

УДК 620.197:620.193.2

В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, Г.Г. Шаповалов<sup>1</sup>

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ЭРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85

*Рассмотрены основные тенденции развития в области создания эрозионностойких лакокрасочных, полимерных и комплексных покрытий для защиты изделий из металла и композиционных материалов. Выявлены основные принципы, которыми следует руководствоваться при создании эрозионностойких покрытий. Рассмотрены основные требования, обуславливающие выбор основных компонентов защитного покрытия. Выявлены группы технологий и составов эрозионностойких покрытий в соответствии с проведенным анализом. Определены лидеры в области разработок эрозионностойких покрытий.*

**Ключевые слова:** эрозионностойкие покрытия, лакокрасочные покрытия, эрозионное воздействие, абразивный износ.

V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, G.G. Shapovalov<sup>1</sup>

## TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF THE EROSION-RESISTANT COATINGS (review)

*In this work the main tendencies of development in the field of creation of erosion resistant paint, polymer and complex coatings for protection of metal wares and composite materials are considered. The main principles by which it is necessary to be guided at creation of erosion resistant coatings are revealed. The main requirements causing choice of basic components of protecting cover are considered. Groups of technologies and structures of coverings in compliance with the carried-out analysis are revealed. Leaders in the field of development of erosion resistant coatings are also defined.*

**Keywords:** erosion-resistant coatings, paint coatings, erosive influence, abrasive wear.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

### Введение

Эрозионностойкие покрытия находят широкое применение во многих странах мира для защиты металлических и неметаллических конструкций, которые эксплуатируются в жестких условиях эрозионного воздействия (песка, капель дождя, снега), повышенных температур, влаги, коррозионной среды и т. д.

Эрозия – это процесс поверхностного разрушения материала под воздействием внешней среды. Эрозионная стойкость определяется способностью выдерживать ударно-абразивное воздействие твердых или жидких частиц без существенного ухудшения физико-механических и защитных свойств. Применительно к авиационной технике эрозионный износ наблюдается при воздействии высокоскоростных однофазного или двухфазного потоков (газоабразивное и газочапельное изнашивание) на внешние поверхности обтекателей антенн, лопастей винтов, лопаток компрессора и лобовые поверхности крыльев и оперения.

В настоящее время выявлены следующие виды эрозионного изнашивания материалов: газоэрозионное, газообразивное, газокапельное, гидроэрозионное и кавитационное. Каждый вид эрозионного изнашивания поверхности материала может сопровождаться дополнительными коррозионными поражениями, усиливающими процесс эрозионного разрушения. Результатом такого разрушительного воздействия является возникновение очагов коррозии, снижающих сопротивление усталости металла (либо снижение конструкционной прочности изделий, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ)). Разнообразие областей применения эрозионностойких покрытий, условий их работы, а также предъявляемых к ним требований, связанных с конкретными конструктивными особенностями изделия, обуславливает разнообразие видов эрозионностойких покрытий, типов полимерных пленкообразующих и т. д. [1, 2].

Основными требованиями, регламентирующими выбор эрозионностойкого покрытия, являются:

- характеристика эрозионного воздействия;
- температурный диапазон эксплуатации покрытия;
- допустимый (по конструктивным соображениям) уровень толщины покрытия;
- температурный диапазон отверждения покрытия [3].

Применение эрозионностойких покрытий крайне необходимо, так как они позволяют обеспечить заданный ресурс работы защищаемых конструкций.

В данной работе проведен обзор и анализ литературных и технических данных за длительный период разработок в области эрозионных покрытий, начиная с 1985 г. Это позволило проследить, как менялось направление разработок на протяжении длительного промежутка времени.

Обзор выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия», комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

### **Обзор эрозионностойких покрытий**

Основные направления разработок в области эрозионностойких покрытий в любой стране, начиная с России, связаны с повышением эрозионной стойкости, а также адгезионных и физико-механических свойств, так как эрозионная стойкость покрытий в значительной степени зависит от этих свойств (прочностных и деформационных) [5, 6]. В зависимости от условий эксплуатации покрытий, а также характера эрозионного воздействия на покрытие большое внимание уделяется выбору полимерного пленкообразователя [7].

