

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-12-283-26-35

*А. В. Купряшов, С. В. Телегин, И. Я. Шестаков***АНАЛИЗ НАПОЛНИТЕЛЕЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ (ОБЗОР)****Сибирский государственный университет науки и технологий
им. ак. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск**

E-mail: KupryashovAndrey@yandex.ru; yakovlevish@mail.ru

В авиаракетной технике назначение многофункционального покрытия состоит: в придании силовым элементам конструкции летательного аппарата дополнительной жесткости, прочности и устойчивости; в уменьшении коэффициента аэродинамического сопротивления летательного аппарата; в поглощении и отражении ионизирующего и радиоизлучения; в защите от перепадов тепловых возмущений; в подавлении вредного влияния электродинамических и гравитационных полей; в противодействии негативному воздействию геомагнитных и ионосферных факторов; в предотвращении коррозии и эрозии поверхностного слоя; в повышении атмосферостойкости и стойкости к воздействию озона. В современной аэрокосмической технике непрерывно разрабатываются новые виды и формы наполнителей для композиционных материалов и покрытий. В данной работе представлен анализ многофункциональных покрытий ракетно-космической техники с различными типами наполнителей, а именно: часто применяемые металлы (щелочноземельные, переходные), редкоземельные элементы и их оксиды, микростеклосферы и углеродные микроструктуры. Также в работе представлен анализ состава композиций наполнителей современных авиакосмических защитных покрытий полифункционального назначения, проанализированы зарубежные эффективные технические решения внешней защиты летательных аппаратов. Результаты проведенного исследования будут полезны при разработке новых составов наружной защиты летательных аппаратов от внешних негативных факторов.

Ключевые слова: многофункциональное покрытие, теплозащита, электромагнитное поглощение, коррозионная стойкость, тонкодисперсный наполнитель, радиационная стойкость.

Помимо силовых воздействий, авиационные и аэрокосмические аппараты в процессе эксплуатации постоянно подвергаются широкому комплексу внешних физических влияний разнопланового характера: ионизирующие излучения, высокие температурные возмущения, электромагнитные поля, климатические факторы [1–5]. Поэтому создание наружного материала для защиты ракетно-космических объектов (многофункционального защитного покрытия), обладающего огромным спектром условий по отражению и поглощению от внешних агрессивных факторов, является актуальной задачей в современной аэрокосмической технике. Также важным фактором является защита летательного аппарата от космического ионизирующего излучения [6; 7].

Современное многофункциональное покрытие, используемое для защиты корпуса и наружных узлов летательного аппарата в ракетно-космической технике от внешнего агрессивного воздействия, имеет сложный состав и структуру. Оно состоит из следующих основных компонентов: низко- или высокомолекулярная полимерная основа, наполнитель (основной компонент), отвердитель (катализатор) и вспомогательные вещества [8–10].

В качестве полимерной основы широкое распространение получили эластомеры, полученные из: натурального каучука, синтетических полихлоропренов, полибутадиенов, полиизопренов, фторированных эластомеров, полиуретановых эластомеров, хлоросульфированных полиэтиленов, сополимеров этилена и диена, сополимеров изопрена и изобутилена, стиролизопренстирольных блок-полимеров. Также стоит отметить, что в качестве основы полимерных композиций применяются полиамиды, полиэтилентерефталат, ароматические полиимиды, углеводородные каучуки, поликарбонат, полиакрилаты, полиэтилен, полисилоксаны, сополимеры тетрафторэтилена с гексафторпропиленом и этиленом, эпоксидные и фенолоформальдегидные смолы, поливинилхлорид [11–14].

В качестве наполнителя в современной ракетно-космической технике используют огромное число различных химических элементов и соединений органического и неорганического происхождения. Среди этого множества можно выделить несколько широко применяемых категорий наполнителей: представители семейства металлов (щелочноземельные, переходные), редкоземельные элементы и их оксиды, микростеклосферы и углеродные микроструктуры.

С целью систематизации и углубления знаний о способах защиты летательных аппаратов от внешних агрессивных факторов воздействия, при помощи композитного мультифункционального покрытия проведен информационно-аналитический обзор публикаций по данной тематике.

Наполнитель многофункционального покрытия, содержащий металл

Перспективным направлением получения новых защитных материалов авиакосмического назначения является синтезирование композитных материалов на основе высокополимерной

матрицы и наполнителя в виде металлического порошка. В работе [15] исследованы ключевые этапы придания полимерному композитному покрытию функциональных свойств, а именно снижения интенсивности электромагнитного излучения за счет времени обработки в планетарной шаровой мельнице наполнителя. Наполнителем является тонкодисперсный порошок из стали $\text{Cr}_{17}\text{Ni}_2$. Варьируя время обработки, а также массовую долю наполнителя, были исследованы защитные свойства покрытий. На рис. 1 представлена зависимость времени измельчения 100 г наполнителя от энергии поглощения (ослабления) электромагнитных волн.

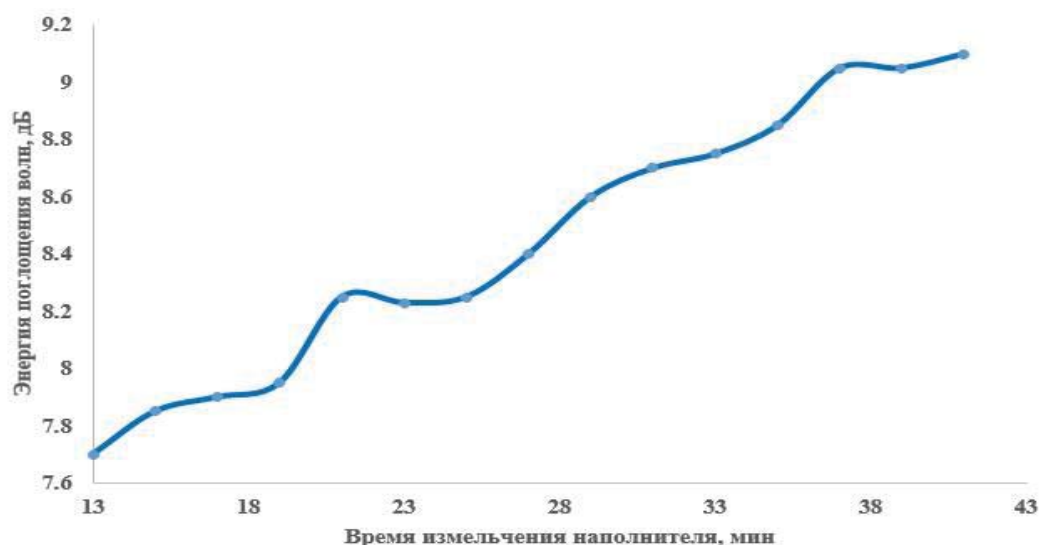


Рис. 1. Зависимость энергии поглощения электромагнитных волн от времени измельчения наполнителя

Интересен состав покрытия [16], включающий: 65÷69 мас. час. тонкодисперсного порошка карбонильного железа, 19÷22 мас. час. эпоксидной смолы, 30÷33 мас. час. полиуретанового эластомера, 0.4÷0.8 мас. час. силанового связующего агента и 25÷35 мас. час. смешанного растворителя из бутанона (этилметилкетона) и циклогексанона. Поглощающее покрытие может быть использовано в широком значении частотных диапазонов и обеспечивает «эффект потери» энергии ослабления волн на 3,5 дБ в X-диапазоне и частоты волн Ku-диапазона 12÷18 ГГц длиной волн до 1,67 см.

