию, влагостойкостью, адгезией к различным подложкам, сохраняющий работоспособность в условиях воздействия высокотемпературных (до 1900°C) газовых потоков и пламени. Отличительной особенностью такого композита является то, что выполняющий теплозащитную функцию легковесный огнеупорный материал имеет на «горячей» стороне высокоплотное химически связанное с ним защитное силиконовое керамерное покрытие [4].

К эластомерным силиконовым материалам с высокими значениями термо- и теплостойкости относятся линейно-лестничные блок-сополимеры, содержащие линейные полидиметилсилоксановые и лестничные фенилсилсесквиоксановые звенья. Использование таких блок-сополимеров марок Лестосил Н и Лестосил СМ повышает теплостойкость полученных вулканизатов (>300°C) в течение длительного времени [19].

Представляет интерес каучук марки Термосил-УП – одна из последних разработок ФГУП «НИИСК им. Лебедева». Он представляет собой кремнийорганический блок-сополимер лестничного строения, из которого стандартными для силоксановых каучуков методами получают наполненные вулканизаты, работоспособные до температуры 350°C [18].

К материалам, устойчивым к воздействию высоких температур, можно отнести разработанные во ФГУП «ВИАМ» теплостойкие резиноподобные материалы на основе силоксановых каучуков – например, ФКС-1, ФКС-2 и ФКС-4. Однако необходимо отметить, что производство данных материалов из-за высокого уровня наполнения, в том числе фторопластом, связано с большими технологическими трудностями. Разработан также безугадочный пенотеплозащитный материал марки ФКМ-С-1Б для тепловой защиты конструктивных элементов от воздействия газодинамического и теплового потоков – для зон, в которых скорость газового потока не превышает скорости звука [20].

Тепловая защита конструктивных элементов энергетических устройств летательных аппаратов от высокотемпературных газовых потоков, создаваемых в результате аэродинамического нагрева при входе в плотные слои атмосферы, а также при их работе, обеспечивается специальными теплозащитными материалами.

В качестве наружной тепловой защиты в конструкциях энергетических устройств широко используют многофункциональное теплозащитное покрытие, представляющее собой слоистый композиционный материал, включающий полимерную композицию на основе низкомолекулярного кремнийорганического каучука марки Стиросол (ФГУП «НИИСК»), вулканизированного катализатором холодного отверждения, и полых стеклянных микросфер, модифицированных вольфрамом. При этом полимерная композиция обеспечивает прочность и эластичность, а наполнитель – требуемые специальные характеристики покрытия [21].

В ряде случаев введение добавок позволяет увеличить теплопроводность композита и уменьшить теплоемкость. Так, в ходе проведенных экспериментальных исследований по введению в полидиметилсилоксановые каучуки различных наполнителей – полиэтилсилоксана ПЭС-5, гидроксида алюминия, гидрида титана, карбида бора, оксида цинка – отмечалось значительное изменение показателей теплопроводности и теплоемкости в зависимости от их состава и концентрации. Полученный компаунд оптимального состава на основе приведенных компонентов сможет найти применение в качестве материала твердой нейтронной защиты в составе транспортных упаковочных комплектов, предназначенных для перемещения и хранения отработанного ядерного топлива [22].

Биосовместимые материалы

Основная черта нового столетия – возрастающий интерес к повышению качества и увеличению продолжительности человеческой жизни. Достижение подобной цели, в частности, предполагает разработку и создание материалов для восстановления функций тканей и органов. Использование ксенобиотиков и аллогенных трансплантатов показывает свою ограниченность при применении, а использование искусственных материалов предыдущих поколений не в полной мере удовлетворяет врачей и пациентов. Поэтому проблема разработки материалов, обеспечивающих надежное функционирование эндопротезов, имплантатов и других изделий для медицинской техники, приобретает весьма актуальное значение в связи с неуклонным ростом требований к качеству жизни пациента.

Количество операций, проводимых с использованием имплантатов, постоянно увеличивается, что связано, прежде всего, с ростом дорожно-транспортного и бытового травматизма, а также с рядом распространенных заболеваний, таких как артроз, артрит, рак. Для закрытия дефектов и реконструкции костей в различное время использовали полимеры, соединения на основе углерода, металлы и их сплавы; для операций в области глаз – силиконовые, металлические и хрящевые эндопротезы.