При изучении имеющейся патентной и научно-технической информации выяснилось, что разработка эрозионностойких композиций на основе полимерных и неорганических (алюмосиликатных, алюмофосфатных) связующих ведется в США (фирмы: Analytical Services Materials Inc., United Technologies Corp., Sermatech Int. Inc., General Electric, Olin Corp.) и в Германии (МТИ GmbH), а также в Японии (фирма Mitsubishi Rajon Co Ltd), Китае и других странах.

Анализ рассмотренных охранных документов и публикаций позволил сделать вывод, что все рассмотренные составы и технологии для получения эрозионностойких покрытий можно условно разделить на три группы:

- 1 – покрытия на основе эластомеров;
- 2 – покрытия на основе термореактивных органических и неорганических связующих;

3 – многослойные (комплексные) покрытия, состоящие из неорганических покрытий на основе алюмофосфатных или алюмосиликатных связующих, на которые наносятся полимерные покрытия.

### *Покрытия на основе эластомеров*

Покрытия на основе эластомеров (резиноподобные покрытия) широко применяются для защиты оборудования от газоабразивного, гидроабразивного и кавитационного износов. В качестве эластомерных эрозионностойких покрытий большое распространение получили покрытия на основе фторкаучуковых эластомеров, а также полиэфируретановые эластомеры, на основе которых формируются покрытия, эксплуатирующиеся в условиях интенсивного атмосферного воздействия [8–11]:

– фторуглеродные эластомеры, покрытия на основе которых обладают рядом ценных свойств – в частности, высокими химической и механической прочностью, термостойкостью [12–15];

– модифицированные каучуковые эластомеры, покрытия на основе которых обладают достаточно высокими физико-механическими характеристиками и низкой паропроницаемостью [16–18].

Представляют интерес эластомерные эрозионностойкие покрытия, которые обладают высокими защитными свойствами. Например, разработана композиция покрытия [19] на основе фторкаучука СКФ-32\*, обладающего высокими физико-механическими свойствами, эрозионной стойкостью, а также высокой коррозионной стойкостью. Известно покрытие на основе фторкаучука СКФ-32 [20], разработанное во ВНИИ защиты металлов от коррозии, которое может использоваться для защиты от коррозии металлических и железобетонных конструкций.

Известны покрытия на основе эластомеров (полиуретановых, фторорганических), которые применяются либо в виде пленки и закрепляются на защищаемой поверхности при помощи адгезива, либо наносятся на защищаемую поверхность при совместном прессовании (формовании) лопатки из ПКМ (угле- и стеклопластиков). В патенте [21] рассматривается покрытие для титановых лопаток на основе полиуретанового эластомера. На титановых лопатках имеются поры, в которые запрессовывается полиуретановый эластомер.

В патентах [22, 23] предложена технология изготовления вентиляторных и компрессорных лопаток из «гибридных» ПКМ (угле-, стекло- и органопластиков), на которые наносят эрозионностойкое фторкаучуковое покрытие. Следует отметить, что покрытия на основе эластомеров обладают высокой эластичностью и невысоким модулем упругости, поэтому для достижения высокой эрозионной стойкости необходимо нанести их на защищаемую поверхность слоем толщиной – не менее 500 мкм.

### *Покрытия на основе терморезистивных органических и неорганических связующих*

В ряде случаев для защиты высоконагруженных элементов, изготовленных из алюминиевых сплавов, сталей и ПКМ, применяются эрозионностойкие покрытия, которые должны обеспечить защиту конструкции при существенно более низких толщинах, так как покрытие, наносимое на защищаемую поверхность слоем большой толщины, затрудняет или делает невозможным проведение неразрушающего контроля высоконагруженных конструкций. В таких случаях целесообразно применение эрозионно-

---

\* Разработчики Е.В. Кузнецова, В.Г. Шигорин, Н.И. Морозова (ФГУП «ВИАМ»).