Титан является одним из наиболее предпочтительных металлов, используемых в составе многофункциональных покрытий ракетно-космической техники. Микropорошок из карбида титана полезно используется в качестве основного компонента антирадарного покрытия

[17], которое эффективно поглощает электромагнитные волны частотой более 17 ГГц. При этом максимальная энергия поглощения электромагнитных волн 25 дБ. Данное покрытие также полезно используется в строительстве.

Покрытие [18] на основе полиуретанового каучука и диоксида титана содержанием 13.7÷16.7 мас. час. имеет высокий коэффициент поглощения инфракрасного излучения.

В авиакосмической научно-исследовательской технике КНР полезно применяется в качестве внешней защиты топливного бака покрытие [19], состоящее из: 50÷60 мас. час. акриловой смолы, 25÷35 мас. час. диоксида титана, 8÷10 мас. час. ксилола, 5÷8 мас. час. n-бутил-ацетата, 1.5÷3.0 части диспергирующего агента и 0.5–1.0 мас. час. пеногасителя. Такое отражающее изоляционное покрытие обладает свойством экранирования ультрафиолетовых

лучей и инфракрасных лучей, эффективно препятствует теплопередаче и обладает высоким отражающим теплоизоляционным эффектом.

В авиационной технике для защиты поверхности топливного бака самолета применяется герметизирующее покрытие [20], состоящее из бутадиенового карбоксилнитрильного каучука и порошка коллоидного диоксида кремния. Данное покрытие имеет высокий показатель адгезии к материалу топливного бака и характеризуется отличной маслостойкостью, термостойкостью. Для защиты трубопроводов топливной системы авиационной и ракетной техники широко применяется покрытие [21], которое состоит из полисульфидного каучука (тиокол) и наноразмерного диоксида кремния. Высокая температура плавления, низкая плотность ($2,65 \text{ г/см}^3$) и молярная масса ($60,08 \text{ г/моль}$) диоксида кремния способствует приданию высоких значений показателей стойкости к старению защитного покрытия [22], коррозионной стойкости в кислотной и щелочной средах, что обеспечивает длительный срок службы элементов топливной системы.

Большое распространение в последнее десятилетие получили наполнители, состоящие из различных видов феррита, а именно феррита кобальта, марганца, цинка, гадолиния и т. д. [23] Чаще всего основой многофункциональных покрытий, армированных ферритом, является синтетический каучук [24]. Феррит марганца используется в радиационно-стойких покрытиях, поглощающих электромагнитные волны с большим диапазоном частот; феррит бария является основой волнопоглощающих покрытий с многополосным, широкополосным поглощающим эффектом; феррит титана – основа аэрокосмических антикоррозионных кислото-стойких покрытий [7; 23; 24].

Реже в качестве полимерной матрицы используют синтетические смолы. При армировании синтетической смолы ферритом гадолиния было получено поглощающее радиолокационные волны покрытие, которое имеет преимущества небольшой толщины, малой массы, широкой полосы частот поглощения и высокой поглощающей способности [7]. В составе покрытия на основе эпоксидной смолы [25] феррит цинка (наполнитель) предназначен для поглощения электромагнитного излучения, создаваемого внутренним электронным оборудованием космического аппарата.

Наполнитель из порошков редкоземельных элементов

Применение в промышленном производстве редкоземельных элементов позволяет получить уникальные по свойствам и качеству технические продукты и изделия [26]. В производстве различных защитных материалов и покрытий ракетно-космической техники среди редкоземельных элементов наибольшее распространение получили гадолиний и тантал.

Изотопы гадолиния обладают высоким коэффициентом захвата тепловых нейтронов, что наделяет возможностью применения в композитных защитных материалах для нейтрализации нейтронного излучения [27; 28]. Покрытие [29] состоит из: $500 \div 625 \text{ мас. час.}$ тонкодисперсного порошка гадолиния, $400 \div 500 \text{ мас. час.}$ гидроксикариловой смолы, $150 \div 250 \text{ мас. час.}$ *n*-бутилацетата, $3 \div 5 \text{ мас. час.}$ смачивающего диспергатора, $4 \div 6 \text{ мас. час.}$ пеногасителя. Данное теплоотражающее изоляционное покрытие обладает отличными антикоррозионными свойствами и характеризуется высокими показателями отражательной способности теплового излучения (коэффициент отражения $k_o \geq 0.9$), низкой степенью принятия теплового излучения на поверхность покрытия $do \leq 0.1$, высоким коэффициентом полусферического излучения $Q_o \geq 0,87$, что в конечном итоге приводит к эффективному сдерживанию и невозможности проникновения потока тепловой энергии внутрь защищаемого изделия [30].

Помимо отражения теплового излучения тонкодисперсный порошок гадолиния полезно применяется в составе покрытий, предназначенных для электромагнитного поглощения [31]. Известно покрытие [32] с наполнителем из порошка гадолиния, которое результативно поглощает электромагнитные волны, при этом характеризуется малой толщиной, низким весом, благодаря чему обеспечивается многополосное частотное экранирование.

Важным способом защиты от электромагнитного и ионизирующего излучения является создание защитных экранов, в том числе на основе различных каучуков. Экран выполняется в виде нескольких пластин, соединенных между собой армирующей сеткой. В работе [33] описан способ создания эффективного экрана по защите от различных видов излучения. Наполнителем слоев экрана является порошок из оксида гадолиния, характеризующийся высокой плотностью ($7,41 \text{ г/см}^3$) и высоким значением температуры плавления ($2420 \text{ }^\circ\text{C}$). Благо-

даря этим характеристикам полученный экран эффективно подавляет негативное воздействие электромагнитного и теплового полей, а также обладает важным преимуществом при применении в конструкциях летательных аппаратов – малой толщиной и весом.