Известно, что живой организм резко отторгает инородные субстанции, стараясь удалить из себя инородное тело. Кроме того, все эндопротезы из небиологических материалов, функционируя в контакте с живыми тканями, составляют биохимическую и биомеханическую систему, неизбежно травмируя их. Таким образом, очевидна необходимость создания таких материалов, которые способны длительно сосуществовать совместно с живым организмом – биосовместиться [23].

В последние годы значительно возросло число полимеров, используемых для производства медицинских изделий, в частности трубок. Для медицинского применения материал должен обладать хорошей стойкостью к окружающим тканям и жидким средам организма, иметь высокий уровень физико-механических показателей, обладать устойчивостью к химическим веществам, применяемым для стерилизации. Наиболее широко распространенными полимерными материалами являются поливинилхлорид (ПВХ), латекс, полиуретан (ПУ), силиконовые резины, стирол-этилен-бутилен-стирольные блок-сополимеры и т. д. [24].

При значительных нарушениях анатомии мелких суставов дистальных отделов конечностей, являющихся результатом механических и термических травм, довольно легко определяются показания к радикальным операциям, таким как артродез и эндопротезирование. В последнее время заместительная артропластика (эндопротезирование) мелких суставов дистальных отделов конечностей активно используется в хирургической реабилитации пациентов с поздними стадиями ревматических и дегенеративно-дистрофических заболеваний опорно-двигательного аппарата (ОДА), таких как ревматоидный артрит (РА) и первичный остеоартроз. Широкое распространение при таких видах эндопротезирования получили современные силиконовые бесцементные импланты IV поколения типа DePuy NeuFlex производства компании J&J [25].

На протяжении нескольких лет компаунд СИЭЛ, разработанный в АО «ГНИИХТЭОС», поставлялся по контрактам за рубеж, на его основе американская фирма «Мак Ган» выпускала самые совершенные по качеству эндопротезы в мире. К сожалению, как за рубежом, так и в России растет количество операций по удалению молочных желез (мастэктомия) у женщин все более и более молодого возраста. В России число таких операций составляет десятки тысяч в год. Возрастает потребность в материале марки СИЭЛ 159-356Н, предназначенном для изготовления экзо- и эндопротезов молочной железы, в связи с чем деятельность АО «ГНИИХТЭОС» направлена на удовлетворение данной потребности.

Для различных медицинских целей сотрудниками АО «ГНИИХТЭОС» разработан еще целый ряд материалов. Так, для контурной пластики мягких тканей и челюстно-лицевого протезирования предназначен компаунд марки СИЭЛ 159-467. В качестве основы для специальных самоклеящихся накладок, облегчающих заживление келоидных швов, трофических язв, ожоговых поражений кожи и т. п., применяют компаунд марки СИЭЛ 159-456. Такая накладка нетоксична, не вызывает у пациента аллергических реакций и создает комфортные условия при эксплуатации. По инициативе академика С.Н. Федорова были разработаны компаунды марок СИЭЛ 159-330 и СИЭЛ 159-465 для изготовления на их основе интраокулярных линз для больных с практически полной потерей зрения взамен ранее применяемым хрусталикам из полиметилметакрилата. Линзы на основе данных компаундов выгодно отличаются эластичностью, меньшим травматизмом при операции, более высокой прочностью и биологической инертностью. Оба компаунда пригодны для изготовления интраокулярных оптических линз для коррекции зрения у людей, страдающих различными видами аметропий – близорукостью или дальнозоркостью высоких степеней [4].

Специалистами ИМЕТ РАН ведутся работы для предотвращения возникновения рестеноза после имплантации стентов. Для решения данной проблемы на поверхность стента, изготовленного из никелида титана, наносили полимерное покрытие на основе силоксанового каучука Лестосил СМ, вулканизированного катализатором холодного отверждения. Данное покрытие отличается стойкостью к биологическим средам, высокой адгезией к материалу подложки при сохранении параметров прочности и эластичности [26].