стойких покрытий на основе термореактивных органических и неорганических связующих, обладающих достаточно высокими механическими характеристиками.

В России во ФГУП «ВИАМ» работы по созданию эрозионностойких покрытий для защиты изделий авиационной техники начали проводиться с 1970 г. прошлого века. Разработан ряд составов для эрозионностойких покрытий на основе эпоксидных олигомеров, обладающих высокими адгезионными, физико-механическими и защитными свойствами [24, 25]. Такие работы продолжаются и в настоящее время. Разработаны эрозионностойкие покрытия на основе модифицированных эпоксидных олигомеров, а также на основе атмосферостойких полиуретановых связующих. Эти покрытия обладают высокими эксплуатационными свойствами благодаря входящим в их состав высокопрочным армирующим наполнителям – нитевидным кристаллам. В патенте [26] рассмотрен состав для защиты ПКМ на основе модифицированных полиуретанов, содержащих нитевидные кристаллы ZnO, обладающий высокой устойчивостью к газообразной и газокapельной эрозии и высокой атмосферостойкостью. Покрытие обладает высокими адгезионными и физико-механическими свойствами. Основным недостатком данного состава является невысокая термостойкость.

Так, в патенте [25] рассмотрена полимерная композиция для атмосферостойких покрытий, в которой дополнительно содержится эпоксидная диановая смола и аминосилексан. Авторами патента установлено, что такая композиция обеспечивает высокую адгезию и водостойкость. Заслуживает внимания патент [24], в котором предложен состав для защитного покрытия для деталей из ПКМ и различных металлов, этот состав содержит эпоксидный олигомер, модификатор, а также армирующий наполнитель и обладает высокой эрозионной стойкостью и термостойкостью до 200°C.

Что касается эрозионностойких покрытий на основе термореактивных (органических) покрытий, разработанных американскими специалистами, то следует отметить разработку США [27], где рассматривается композиционное эрозионностойкое покрытие для защиты передних кромок лопастей и других профильных деталей. Композиция включает взаимопроникающую сетку полимеров (эпоксидных, модифицированных силексанами, с наполнением частицами с твердостью по Виккерсу больше 800, оксидами, боридами, нитридами, кристаллическим углеродом и SiO<sub>2</sub>), которая отверждается аминным отвердителем марки Episure 3164.

Следует отметить, что для создания эрозионностойких высокопрочных покрытий все чаще применяются наполнители, повышающие прочностные характеристики и твердость.

В патентах [28, 29] предложена технология защиты от эрозии лопаток ГТД из угле-, стеклопластика, пропитанного эпоксидной смолой. Такие лопатки защищаются эпоксидной пленкой, армированной волокном. Переднюю кромку дополнительно защищают сеткой из нержавеющей стали.

В качестве эрозионностойких и износостойких термореактивных покрытий можно рассматривать составы [30–32] на основе мономеров и фторполимеров, отверждаемых УФ-излучением. Такие покрытия стойки к износу, атмосферным воздействиям, теплостойки.

Фирмой SDC Coatings Inc. разработана композиция износостойкого покрытия [33] на основе смеси продуктов гидролиза и конденсации эпоксифункционального силана, содержащая функциональные соединения карбоновой кислоты, металлоксидный коллоид и коллоидный кремнезем.

Среди американских разработок следует отметить разработку фирмы Air Products and Chemicals Inc. [34], предложившей быстроотверждаемые эпоксидные композиции, содержащие имидазольный и 1-аминоалкилимидазол-изоцианатные аддукты. Такая

композиция позволяет обеспечить высокий уровень адгезионных и физико-механических свойств покрытий. Большой интерес представляют разработки фирмы Schlumberger Technology Corp. [35], предложившей составы эпоксидных эрозионно-стойких композиций с высокой механической прочностью в широком интервале температур, а также способы создания эрозионно устойчивых поверхностей.