В современной аэрокосмической и авиационной технике для защиты от негативного влияния инфракрасного излучения применяют покрытия и краски с наполнителем из порошка лантана или смеси редкоземельных элементов на основе лантана. В работе [34] описана возможность применения концентрированной пульпы, полученной измельчением в шаровой мельнице смеси редкоземельных элементов на основе лантана. В результате смешивания полученного наполнителя с жидким стеклом была получена маскирующая инфракрасная краска. Данная краска помимо способа холодного напыления также может наноситься на изделие при использовании метода окунания. В результате получен материал с низким коэффициентом излучения, высоким коэффициентом поглощения инфракрасного излучения, простой в эксплуатации, экономичный в получении и использовании.

Стоит отметить, что в последние годы в космической промышленности активно применяются редкоземельные металлы: иттрий, церий, празеодим, неодим. Они постепенно становятся незаменимы в составе: облицовок кумулятивных зарядов; внешней части систем наведения, радаров и навигационных систем; обмоточного материала кабельной системы электроприводов и наружной системы защиты реактивных двигателей.

Наполнитель из микростеклосфер

Стекланные наполнители вводят в термоактивные и термопластичные полимеры для создания защитных покрытий мультифункционального назначения. К основным достоинствам использования их в композитных материалах относят: повышение физико-химических показателей, понижение коэффициента трения, улучшение диэлектрических свойств. Недостатками являются: низкая адгезия к небольшому количеству полимерных основ, снижение прочности во влажных средах.

Основные виды стекланных волокон производятся в форме круглого сечения диаметром $3\div 10$ мкм и называются микростеклосферами. Полые микростеклосферы нашли широкое применение в качестве основного компонента радиопоглощающих материалов и покрытий [35]. В работе [36] описан состав многофункционального материала на основе диэлектрического связующего, который обладает пониженным коэффициентом отражения, увеличенным коэффициентом перекрытия частотного диапазона по уровню – 10 дБ при сохранении низкой плотности материала. Авторами установлено, что использование стекланных микросфер в составе полимерного покрытия придает возможность необходимого сочетания действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости радиопоглощающего материала при сохранении низкой плотности всего материала. На рис. 2 представлена зависимость содержания микростеклосфер в составе радиопоглощающего материала от основных радиопоглощающих характеристик материала.

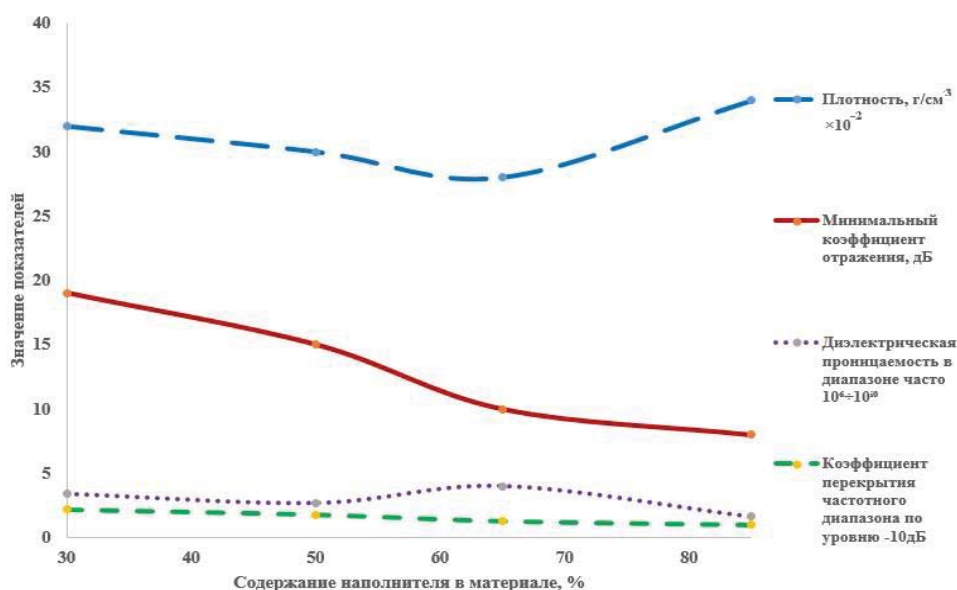


Рис. 2. Зависимость содержания микростеклосфер в составе радиопоглощающего материала от основных радиопоглощающих характеристик материала

Из рис. 2 видно, что оптимальное значение содержания наполнителя варьируется от 30 % до 50 %, наделяя защитный материал наилучшими значениями радиопоглощающих характеристик. Данный материал позволяет обеспечить электромагнитную совместимость всех элементов системы бортового радиолокационного оборудования, обеспечивая надежность и безопасность полета, при этом защищая кабельную систему и радиоаппаратуру летательного аппарата от ионизирующего излучения.

Микростеклосферы обширно применяются в составе теплозащитных многофункциональных покрытий. Как правило, полимерной основой таких покрытий служат: силиконовый каучук [37], поливинилхлоридный пластикат [38], бутадиен-нитрильный каучук [39], силоксановый блок-сополимер [40]. Получаемые покрытия одновременно обладают полезными функциями огнестойкости, теплоизоляции и поглощения электромагнитных волн широкой полосы частот, при этом обладая малой плотностью, что делает их полезными в качестве внешней защиты космических аппаратов.

Наполнитель из углеродных микроструктур

Углеродные микроструктуры получили широкое распространение в качестве наполнителей авиационной и ракетно-космической техники. Это связано с их уникальными характеристиками и особыми свойствами получаемых защитных покрытий, такими как высокая термостойкость, стабильность свойств при резких температурных перепадах, атмосферостойкость, повышенный коэффициент радиопоглощения, улучшенные свойства электромагнитного экранирования, долговечность [41]. Наибольшее распространение в качестве составляющей защитных материалов и покрытий среди углеродных структур получили графитовый порошок и графеновые микроструктуры.

Благодаря низкому значению удельного веса и высокой плотности утряски $0,6 \div 1,0 \text{ г/см}^3$ графитовый порошок применяется в составе волнопоглощающих материалов. Покрытие [42] обладает повышенными характеристиками поглощения волн из-за квантового размера частиц графитового порошка. Функциональное покрытие на основе диенового синтетического каучука и порошка графита поглощает излучение в различных диапазонах частот. Оно универсально, так как свойства волнопоглощения получены путем регулировки зернистости, концентрации смешивания и толщины.

В последнее время возрос интерес к внедрению в состав композиций защитных покрытий новых углеродных материалов, наибольшее распространение получили графен, углеродные нанотрубки и модифицированные углеродные волокна.