В настоящее время одной из перспективных задач, стоящих перед медициной, является осуществление передачи лекарственного вещества в область человеческого организма, в которой размещен имплантат. Как правило, в данном случае используются биodeградируемые материалы с различной скоростью разложения и порциями лекарственных препаратов. Использование полидиметилсилоксанового каучука возможно для применения в качестве основы биodeградируемого покрытия при стентировании кишечника. Для повышения адгезии биodeградируемого покрытия к материалу стента производится нанесение слоя грунтовки на основе каучука Лестосил СМ. Наряду с обеспечением более высоких показателей адгезии, данный слой предотвращает нежелательную ионизацию тяжелыми металлами. В зависимости от концентрации лекарства в биodeградируемом покрытии, меняется интенсивность и длительность выделения полезных веществ без разложения основы [27].

Многофункциональные композиционные материалы

Начавшееся ускоренное применение композиционных материалов, очевидно, является ответом на повышение требований к современной технике в высокотехнологичных отраслях. Основными производителями композитов в мире (в объемном выражении) являются Китай (28%), США (22%) и Европейский союз (14%). Объем российского рынка составляет 0,5–1% от мирового, т. е. практически находится в пределах статистической погрешности.

Практика показала, что путем подбора состава и свойств компонентов композиционных материалов (матрицы и наполнителя, их соотношения, ориентации наполнителя) можно обеспечить получение практически любых изделий с заранее заданным сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. В настоящее время на международном и российском рынке наибольшее распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ) [28].

Кремнийорганические соединения получили широкое распространение в качестве основы при создании композитов различного назначения.

Использование полидиметилсилоксанового каучука в качестве основы синтактного пенопласта позволило повысить термостойкость, а также устойчивость к действию неблагоприятных факторов [29].

Создание ПКМ с повышенными прочностными характеристиками и термостойкостью в настоящее время весьма актуально. Так, для повышения предела прочности при сжатии и твердости композита на основе полиметилсилоксановой смолы, в ее состав вводят высокодисперсные порошки слюды и корунда [30]. Полидиэтилсилоксаны (ПЭС) преимущественно используются для производства пластмасс, стеклопластиков, смазок, присадок, резиновых изделий, а также применяются в парфюмерии и косметологии [3].

В настоящее время при изготовлении термостойких изделий радиотехнического и конструкционного назначения широкое распространение получили стеклопластики марок СК-9ФА, СК-9ХК и СК-9-70С на основе кремнийорганических связующих. Основным недостатком этих материалов является наличие в их составе пассивных растворителей, выделение которых в процессе формирования приводит к повышенной пористости готового материала (~15%), появлению внутренних напряжений и межслойных расслоений. В процессе хранения полуфабрикат (препрег) на основе кремнийорганических связующих становится жестким, что затрудняет выкладку изделий сложной конфигурации. Для решения данной проблемы в качестве связующего возможно использование пленки на основе кремнийорганических олигомеров. Наилучшие свойства имеют стеклопластики, получаемые на основе пленочного кремнийорганического связующего марки ПК-2а [31].

Силоксановые каучуки обладают низким тангенсом угла диэлектрических потерь в широком диапазоне частот, что и является одной из основных причин использования их в качестве основы для термостойких материалов радиотехнического назначения, в том числе радиопоглощающих материалов. Благодаря высоким значениям адгезии к алюминиевым и титановым сплавам, в качестве перспективной матрицы для радиопоглощающих покрытий возможно использование вулканизированных кремнийорганических блок-сополимеров. Покрытия на основе ряда кремнийорганических блок-сополимеров наносятся по лакокрасочным технологиям и могут обладать высокой степенью наполнения функциональными частицами.

Полидиметилсилоксановый каучук и многие другие силоксановые каучуки находят широкое применение при создании синтактных материалов [32]. Синтактные материалы (СМ) на основе кремнийорганического полимера и полых микросфер являются перспективными материалами для различных отраслей промышленности, благодаря легкости, высоким физико-механическим и теплофизическим характеристикам. В некоторых случаях важно, чтобы синтактные материалы обладали высокими диэлектрическими свойствами – например, при использовании их в качестве конструкционного материала на объектах специального назначения: стационарных радиолокационных станциях, радиотелескопах и т. д. Создание недорогих эффективных синтактных материалов с высокими диэлектрическими свойствами на основе полых микросфер является в настоящее время важной задачей [33]. Возможно также использование полидиметилсилоксанового каучука в качестве стабилизатора при осуществлении высокоэнергетического помола функциональных наполнителей, предотвращающего образование агрегатов частиц в течение времени, достаточного для проведения процесса последующей вулканизации с сохранением однородного состава получаемого покрытия радиотехнического назначения [34].