Большой интерес представляют разработки фирмы H.V. Fuller Co [36], которая предложила способ получения абразивостойкого защитного покрытия на основе глицидил-функционального полиакрилового полимера, гидроксифункционального полисилоксана и неорганического компаунда.

В европейских странах проблеме создания эрозионностойких термостойких покрытий, применяемых для защиты деталей из ПКМ и различных металлов, также уделяется большое внимание. Итальянскими фирмами [37, 38] разработаны циклоалифатические эпоксидные соединения, которые могут быть использованы для получения полимерных композиций. Покрытия на основе отвержденных эпоксидных циклоалифатических соединений проявляют превосходные механические свойства – например, прочность при разрыве и прочность при изгибе и ударная вязкость.

Большой интерес также представляют разработки китайских фирм Tianjin Zhendong Paints Co Ltd [39] и East China Technology University [40], предложивших способ получения термостойкого эрозионностойкого покрытия при равномерном смешивании компонентов: раствора силиката калия, полиметилтриэтоксисилана, элементарного углерода, алюмината кальция, силиконового фосфата, чешуйчатого стекла, гидрата оксида кремния и хромокалиевого сульфата. Покрытие формируется при нагревании.

### *Многослойные (комплексные) покрытия*

Специалистами ФГУП «ВИАМ» [41] разработан эрозионностойкий атмосферостойкий многослойный материал, включающий полимерную пленку, клеевой слой и эрозионностойкий слой. Предложенный способ может использоваться при ремонте в процессе эксплуатации изделий.

Следует также отметить, что многослойные эрозионностойкие комплексные покрытия, разработанные учеными ФГБОУ «РГРТУ» [42], могут использоваться для покрытия электрических контактов, эксплуатируемых в особо жестких условиях, что обеспечивает высокие механические свойства, влагостойкость покрытий с сохранением диэлектрических характеристик.

Специалистами ООО «НПП «Уралавиаспецтехнология» разработан способ получения эрозионностойкого комплексного покрытия для лопаток турбомашин из легированных сталей, включающий вакуумно-плазменное осаждение металлического подслоя и нанослоев из нитридов, карбидов и/или карбонитридов алюминия или из соединения титана, циркония и алюминия [43].

Учеными ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработана система защиты от эрозионно-коррозионного разрушения корпусов морских судов при воздействии кавитационной эрозии [44].

Во ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт» предложен способ получения материалов, пригодных для формирования высокотемпературных эрозионно-стойких защитных покрытий на особо жаропрочных конструкционных материалах – углерод-углеродных и углерод-керамических композиционных материалах, широко применяемых в авиакосмической, ракетной и других отраслях промышленности [45, 46].

Среди американских разработок многослойных эрозионностойких комплексных покрытий следует отметить покрытия фирмы United Technologies Corp. Специалистами этой фирмы [22, 23] разработан способ защиты от эрозии вентиляторных, компрессорных

лопаток и т. п. На армирующий материал (прерывистые или непрерывистые волокна: углерод, стекло, нейлон, Nextel, арамид, Kevlar, графит, металл и т. п.) наносят (в виде листа или напыляют) эластомерный материал (фторэластомеры типа Viton, Fluorel Rabzes AMS 7273-силикон, полиуретан) при определенной температуре (24–260°C) и давлении (0–68 ат). Получаемый эрозионностойкий материал наносят на сложные профили с помощью адгезива или вулканизации.

Фирмой H.V. Fuller Co предложен способ получения защитного покрытия [36]. Покрытие является абразивостойким и обладает электрическим сопротивлением. Состав включает: глицидил-функциональный полиакриловый полимер, гидроксифункциональный полисилоксан, неорганический компаунд, агент для контроля текучести.