Графен входит в состав волнопоглощающих многофункциональных покрытий, полимерной основой таких покрытий чаще всего служат: натуральный каучук [43], эпоксидная смола [44], стиролизопренстирольный блок-полимер [45]. Графеновый наполнитель играет важную роль в поглощении электромагнитных волн и в создании материалов электромагнитного экранирования. Порошок графена за счет низкой поверхностной плотности одновременно обеспечивает преломление и отражение электромагнитных волн в композитном материале и в то же время увеличивает полосу и глубину поглощения радиолокационных волн, таким образом достигается высокая поглощающая способность покрытия.

Инновационным решением инженеров компании «Qingdao xuanwei coating material co ltd» (КНР) стала замена графена углеродными нанотрубками в составе радиопоглощающего покрытия. В результате радиопоглощающее покрытие [46] на основе гидроксилакриловой смолы, углеродных нанотрубок и бутилацетата обладает высокой способностью поглощать волны, малой поверхностной плотностью и малой массой.

Ввод в состав углеродных нанотрубок позволяет снизить массу, плотность, но при этом повысить поглощающие свойства радиационно-защитных покрытий [41].

Модифицированные углеродные волокна используются в составе многофункциональных покрытий летательных аппаратов для повышения термостойкости, водостойкости и коррозионной стойкости покрытий, а также улучшения антистатических характеристик покрытия [47]. Интересен состав покрытия [48]: 25÷32 мас. час. фенолоформальдегидной смолы холодного отверждения, 23÷28 мас. час. модифицированного углеродного волокна, 7÷9 мас. час. связующего 13÷18 мас. час. диспергатора, 31÷35 мас. час. растворителя. Удельный вес данного покрытия составляет $1,1 \text{ г/см}^3$, коэффициент затухания электромагнитной волны достигает значения 0,98. То есть применение модифицированных углеродных волокон способно решить проблемы, связанные с большим удельным весом защитного покрытия и низкой

способностью поглощать электромагнитное излучение.

Выводы

Приведенный информационный анализ показал большое количество используемых наполнителей, применяемых в ракетно-космической технике для защиты от внешнего негативного воздействия. Их назначение разнообразно: теплозащита, поглощение и отражение радио- и электромагнитного излучения, эрозионная и коррозионная стойкость, кислотно- и щелочностойкость, предотвращение вредного инфракрасного и ультрафиолетового излучения, улучшение физико-механических характеристик, придание дополнительной прочности и жесткости отдельных элементов конструкций, то есть свойства многофункциональных покрытий зависят от характеристик применяемых наполнителей.

Стоит отметить, что углеродные микро-структуры получили широкое распространение в качестве основного компонента многофункциональных покрытий в авиационной и ракетно-космической технике. Это связано с уникальными свойствами получаемых защитных покрытий: высокая термостойкость, стабильность свойств при резких температурных перепадах, атмосферостойкость, повышенный коэффициент радиопоглощения, улучшенные свойства электромагнитного экранирования, долговечность. Получение новых углеродных микро-структур является актуальной задачей для решения большого количества задач, направленных на улучшение качества, структуры и расширения функционального назначения защитных покрытий.

По результатам исследования можно проследить актуальную тенденцию – разработка смесовых наполнителей, состоящих из двух и более разных по природе наполнителей. Совместное использование разных наполнителей способствует повышению функциональных характеристик защитного покрытия.

Проведенное аналитическое исследование позволяет подобрать варианты состава композиции для получения композитного многофункционального покрытия ракетно-космической техники с различными наполнителями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sun, Y., Li C., Fu D., Hu H., Bai Z., Geng H., Gao Y., Zhu Y., Wang H. A novel high anti-corrosion performance polymer based composite coating with new functional fillers //

Progress in Organic Coatings. 2022. Vol. 162. Article number 106603.

2. Gao, H., Liu Y., Wang G., Li S., Han Z., Ren L. A multifunctional graphene composite coating with switchable wettability // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 415. Article number 128862.

3. Yang, J., Liu H., Gao, W. Su L., Jiang K. Effect of different fillers on the microstructural evolution and high temperature oxidation resistance of Mo-Si-B coatings prepared by pack cementation // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2021. Vol. 100. Article number 105625.

4. Liu, Z., Sun Q., Song Y., Yang J., Chen X., Wang H., Jiang Z. High-emissivity composite-oxide fillers for high temperature stable aluminum chromium phosphate coating // Surface and Coatings Technology. Vol. 349. P. 885–893.

5. Купряшов, А. В. Современные многофункциональные материалы и покрытия ракетно-космической техники на каучуковой основе / А. В. Купряшов, И. Я. Шестаков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2022. – № 2 (299). – С. 3–10.

6. Wang, C., Wang Z., Liu S., Luo H., Fan W., Liu Z., Liu F., Wang H. Anti-corrosion and wear-resistant coating of waterborne epoxy resin by concrete-like three-dimensional functionalized framework fillers // Chemical Engineering Science. 2021. Vol. 242. Article number 116748.

7. Купряшов, А. В. Анализ смесовых наполнителей многофункциональных покрытий авиационной и ракетно-космической техники / А. В. Купряшов, И. Я. Шестаков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 12 (216). – С. 535–541.

8. Khotbehsara, M. M., Manalo A., Aravinthan T., Ferdous W., Benmokrane B., Nguyen K. T. Q. Synergistic effects of hygrothermal conditions and solar ultraviolet radiation on the properties of structural particulate-filled epoxy polymer coatings // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 277. Article number 122336.

9. Trivedi, D. N., Rachchh N. V. Graphene and its application in thermoplastic polymers as nano-filler- A review // Polymer. Vol. 240. Article number 124486.

10. Jakab, B., Panaiteanu I., Gamsjäger N. The action of fillers in the enhancement of the tribological performance of epoxy composite coatings // Polymer Testing. 2021. Vol. 100. Article number 107243.

11. Günthner, M., Schütz A., Glatzel U., Wang K., Bordia R.K., Greißl O., Krenkel W., Motz G. High performance environmental barrier coatings, Part I: Passive filler loaded SiCN system for steel // Journal of the European Ceramic Society. 2011. Vol. 31. Is.15. – P. 3003–3010.

12. Tong, C., Zhang S., Zhong T., Fang Z., Liu H. Highly fibrillated and intrinsically flame-retardant nanofibrillated cellulose for transparent mineral filler-free fire-protective coatings // Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 419. Article number 129440.