При создании современных летательных аппаратов, особенно в гражданском самолетостроении, в последнее время все больше ужесточаются требования к производимому шуму. Для решения задач по снижению нежелательного акустического воздействия, как правило, применяются звукопоглощающие материалы. Во ФГУП «ВИАМ» разработан звукопоглощающий материал-конструкция марки ВЗМК-1, предназначенный для использования в двигательных установках перспективных двигателей, в том числе двигателей семейства ПД. Материал ВЗМК-1 обеспечивает одновременно два механизма звукопоглощения: резонансный и диссипативный, т. е. обладает более широким рабочим диапазоном [35].

Достигается данное сочетание благодаря размещенному в ячейках стеклосотопласта пористому заполнителю определенной толщины на заданной глубине. Пористый заполнитель представляет собой открытоячеистый пенопласт, пропитанный раствором на основе вулканизированного силоксанового каучука Лестосил СМ. В результате пропитки на сложной пористой поверхности пенопласта во всем его объеме образуется полимерное покрытие, обеспечивающее уникальные свойства материала ВЗМК-1:

- высокую адгезию заполнителя к стенкам стеклосотопласта;
- низкий уровень влаго- и водопоглощения;
- широкий рабочий диапазон звукопоглощения [36].

Результаты и обсуждение

Кремнийорганические материалы получили широкое распространение в различных отраслях промышленности – транспортной сфере, авиационной и ракетной технике, медицине и строительстве.

Продукты на основе силоксановых каучуков обеспечивают высокую термическую стойкость, морозостойкость, атмосферостойкость, стойкость к действию кислорода и озона при повышенных температурах, радиационную стойкость, нетоксичность и биологическую инертность, хорошие изоляционные свойства.

Кремнийорганические лаки обеспечивают защиту средств авиационной техники и строительных конструкций от действия влаги и воды, других агрессивных сред. Лакокрасочные покрытия на основе кремнийорганических соединений легки в нанесении на поверхность защищаемых изделий, могут наноситься по известным лакокрасочным технологиям (кистевой метод, распыление с использованием пульверизатора).

Наиболее распространенное применение кремнийорганические соединения получили при создании высокотемпературных клеев-герметиков, особенно с момента появления вулканизирующих агентов холодного отверждения. В настоящее время в ведущих научно-исследовательских институтах России активно ведутся работы по восстановлению и разработке перспективных кремнийорганических материалов и герметиков. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны и рекомендованы к применению более 15 пастообразных герметизирующих композиций, включая ленточные герметики, которые нашли широкое применение в промышленности, в том числе авиационной, для герметизации элементов конструкций, остекления, приборов и т. д.

При производстве полупроводниковых приборов, а также других средств микроэлектроники за рубежом и в отечественной практике используются кремнийорганические лаки, а также заливочные кремнийорганические компаунды ускоренной вулканизации. Кремнийорганические покрытия (благодаря специфической структуре цепей полисилоксана) обладают высокими диэлектрическими свойствами, и поэтому широко применяются в качестве высокотемпературных электроизоляционных материалов.

С целью повышения термостойкости защитных покрытий в качестве их основы используется кремнийорганический лестничный блок-сополимер марки Лестосил СМ

(ФГУП «НИИСК»), отверждаемый по реакции поликонденсации. Пленки лестничных кремнийорганических полимеров обладают высокими диэлектрическими характеристиками (в том числе в СВЧ диапазоне частот), влагозащитными свойствами и биоинертностью, не оказывают коррозионного воздействия на алюминий и медь, сочетают высокую эластичность с прочностью, работают в интервале температур -60 до $+300^{\circ}\text{C}$, что обуславливает их применение в электротехнике, медицине, авиа- и ракетостроении и т. д.