Фирма Sermatech Int. Inc. [47] предложила эрозионно-коррозионностойкое покрытие для обтекателей и передних кромок крыла или хвостовой части для защиты от высоких и низких температур. Многослойное покрытие включает основной слой (с фосфатным адгезионным слоем и алюминиевым наполнением) и верхний слой из алюмосиликатной эмали, оно может содержать силиконалкид, силиконэпоксид, силиконполиэфир, а также политетрафторэтилен (ПТФЭ-порошок) в качестве наполнителя. Заслуживает внимания также патент [48], посвященный разработке эрозионностойкого комплексного покрытия для стали, содержащего в качестве наполнителя алюминиевый порошок и слой неорганического фосфатного покрытия. На алюмосиликатные грунты наносят полимерные пленки и получают многослойное покрытие:

- 1 слой (в контакте с металлом) – наполненная алюминием керамика, содержит неорганические фосфаты, а также, возможно, хроматные или молибдатные компаунды или металлические соли;
- 2 слой – фосфатное или силикатное связующее без металлических пигментов;
- 3 слой – органическое полимерное связующее (полиамидимид или эпоксид-полиамидимид), которое может содержать пигменты;
- 4 слой – смесь полиамидимида или эпоксиполиамида с политетрафторэтиленом или фторированным этиленпропиленом.

Данные покрытия применяются для защиты центробежных компрессоров газовых и паровых турбин, а также в космической промышленности.

Специалистами фирмы Boeing Co [49] разработано композиционное золь-гель эрозионностойкое покрытие, которое отверждается при естественных условиях. Связующее включает металлоалкоксидный компаунд и органосилан; в рецептуру также включены добавки (для теплостойкости и ударопоглощения) и пигменты.

Фирмой General Electric предложены эрозионностойкие системы и детали конструкций с их использованием [50], а специалистами фирмы Hontek Corp. разработаны эрозионностойкие покрытия для защиты металлических конструкций [51].

Специалистами фирмы Cytonix Corp. запатентованы износостойкие, долговечные, устойчивые к атмосферным условиям покрытия. Они обладают гидрофобностью и устойчивостью к механическим повреждениям, включают фторированный компонент и компаунд – промотор адгезии, который может содержать алкоксильную группу, цикло-содержащую структуру и реактивную группу [15].

Учеными University North Carolina разработан состав покрытия, которое отличается термостойкостью и гидролитической стабильностью. Матрица содержит наполнитель (углеродные волокна, стеклянные сферы, стекло- и минеральные волокна, тальк и др.) и используется для композитов, покрытий, пленок, формованных изделий [52].

Фирмой Stackpole Benjamin предложен способ защиты различных поверхностей от износа и коррозии с применением полиэтилена со сверхвысокой молекулярной массой (HMWPE) [53], а фирмой United Technologies Corp. – способ восстановления эрозионностойких покрытий [54].

Специалистами фирмы Schlumberger Technology Corp. разработан способ выращивания и использования упругих усов и углеродных нанотрубок для защиты поверхности от эрозии [55], которые могут вводиться в полимерные матрицы и способствовать улучшению эксплуатационных свойств покрытий.

Специалистами немецкой фирмы Basf Coating GmbH предложен состав двухкомпонентной композиции для эрозионностойкого покрытия, содержащей базовый компонент, включающий один из поликарбонатов диола, а также диамин [56].

Итальянской фирмой Nuovo Pignone S.P.A. предложен способ получения комплексного защитного покрытия на деталях турбомашин [57].

Специалистами китайской фирмы Changzhou Dingri Environmental Protection Technology Co Ltd разработан способ получения окисленного эрозионностойкого покрытия [58]. В патенте изложен способ получения эрозионностойкого покрытия, содержащего композитные частицы окисленного графита, порошков цинка и никеля и один слой эпоксидной смолы. Покрытие наносят на поверхность металла.

Сотрудниками ФГУП «ВИАМ» проведены исследования в области разработки эрозионностойких лакокрасочных покрытий и методов исследования устойчивости покрытий к действию газоабразивной и газочастицной эрозии. Выявлены основные факторы, влияющие на эксплуатационные свойства покрытий.