13. Trovato, V., Teblum E., Kostikov Y., Pedrana A., Re V., Nessim G.D., Rosace G. Electrically conductive cotton fabric coatings developed by silica sol-gel precursors doped with surfactant-aided dispersion of vertically aligned carbon nanotubes fillers in organic solvent-free aqueous solution // Journal of Colloid and Interface Science. 2021. Vol. 586. – P. 120–134.

14. Huo, L., Liu B., Li H., Cao B., Hu X.-C., Fu X.-P., Jia C., Zhang J. Component synergy and armor protection induced superior catalytic activity and stability of ultrathin Co-Fe spinel nanosheets confined in mesoporous silica shells for ammonia decomposition reaction // Applied Catalysis B: Environmental. 2019. Vol. 253. – P. 121–130.

15. Panin, S. V., Yazykov S.Yu., Dammer V.Kh. Functionalized Composite Coatings Based on Filled Powder Paint Processed in Planetary Ball Mill // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 770. – P. 93–98.
16. Пат. 103073981 (A) KHP, МПК C08G 18/10, C09D 175/06. High-temperature resistance radar wave absorbing coating and preparation method thereof / D. Longjiang, S. Zhenjiang, X. Jianliang, L. Difei, P. Jianing, T. Yupei. Univ Electronic Science & Tech. Заявка № 201210590783; заявл. 21.12.2012; опубл. 01.05.2013.
17. Пат. 101838501 (A) KHP, МПК C09D 201/00, C09D 5/32, C09D 7/12. Oily antiradar coating and preparation method thereof / S. Gong, M. Wu, S. Yang, J. Zhuang. Fujian Quanzhou Jiantian Paintings Co Ltd. Заявка № 201010191377; заявл. 26.05.2010; опубл. 22.09.2010.
18. Пат. 102732145 (A) KHP, МПК C08G 18/67, C08G 18/79. Bi-component polyurethane coating with low infrared emissivity and preparation method thereof / Y. Liu, H. Jiu, Z. Li, G. Zhao, X. Liu. Univ North China. Заявка № 201210169104; заявл. 28.05.2012; опубл. 17.10.2012.
19. Пат. 109401476 (A) KHP, МПК C09D 133/00, C09D 5/08. Reflective insulation coating for oil tank and preparation method thereof / L. Jinqing, L. Changyong, W. Quanzhong. Guangxi Nanning Weiyi Anti Corrosion Tech Co Ltd. Заявка № 201811304357; заявл. 04.11.2018; опубл. 01.03.2019.
20. Пат. 110577772 (A) KHP, МПК C09D 7/20, C09D 7/61. Aircraft integral fuel tank surface protection sealing coating / C. Bao, C. Sun, G. Liu, P. Qin, S. Wu. AECC Beijing Inst Aeronautical Mat. Заявка № 201910797629; заявл. 27.08.2019; опубл. 08.07.2020.
21. Пат. 108559382 (A) KHP, МПК C09D 181/04, C09D 5/08. Polysulfide rubber modified epoxy resin anti-corrosion and anti-sewage coating, and preparation method and system thereof / K. Zhang, Y. Cao, J. Tu, X. Wang, W. Huang, J. Wang, P. Zhang. Univ Hainan. Заявка № 201810497310; заявл. 22.05.2018; опубл. 01.03.2019.
22. Пат. 107353786 (A) KHP, МПК C09D 167/06, C09D 5/08. Anti-corrosion photocurable coating / B. Huang. Chengdu Nashuo Technology Co. Заявка № 201710606454; заявл. 24.07.2017; опубл. 19.06.2018.
23. Kruzalak, J., Kvasnicakova A., Dosoudil R., Hudec I., Vilcakova J. Influence of curing system composition and aging on the performance of rubber magnets based on NBR and EPDM // *Polymer-plastics technology and materials*. 2022. Vol. 62 (2). – P. 177–187.
24. Kruzalak, J., Kvasnicakova A., Hlozekova K., Dzukanova M., Gregorova J., Vilcakova J., Goralik M., Hronkovic J., Preto J., Hudec I. Electromagnetic absorption characteristics of magnese-zinc ferrite and multiwalled carbon nanotube-filled composites based on NBR // *Rubber chemistry and technology*. 2022. Vol. 95 (2). – P. 300–321.
25. Пат. 103945680 (A) KHP, МПК C09D 167/06, C09D 5/08. Power box capable of absorbing electromagnetic radiation and manufacturing method of power box / Y. Yang. Ninghai county yancang mountain electric power equipment factory. Заявка № 201410162676; заявл. 22.04.2014; опубл. 23.07.2014.
26. Fang, J., Bai X.-T., Qi L., Vukanti R., Ge Y. Rare-earth metal oxide nanoparticles decouple the linkage between soil bacterial community structure and function by selectively influencing potential keystone taxa // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 298. Article number 118863.
27. Тырина, Л. М. Модифицированные переходными и редкоземельными металлами оксидные покрытия на алюминии и их активность в реакции окисления CO / Л. М. Тырина [и др.] // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2014. Т. 50, № 4. С. 420–427.
28. Patil, A. S., Patil A. V., Dighavkar C. G., Adole V. A., Tupe U.J. Synthesis techniques and applications of rare earth metal oxides semiconductors: A review // *Chemical Physics Letters*. 2022. Vol. 796. Article number 139555.
29. Пат. № 106893436 (A) KHP, МПК C09D 133/14, C09D 5/33, C09D 7/12. Heat-reflecting insulating coating for two-component metallic external surface, and preparation and use methods thereof / J. Li. Заявка № 201510963818; заявл. 21.12.2015; опубл. 27.06.2017.
30. Котов, С. А. Получение композиционного материала с редкоземельными металлами методом прокатки / С. А. Котов [и др.] // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2018. Т. 16, № 3. – С. 134–136.
31. Kang, H., Peng H., Kang Y., Hao Y., Yan X., Li L., Liu F., Wang W., Lei Z. Porous rare earth-transition metal bi-metallic oxide nanoparticles oxygen electrocatalyst for rechargeable Zinc-air battery // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2022. Vol. 134. Article number 104280.
32. Пат. 107148207 (A) KHP, МПК B32B 9/04, H05K 9/00. Composite microsphere particle electromagnetic wave absorption filler and electromagnetic shielding material with same / B. Lin. Заявка № 201710449180; заявл. 14.06.2017; опубл. 08.09.2017.
33. Пат. 106188690 (A) KHP, МПК C08K 3/06, C08L 23/16. Electromagnetic noise suppression sheet and preparation method thereof / B. Hao, L. Liu, Y. Ye. Заявка № 201610556247; заявл. 12.07.2016; опубл. 07.12.2016.
34. Пат. 103614058 (A) KHP, МПК C09D 123/16. Infrared camouflage paint as well as preparation method and application thereof / Z. Mao, W. Wang. Заявка № 201310571785; заявл. 13.11.2013; опубл. 05.03.2014.
35. Пат. 101440250 (A) KHP, МПК C09D 123/34. Radar invisible coating / C. Yue. No. Заявка № 200710187656; заявл. 21.11.2007; опубл. 27.05.2009.
36. Пат. 2234775 C1 РФ, МПК H01Q 17/00. Радиопоглощающий материал / В. В. Лепешкин [и др.]. Заявка № 2003100064/09; заявл. 09.01.2003; опубл. 20.08.2004.
37. Пат. 110669429 (A) KHP, МПК B05B 16/20, C09D 7/65. Spacecraft silicone rubber polymer material protective coating and application method and device thereof / W. Shi. No. Заявка № 201910875662; заявл. 17.09.2019; опубл. 10.01.2020.
38. Пат. 102746823 (A) KHP, МПК B32B 5/28, C09K 3/00. Material with characteristics of fire retardation, thermal insulation and wave absorption, and preparation method thereof / Z. Wei, W. Sijie, Y. Helong. Armored forces engineering academy of PLA. Заявка № 201210182757; заявл. 05.06.2012; опубл. 24.10.2012.
39. Пат. 2628784 C1 РФ, МПК C08K 13/02, C08L 9/00. Состав для производства теплозащитного покрытия и способ его изготовления / Е. Н. Каблов, Л. Л. Краснов, З. В. Кирина. Заявка № 20160136112; заявл. 07.09.2016; опубл. 22.08.2017.
40. Пат. 2558103 C2 РФ, МПК C08D 183/04, C08L 83/04. Теплоизоляционный полимерный материал и способ его получения / А. Ю. Исаев. Заявка № 2012112615/05; заявл. 02.04.2012; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 21.
41. Купряшов, А. В. Использование углеродного наполнителя в качестве основного компонента многофункциональных материалов и покрытий в ракетно-космичес-