Максимальной теплостойкостью из эластомерных материалов обладают силоксановые каучуки, что обуславливает их широкое распространение при создании материалов и композитов, способных работать при температуре $>250^{\circ}\text{C}$. Существует отдельная линейка кремнийорганических блок-сополимеров, на основе которых получают вулканизаты, способные работать при температурах $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$ и выше.

В последние годы значительно возросло число полимеров, используемых для производства медицинских изделий. Разработка и создание материалов для восстановления функций тканей и органов приобретает все большую актуальность. Ряд кремнийорганических материалов благодаря достаточной биосовместимости и необходимым физико-механическим свойствам получил широкое распространение при экзо- и эндопротезировании.

Кремнийорганические соединения получили широкое распространение в качестве основы при создании композитов различного назначения, в том числе при получении синтактных пенопластов, а также материалов радиотехнического назначения и звукопоглощающих материалов и конструкций.

Заключения

Благодаря уникальным свойствам (высокая термостойкость, стабильность свойств при резком перепаде температур, долговечность, влаго- и водостойкость и т. д.), кремнийорганические полимеры получили широкое распространение в различных секторах экономики, транспорте и медицине. Создание новых кремнийорганических полимеров становится крайне актуальной задачей в настоящее время. В России сделаны первые шаги по восстановлению утерянных технологий изготовления силиконовых материалов в АО «ГНИИХТЭОС», ФГУП «НИИСК» и ФГУП «ВИАМ». Однако по-прежнему наблюдается отставание от стран Запада, Японии и США.

В настоящее время также отсутствует налаженное серийное производство ряда мономерных и полимерных кремнийорганических соединений. Разработка новой кремнийорганической продукции и обеспечение ее серийного выпуска позволят расширить эксплуатационные возможности материалов различного назначения, что, в свою очередь, повысит их конкурентоспособность как на отечественном, так и на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ендовин Ю.П., Перерва О.В., Поливанов А.Н., Чекрий Е.Н., Левченко А.А. Прямой синтез органохлорсиланов: 70 лет в ГНИИХТЭОС // Химическая промышленность. 2015. №11. С. 6–20.
2. Венедиктова М.А., Наумов И.С., Чайкун А.М., Елисеев О.А. Современные тенденции в области фторсилоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S3. С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-17-24.
3. Кахраманов Н.Т., Гурбанова Р.В., Кахраманлы Ю.Н. Состояние проблемы получения, исследования и применения кремнийорганических полимеров // Евразийский союз ученых. 2016. №2 (27). С. 112–118.

4. Нанушьян С.Р. Кремнийорганические материалы ускоренной вулканизации: история создания и развития направления // Химическая промышленность сегодня. 2015. №11. С. 21–26.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагоднасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
7. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. №6. С. 32–35.
8. Еськов А.А., Лебедева Т.А., Белова М.В. Лакокрасочные материалы с пониженным содержанием летучих веществ (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №6. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-8-8.
9. Сухарева К.В., Андриасян Ю.О., Михайлов И.А., Попов А.А. Защитные покрытия на основе синтетических каучуков // Пластические массы. 2015. №11–12. С. 57–63.
10. Савенкова А.В., Чурсова Л.В., Елисеев О.А., Глазов П.А. Герметики авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3 (24). С. 40–43.
11. Минасьян Р.М., Поливанов А.Н., Минасьян О.И. Основные направления работ ГНИ-ИХТЭОС в области кремнийорганических клеев-герметиков // Химическая промышленность сегодня. 2015. №11. С. 28–32.
12. Краснов Л.Л., Елисеев О.А., Кирина З.В., Венедиктова М.А., Роговицкий В.А. Исследование и модификация термостойкого герметизирующего состава и разработка технологии изготовления ленточного герметика на его основе // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №4 (52). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 04.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-8-8.
13. Чигорина Т.М. Новые сшивающие агенты для кремнийорганических композиций // Актуальные проблемы химии, биологии и биотехнологии: матер. X Всерос. науч. конф. Владикавказ, 2016. С. 247–249.
14. Неёлова О.В. Кремнийорганическая композиция для защиты изделий электронной техники с повышенными адгезионными свойствами и термо- и морозостойкостью покрытий // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. №9. С. 86–92.
15. Неёлова О.В., Газзаева Р.А., Коблова Л.Б. Защитные покрытия на основе кремнийорганических лестничных блок-сополимеров, применяемые в микроэлектронике // Фундаментальные исследования. 2016. №2–1. С. 76–80.
16. Хорошавина Ю.В., Французова Ю.В., Николаев Г.А. Свойства вулканизатов на основе полифенилсилсесквиоксанполидиметилсилоксанового блок-сополимера // Каучук и резина. 2015. №1. С. 10–11.
17. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Наумов И.С., Елисеев О.А. Эластомерные материалы повышенной теплостойкости (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №2 (50). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-6-6.
18. Копылов В.М., Ковязин В.А., Костылева Е.И., Федоров А.Ю., Ковязин А.В. Термостабилизация и керамообразование силиконовых резин // Каучук и резина. 2015. №5. С. 52–59.
19. Минасьян Р.М., Поливанов А.Н., Минасьян О.И. Пути повышения термостойкости кремнийорганических эластомерных материалов // Клеи. Герметики, технологии. 2015. №7. С. 24–26.