В работе [59] исследовано влияние армирующих наполнителей – нитевидных кристаллов ZnO – на адгезионные, физико-механические и вязкоупругие свойства, эрозионную стойкость модифицированных эпоксидных композиций. Исследована кинетика эрозионного разрушения дисперсно-армированных покрытий, а также их динамические свойства.

В работе [60] приведены данные по стойкости к каплеударной эрозии образцов ПКМ и эрозионностойкого покрытия ЭП-5236 на установке центробежного типа при скорости соударения 250 м/с. Исследована зависимость глубины эрозии от продолжительности изнашивания, проведена аппроксимация зависимости  $l_3=f(\tau_3)$ , где  $l_3$  – глубина эрозии;  $\tau_3$  – продолжительность изнашивания.

В работе [61] исследован механизм эрозионного разрушения конструкционных авиационных материалов при воздействии пылевой эрозии. Изучено влияние скорости и угла соударения на эрозионную стойкость конструкционных материалов и покрытий.

В работе [62] сообщается, что в настоящее время большой интерес представляет упрочнение эпоксидной смолы при добавлении в композицию органических или неорганических соединений с учетом масштаба их применения. В данной работе приведены результаты экспериментов по введению двух каолиновых порошков с различным размером частиц в полимерную матрицу эпоксидной смолы, содержащую диглицидиловый эфир бисфенола-А (ДГЭБА), с полиамидамином в качестве отвердителя. Сделаны выводы о влиянии наполнителей, главным образом глины, на эпоксидные матрицы.

В работе [63] приводятся аспекты тестирования воздействия эрозионного износа на текущие и будущие условия полета. Высокая скорость полета авиационных транспортных средств, включая коммерческие и военные самолеты, ракеты, беспилотные летательные аппараты, а также абстрактный самолет будущего, накладывает большие ограничения на материалы для таких изделий и подчеркивает важность соответствующей количественной оценки поведения материала и его эффективности при различных условиях полета. Эрозия, связанная с погодными условиями и воздействием различных частиц и факторов, таких как гидрометеоры, дождь, град и лед, а также песок, вулканический пепел и пыль, опасна для конструкций летательного аппарата и негативно влияет на его срок службы. В данном исследовании приводится обширный обзор научно-исследовательских работ по эрозии в авиации, служащий основой для сравнения

различных летательных аппаратов при моделировании дождевой эрозии при разработке будущих поколений самолетов и космических летательных аппаратов (КЛА).

Полученные по золь-гель технологии покрытия, стойкие к дождевой эрозии, приведены в статье [64]. Эрозионностойкие покрытия разрабатывают и испытывают для того, чтобы защитить авиационные конструкции, чувствительные к повреждениям от ударно-капельного воздействия, – например, такие детали, как передние кромки крыльев, обтекатель или передние кромки лопастей несущего винта. Покрытия наносят на загрунтованные детали из алюминиевого сплава (AA2024). Исследования сосредоточены на развитии и определении характеристик прозрачных золь-гель покрытий, стойких к дождевой эрозии. Исследовано также влияние твердости покрытий на эффективность защиты от эрозии путем изменения количественного соотношения компонентов в органических и неорганических соединениях. Кроме того, на механические свойства полученных гибридных покрытий влияют наночастицы (например,  $ZrO_2$ ). Способ нанесения покрытия – окунание. Все разработанные покрытия исследованы на адгезию (решетчатые надрезы), эластичность (удар, изгиб), твердость (наноиндентор) и стойкость к дождевой эрозии (эрозионные испытания неподвижного образца). Исследование влияния наночастиц золь-гель покрытий на поведение эрозионной защиты проводят с помощью сканирующего электронного микроскопа. Все золь-гель покрытия показали отличную эластичность и адгезию к подложке. Наблюдалась вязкоупругая деформация покрытия, а также когезионное разрушение покрытия вследствие ударно-капельной эрозии без какого-либо признака расслаивания. По сравнению с промышленными эрозионностойкими покрытиями, гибридные золь-гель покрытия, армированные наночастицами, обладают повышенной устойчивостью к дождевой эрозии. Более того, масса системы защиты снижается вследствие того, что золь-гель покрытия имеют меньшую толщину.