кой технике // Упрочняющие технологии и покрытия / А. В. Куприяшов, И. Я. Шестаков. – 2021. Т. 17. № 6 (198). – С. 282–288.

42. Пат. 104845044 (А) КНР, МПК C08K 3/04. Coated wave-absorbing material prepared from nano-graphite powder and preparation method of coated wave-absorbing material / Y. Jiang. Заявка № 201510214413; заявл. 29.04.2015; опубл. 19.08.2015.

43. Пат. 107841123 (А) КНР, МПК C08K 13/04. Three-dimensional graphene-based wave-absorbing meta-material substrate and preparation method thereof / K. Li. Luoyang advanced equipment tech co ltd. Заявка № 201610827830; заявл. 18.09.2016; опубл. 27.03.2018.

44. Пат. 109648952 (А) КНР, МПК B32B 17/02, B32B 27/28. Gradient-type graphene-oxide-based structure wave absorbing material and preparing method thereof / Z. Jiulin, S. Xin, Y. Zhihui, T. Jiangxiao, Y. Haitao, H. Junzhe. Beijing Inst Environmental Features. Заявка № 20191006975; заявл. 04.01.2019; опубл. 19.04.2019.

45. Пат. 109082072 (А) КНР, МПК C08K 3/04, C08L 63/00. Graphene-epoxy resin composite wave absorbing material and preparation method and application thereof / L. Liwei, G. Lina, L. Qi, L. Weiwei, G. Yufen. Suzhou Inst Nano Tech & Nano Bionics Cas. Заявка № 201710440643; заявл. 13.06.2017; опубл. 25.12.2018.

46. Пат. 103013256 (А) КНР, МПК C09D 133/00, C09D 7/12. Invisible coating material and preparation method thereof / L. Shaoxiang, L. Guangjun. Qingdao Xuanwei Coating Mat. Co Ltd. Заявка № 201210564239; заявл. 24.12.2012; опубл. 03.04.2013.

47. Пат. 108410297 (А) КНР, МПК C09D 133/00, C09D 167/00. Anti-static acrylic coating and preparation method thereof / Z. Rui. Hefei Zhanyou Software Expl Co Ltd. Заявка № 201810351794; заявл. 19.04.2018; опубл. 17.08.2018.

48. Пат. 106519816 (А) КНР, МПК C09D 125/06, C09D 133/00. Paint for absorbing electromagnetic wave and preparation method and application thereof / D. Renxing. Jiangsu Amb Tongfeng Paint Co Ltd. Заявка № 201610878261; заявл. 08.10.2016; опубл. 22.03.2017.

REFERENCES

1. Sun, Y., Li C., Fu D., Hu H., Bai Z., Geng H., Gao Y., Zhu Y., Wang H. A novel high anti-corrosion performance polymer based composite coating with new functional fillers. *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 162. Article number 106603.

2. Gao, H., Liu Y., Wang G., Li S., Han Z., Ren L. A multifunctional graphene composite coating with switchable wettability. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 415. Article number 128862.

3. Yang, J., Liu H., Gao, W. Su L., Jiang K. Effect of different fillers on the microstructural evolution and high temperature oxidation resistance of Mo-Si-B coatings prepared by pack cementation. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2021. Vol. 100. Article number 105625.

4. Liu, Z., Sun Q., Song Y., Yang J., Chen X., Wang H., Jiang Z. High-emissivity composite-oxide fillers for high temperature stable aluminum chromium phosphate coating. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 349. – P. 885–893.

5. Kupriashov, A. V., Shestakov I. Y. Modern multifunctional materials and coatings for rocket and space technology based of rubber. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem*. 2022. Vol. 2. – P. 3–10.

6. Wang, C., Wang Z., Liu S., Luo H., Fan W., Liu Z., Liu F., Wang H. Anti-corrosion and wear-resistant coating of

waterborne epoxy resin by concrete- like three-dimensional functionalized framework fillers. *Chemical Engineering Science*. 2021. Vol. 242. Article number 116748.

7. Kupriashov, A. V., Shestakov I. Y. Analysis of mixed filler multifunctional coatings of aviation, rocket and space technology. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2022. V. 18. No. 12 (216). – P. 535–541.

8. Khotbehsara, M. M., Manalo A., Aravinthan T., Ferdous W., Benmokrane B., Nguyen K. T. Q. Synergistic effects of hygrothermal conditions and solar ultraviolet radiation on the properties of structural particulate-filled epoxy polymer coatings. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 277. Article number 122336.

9. Trivedi, D. N., Rachchh N. V. Graphene and its application in thermoplastic polymers as nano-filler- A review. *Polymer*. Vol. 240. Article number 124486.