- 20.Краснов Л.Л., Кирина З.В., Елисеев О.А., Меншутина Н.В. Безусадочный пенотеплозащитный материал ФКМ-С-1Б // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2015. №6. С. 19–24.
- 21.Шайдурова Г.И., Васильев И.Л., Карманова Л.И. Разработка и подтверждение работоспособности ремонтного состава для наружного теплозащитного покрытия // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. №36. С. 49–63.
- 22.Волков Д.П., Егоров А.Г., Мироненко М.Э. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. №2. С. 287–293.
- 23.Любченко О.Д. Разработка современных материалов для эндопротезирования // Actualscience. 2016. Т. 2. №7. С. 5–6.
- 24.Широкова Е.С., Веснин Р.Л., Хусаинов А.Д. Материалы на основе термоэластопластов для применения в медицине и фармацевтической промышленности // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. №11. С. 106–110.
- 25.Дудариков С.А., Емец А.Н., Шарофеев А.Н. и др. Эндопротезирование мелких суставов кисти и стопы // Амурский медицинский журнал. 2015. №4 (12). С. 196–198.
- 26.Севостьянов М.А., Байкин А.С., Насакина Е.О., Леонов А.В., Каплан М.А., Краев И.Д., Колмаков А.Г. Исследование механических свойств полимерных пленок для медицинских изделий // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. М., 2016. С. 366.
- 27.Севостьянов М.А., Сергиенко К.В., Конушкин С.В., Краев И.Д., Колмаков А.Г. Нанесение биостабильного полимерного покрытия на никелид титана для медицинских изделий // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. М., 2016. С. 85.
- 28.Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
- 29.Чухланов В.Ю., Криушенко С.С. Тонкослойные покрытия на основе высоконаполненных синтактичных пенопластатов с силоксановым связующим // Химическая промышленность сегодня. 2014. №7. С. 44–51.
- 30.Клюшников С.А., Кочетков А.И., Морозова М.Р. Оптимизация состава дисперсной фазы для создания термостойких и высокопрочных композитов на основе полиметилсилоксановой смолы // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. XXX. №10. С. 34–36.
- 31.Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Пленочные кремнийорганические связующие для стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 15–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-15-18.
- 32.Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г. Исследование диэлектрических свойств синтактических пен на основе кремнийорганического связующего // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №8–1. С. 26–29.
- 33.Михайлов В.А. Синтактичные материалы с высокими диэлектрическими свойствами на основе кремнийорганического полимера // Химические науки. 2015. №12. С. 47–50.
- 34.Краев И.Д., Говоров В.А., Попков О.В., Филонова Е.В., Шульдешов Е.М., Юрков Г.Ю. Получение тонкодисперсных порошков феррита никеля NiFe_2O_4 методом высокоэнергетического помола на бисерной мельнице замкнутого контура // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 24–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-24-30.
- 35.Шульдешов Е.М., Платонов М.М. Звукопоглощающий материал с расширенным частотным диапазоном эффективного поглощения для перспективных двигательных установок // Сб. докл. конф. «Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности». М.: ВИАМ, 2015. Ст. 12.
- 36.Полимерный звукопоглощающий материал и способ его изготовления: пат. 2612674 Рос. Федерация; опубл. 13.03.17.