В работе [65] оценено влияние различных количеств наноразмерного  $Al_2O_3$  на динамические, механические и термические свойства эпоксидного композита. Полученные результаты показали, что влияние на модуль упругости равномерного распределения наночастиц важнее, чем содержание наполнителя. Другими словами, увеличение содержания наночастиц до 10% (по массе) не улучшило свойства нанокompозитов, в то время как равномерное распределение нанонаполнителя всего на 1% (по массе) в образце, при условии оптимизации значений модуля упругости, коэффициента рассеяния и термической стабильности, обеспечивает эффективность нанокompозита, что способствует повышению эксплуатационных свойств материала, в том числе эрозионной стойкости.

Китайские ученые в статье [66] рассматривают новые технологии упрочнения эпоксидных смол и их перспективы. В последнее время появился целый ряд публикаций о новых методах упрочнения эпоксидных смол – в том числе термопластичными смолами и взаимопроникающими сетками, частицами «ядро-оболочка» (core-shell particle toughening), а также термотропными жидкими кристаллами, жесткими полимерами, наночастицами и т. п. Принцип упрочнения полимерной матрицы наночастицами может быть использован при разработке эрозионностойких покрытий на основе более термостойких полимерных матриц.

В статье [67] рассмотрено влияние наполнения эпоксиполимерной матрицы дисперсными и волоконными наполнителями с целью улучшения упругодеформационных характеристик полимеров, в том числе при разработке эрозионностойких покрытий.

При анализе научно-технической литературы и охранных документов выявили следующие тенденции развития в области создания эрозионностойких покрытий (см. таблицу).

**Тенденции развития в области эрозионностойких покрытий**

Выявленные тенденции развития объекта исследования	Фирмы-разработчики покрытий	Технические решения, реализующие тенденции
Повышение эрозионной стойкости покрытия	ФГУП «ВИАМ»: пат. 2215012 RU (опубл. 27.10.2003); пат. 2290421 RU (опубл. 27.12.2006) Минпромторг: пат. 2398746 RU (опубл. 10.09.2010) Sermatech Int. Inc.: пат. 6171704 US (опубл. 09.01.2001); пат. 6159547 US (опубл. 12.12.2000) Analytical Services Materials, Inc.: пат. 6706405 US (опубл. 10.03.2004) Boeing Co: пат. WO 2008020868 (приор. US) (опубл. 21.02.2008) Schlumberger Technology Corp.: пат. 7968184 US (опубл. 02.12.2013) Tianjin Zhendong Paints Co Ltd: пат. 101096460 CN (опубл. 02.01.2008) Changzhou Dingri Environmental Prot Technologi Co Ltd: пат. 105215346 CN (опубл. 06.01.2016)	Оптимизация состава полимерного пленкообразователя; применение высокомодульных, упрочняющих волокнистых наполнителей (оксидов и нитридов металлов)
Повышение адгезии покрытия к защищаемой поверхности	Cytonix Corporation: пат. 7268179 US (опубл. 11.09.2007) ООО «ЭЛКОН»: пат. 2495895 RU (опубл. 20.10.2013) Schlumberger Technology Corp.: пат. 8096508 US (опубл. 28.01.2011) Basf Coatings GmbH: пат. 2951466 CA (опубл. 01.07.2016) Changzhou Dingri Environmental Prot Technologi Co Ltd: пат. 105215346 CN (опубл. 06.01.2016)	Использование промоторов адгезии, а также функциональных модификаторов

**Заключения**

Проведенный анализ показал, что при разработке эрозионностойких покрытий существенными являются как выбор связующего (полимерной матрицы), так и входящие в состав покрытия высокомодульные армирующие наполнители, которые влияют на процесс структурообразования покрытия, а следовательно, и на его эксплуатационные свойства.