10. Jakab, B., Panaiteescu I., Gamsjäger N. The action of fillers in the enhancement of the tribological performance of epoxy composite coatings. *Polymer Testing*. 2021. Vol. 100. Article number 107243.

11. Günthner, M., Schütz A., Glatzel U., Wang K., Bordia R. K., Greibl O., Krenkel W., Motz G. High performance environmental barrier coatings, Part I: Passive filler loaded SiCN system for steel. *Journal of the European Ceramic Society*. 2011. Vol. 31. Is.15. – P. 3003–3010.

12. Tong, C., Zhang S., Zhong T., Fang Z., Liu H. Highly fibrillated and intrinsically flame-retardant nanofibrillated cellulose for transparent mineral filler-free fire-protective coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 419. Article number 129440.

13. Trovato, V., Teblum E., Kostikov Y., Pedrana A., Re V., Nessim G. D., Rosace G. Electrically conductive cotton fabric coatings developed by silica sol-gel precursors doped with surfactant-aided dispersion of vertically aligned carbon nanotubes fillers in organic solvent-free aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 586. – P. 120–134.

14. Huo, L., Liu B., Li H., Cao B., Hu X.-C., Fu X.-P., Jia C., Zhang J. Component synergy and armor protection induced superior catalytic activity and stability of ultrathin Co-Fe spinel nanosheets confined in mesoporous silica shells for ammonia decomposition reaction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2019. Vol. 253. – P. 121–130.

15. Panin, S. V., Yazykov S. Yu., Dammer V. Kh. Functionalized Composite Coatings Based on Filled Powder Paint Processed in Planetary Ball Mill. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 770. – P. 93–98.

16. Patent No. 103073981 (A) China, IPC C08G 18/10, C09D 175/06. High-temperature resistance radar wave absorbing coating and preparation method thereof. D. Longjiang, S. Zhenjiang, X. Jianliang, L. Difei, P. Jianing, T. Yupei. Univ Electronic Science & Tech. CN 201210590783, appl. 21.12.2012, publ. 01.05.2013.

17. Patent No. 101838501 (A) China, IPC C09D 201/00, C09D 5/32, C09D 7/12. Oily antiradar coating and preparation method thereof. S.Gong, M. Wu, S. Yang, J. Zhuang. Fujian Quanzhou Jiantian Paintings Co Ltd. CN 201010191377, appl. 26.05.2010, publ. 22.09.2010.

18. Patent No. 102732145 (A) China, IPC C08G 18/67, C08G 18/79. Bi-component polyurethane coating with low infrared emissivity and preparation method thereof. Y. Liu, H. Jiu, Z. Li, G. Zhao, X. Liu. Univ North China. CN 201210169104, appl. 28.05.2012, publ. 17.10.2012.

19. Patent No. 109401476 (A) China, IPC C09D 133/00, C09D 5/08. Reflective insulation coating for oil tank and

- preparation method thereof. L. Jinqing, L. Changyong, W. Quanzhong. Guangxi Nanning Weiyi Anti Corrosion Tech Co Ltd. CN 201811304357, appl. 04.11.2018, publ. 01.03.2019.
20. Patent No. 110577772 (A) China, IPC C09D 7/20, C09D 7/61. Aircraft integral fuel tank surface protection sealing coating. C. Bao, C. Sun, G. Liu, P. Qin, S. Wu. AECC Beijing Inst Aeronautical Mat. CN 201910797629, appl. 27.08.2019, publ. 08.07.2020.
21. Patent No. 108559382 (A) China, IPC C09D 181/04, C09D 5/08. Polysulfide rubber modified epoxy resin anti-corrosion and anti-sewage coating, and preparation method and system thereof. K. Zhang, Y. Cao, J. Tu, X. Wang, W. Huang, J. Wang, P. Zhang. Univ Hainan. CN 201810497310, appl. 22.05.2018, publ. 01.03.2019.
22. Patent No. 107353786 (A) China, IPC C09D 167/06, C09D 5/08. Anti-corrosion photocurable coating. B. Huang. Chengdu Nashuo Technology Co. CN 201710606454, appl. 24.07.2017, publ. 19.06.2018.
23. Kruzalak, J., Kvasnicakova A., Dosoudil R., Hudec I., Vilcakova J. Influence of curing system composition and aging on the performance of rubber magnets based on NBR and EPDM. *Polymer-plastics technology and materials*. 2022. Vol. 62 (2). – P. 177–187.
24. Kruzalak, J., Kvasnicakova A., Hlozekova K., Dzuganova M., Gregorova J., Vilcakova J., Goralik M., Hronkovic J., Preto J., Hudec I. Electromagnetic absorption characteristics of magnese-zinc ferrite and multiwalled carbon nanotube-filled composites based on NBR. *Rubber chemistry and technology*. 2022. Vol. 95 (2). – P. 300–321.
25. Patent No. 103945680 (A) China, IPC C09D 167/06, C09D 5/08. Power box capable of absorbing electromagnetic radiation and manufacturing method of power box. Y. Yang. Ninghai county yancang mountain electric power equipment factory. CN 201410162676, appl. 22.04.2014, publ. 23.07.2014.
26. Fang, J., Bai X.-T., Qi L., Vukanti R., Ge Y. Rare-earth metal oxide nanoparticles decouple the linkage between soil bacterial community structure and function by selectively influencing potential keystone taxa. *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 298. Article number 118863.
27. Tyrina, L. M., Rudnev V. S., Ustinov A. Yu., Lukiyanchuk I. V., Nedorozov P. M., Chernykh I. V., Dmitriyeva E. E. Oxide coatings modified with transition and rare-earth metals on aluminum and their activity in the CO oxidation reaction. *Physical chemistry of the surface and protection of materials*. 2014. Vol. 50. No. 4. – P. 420–427.
28. Patil, A. S., Patil A. V., Dighavkar C. G., Adole V. A., Tupe U. J. Synthesis techniques and applications of rare-earth metal oxides semiconductors: A review. *Chemical Physics Letters*. 2022. Vol. 796. Article number 139555.
29. Patent No. 106893436 (A) China, IPC C09D 133/14. Heat-reflecting insulating coating for two-component metallic external surface, and preparation and use methods thereof. J. Li. CN 201510963818, appl. 21.12.2015, publ. 27.06.2017.
30. Kotov, S. A., Burlova A. N., Zvereva E. D. Producing of composite material with rare-earth metals by rolling. *Procurement production in mechanical engineering*. 2018. Vol. 16. No. 3. – P. 134–136.
31. Kang, H., Peng H., Kang Y., Hao Y., Yan X., Li L., Liu F., Wang W., Lei Z. Porous rare earth-transition metal bimetallic oxide nanoparticles oxygen electrocatalyst for rechargeable Zinc-air battery. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2022. Vol. 134. Article number 104280.
32. Patent No. 107148207 (A) China, IPC B32B 9/04. Composite microsphere particle electromagnetic wave absorption filler and electromagnetic shielding material with same. B. Lin. CN 201710449180, appl. 14.06.2017, publ. 08.09.2017.
33. Patent No. 106188690 (A) China, IPC C08K 3/06, C08L 23/16. Electromagnetic noise suppression sheet and preparation method thereof. B. Hao, L. Liu, Y. Ye. CN 201610556247, appl. 12.07.2016, publ. 07.12.2016.
34. Patent No. 103614058 (A) China, IPC C09D 123/16. Infrared camouflage paint as well as preparation method and application thereof. Z. Mao, W. Wang. CN 201310571785, appl. 13.11.2013, publ. 05.03.2014.
35. Patent No. 101440250 (A) China, IPC C09D 123/34. Radar invisible coating. C. Yue. CN 200710187656, appl. 21.11.2007, publ. 27.05.2009.
36. Patent No. 2234775 C1 Russia, IPC H01Q 17/00. Radiation-absorbing material. V. V. Lepeshkin, A. A. Beljaev, O. I. Gudkova, O. E. Puzanova, N. N. Ivanova. RU 2003100064/09, appl. 09.01.2003, publ. 20.08.2004.
37. Patent No. 110669429 (A) China, IPC B05B 16/20, C09D 7/65. Spacecraft silicone rubber polymer material protective coating and application method and device thereof. W. Shi. CN 201910875662, appl. 17.09.2019, publ. 10.01.2020.
38. Patent No. 102746823 (A) China, IPC B32B 5/28, C09K 3/00. Material with characteristics of fire retardation, thermal insulation and wave absorption, and preparation method thereof. Z. Wei, W. Sijie, Y. Helong. Armored forces engineering academy of PLA. CN 201210182757, appl. 05.06.2012, publ. 24.10.2012.
39. Patent No. 2628784 Russia, IPC C08K 13/02, C08L 9/00. Composition for manufacture of heat protective coating and method for its manufacture. E.N. Kablov, L.L. Krasnov, Z.V. Kirina. RU 20160136112, appl. 07.09.2016, publ. 22.08.2017.
40. Patent No. 2558103 C2 Russia, IPC C08D 183/04, C08L 83/04. Heat insulation polymer material and method for production thereof. A.Yu. Isaev. RU 2012112615/05, appl. 02.04.2012, publ. 27.07.2015.
41. Kupryashov, A. V., Shestakov I. Ya. Use of carbon filler as a main component of multifunctional materials and coatings in rocket and space technology. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2021. V. 17. No. 6 (198). – P. 282–288.
42. Patent No. 104845044 (A) China, IPC C08K 3/04. Coated wave-absorbing material prepared from nano-graphite powder and preparation method of coated wave-absorbing material. Y. Jiang. CN 201510214413, appl. 29.04.2015, publ. 19.08.2015.
43. Patent No. 107841123 (A) China, IPC C08K 13/04. Three-dimensional graphene-based wave-absorbing meta-material substrate and preparation method thereof. K. Li. Luoyang advanced equipment tech co ltd. CN 201610827830, appl. 18.09.2016, publ. 27.03.2018.
44. Patent No. 109648952 (A) China, IPC B32B 17/02, B32B 27/28. Gradient-type graphene-oxide-based structure wave absorbing material and preparing method thereof. Z. Jiulin, S. Xin, Y. Zhihui, T. Jiangxiao, Y. Haitao, H. Junzhe. Beijing Inst Environmental Features. CN 20191006975, appl. 04.01.2019, publ. 19.04.2019.
45. Patent No. 109082072 (A) China, IPC C08K 3/04, C08L 63/00. Graphene-epoxy resin composite wave absorbing material and preparation method and application thereof. L. Liwei, G. Lina, L. Qi, L. Weiwei, G. Yufen. Suzhou Inst Nano Tech & Nano Bionics Cas. CN 201710440643, appl. 13.06.2017, publ. 25.12.2018.

46. Patent No. 103013256 (A) China, IPC C09D 133/00, C09D 7/12. Invisible coating material and preparation method thereof / L. Shaoxiang, L. Guangjun. Qingdao Xuanwei Coating Mat. Co Ltd. CN 201210564239, appl. 24.12.2012, publ. 03.04.2013.

47. Patent No. 108410297 (A) China, IPC C09D 133/00, C09D 167/00. Anti-static acrylic coating and preparation

method thereof. Z. Rui. Hefei Zhanyou Software Expl Co Ltd. CN 201810351794, appl. 19.04.2018, publ. 17.08.2018.

48. Patent No. 106519816 (A) China, IPC C09D 125/06, C09D 133/00. Paint for absorbing electromagnetic wave and preparation method and application thereof. D. Renxing. Jiangsu Amb Tongfeng Paint Co Ltd. CN 201610878261, appl. 08.10.2016, publ. 22.03.2017.

A. V. Kupriashov, S. V. Telegin, I. Ya. Shestakov

ANALYSIS OF FILLERS MULTIFUNCTIONAL COATINGS OF AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY (REVIEW)

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk

Abstract. In Aerospace Engineering, the main purpose of multifunctional coatings is thermal protection, protection against ionizing, electromagnetic and radio emission, reflection of laser influence, aimed at influencing the control system, electrical equipment and product devices. The secondary functions of multifunctional coating in rocket technology include increasing the strength and stiffness of individual external parts of the product, as well as protection against corrosion and erosion. During operation, aircraft, in addition to force influences, are continuously exposed to an extensive complex of external physical influences of a heterogeneous type: ionizing and radio emissions, large differences in thermal disturbances, harmful effects of electrodynamic and gravitational fields, geomagnetic and ionospheric factors. Therefore, the creation of an external multifunctional coating for the protection of rocket and space objects, which has a huge range of possibilities for reflection and absorption from external negative factors, is an urgent task in modern aerospace engineering. This paper presents an analysis of multifunctional coatings for rocket and space technology with various types of fillers, namely commonly used metals, rare-earth elements and their oxides, microglass spheres and carbon microstructures. The paper also presents an analysis of the composition of filler compositions of modern aerospace protective coatings for multifunctional purposes, analyzes foreign effective technical solutions for the external protection of aircraft. The results of the study will be useful in the development of new compositions of external protection of aircraft from external negative factors.

Keywords: multifunctional coating, heat protection, absorption of electromagnetic waves, corrosion resistance, fine filler, radiation resistance.