Основными принципами создания эрозионностойких покрытий являются:

- оптимизация состава полимерного пленкообразователя, отвечающего заданным требованиям по адгезионным, физико-механическим характеристикам и эрозионной стойкости;
- использование структурообразующих высокомодульных армирующих наполнителей – например, нитевидных кристаллов, способствующих формированию более прочной структуры и, соответственно, достижению более высоких эксплуатационных характеристик покрытий.

Повышение вышеуказанных характеристик при создании эрозионностойких покрытий может быть достигнуто оптимизацией:

- состава полимерного пленкообразователя, отвечающего заданным требованиям по адгезионным, физико-механическим характеристикам и водостойкости (применение модифицированных эпоксидных и полиуретановых композиций);
- соотношения «связующее–наполнитель»;
- технологического цикла формирования покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Derbenev A.V., Nikolaev V.A., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T., Grashchenkov D.V., Kablov E.N. Synthesis of nanocrystalline silicon carbide using the sol-gel technique // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2013. Vol. 58. No. 10. P. 1143–1151.
4. 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.
5. Лавров А.В., Ерасов В.С., Ландик Д.Н. Об одном подходе к трактовке объединенной теории прочности Я.Б. Фридмана // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-87-94.
6. Платонов А.А. Полимерные композиционные материалы на основе прошитого наполнителя с повышенной ударостойкостью // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 43–47. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-43-47.
7. Виноградов С.С., Дёмин С.А., Балахонов С.В., Кириллова О.Г. Неорганические композиционные покрытия – перспективное направление в области защиты от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-76-87.
8. Огнеэрозионностойкий бронирующий состав для заряда из баллиститного твердого ракетного топлива: пат. 2316528 Рос. Федерация; заявл. 16.08.06; опубл. 10.02.08.
9. Антикоррозионная лакокрасочная композиция: пат. 2169165 Рос. Федерация; заявл. 29.12.99; опубл. 20.06.01.
10. Urethane coating composition and process: pat. 4110317 US; field 10.01.1974; publ. 29.08.78.
11. Coating composition process for the preparation of coatings and coated substrate: pat. 4576868 US; field 14. 09. 84; publ. 18.03.86.
12. Антенный обтекатель: пат. 2277738 Рос. Федерация; заявл. 23.11.04; опубл. 10.06.06.
13. Clear paint and production thereof: pat. 6079069 JP; field 07.10. 83; publ. 04.05.85.
14. Erosion resistant anti-icing coatings: pat. 2006281861 US; field 13. 06.05; publ. 14.12.06.
15. Hydrophobic coating compositions, articles coated with said compositions, and processes for manufacturing same: pat. 7268179 US; field 30.09.03; publ. 11.09.07.
16. A method for producing a protective layer, protective layer, and using the same component with a protective layer: app. 10329049 DE; field 09.12.03; publ. 13.01.05.
17. Process for producing resin composition containing inorganic filler: pat. 60079423 EP; field 25. 09.96; publ. 10.09.97.
18. White radiotransparent antistatic paints for satellites: pat. 0487366 FR; field 25.10.91; publ. 27.05.92.
19. Композиция для антикоррозионного покрытия: пат. 2009153 Рос. Федерация; заявл. 23.11.92; опубл. 15.03.94.
20. Compositions for coatings: pat. 1502591 SU; field 31.03.87; publ. 23.08.89.
21. Elastomeric formulation used in the construction of lightweight aircraft engine fan blades: pat. 6287080 US; field 15.11.99; publ. 11.09.01.
22. Elastomer coated layer for erosion and/or fire protection: pat. 5908528 US; field 16.04.98; publ. 06.01.99.

23. Elastomer coated layer for erosion and/or fire protection: pat. 5912195 US; field 16.04.98; publ. 15.06.99.
24. Состав для защитного покрытия: пат. 2290421 Рос. Федерация; заявл. 01.08.05; опубл. 27.12.06.
25. Полимерная композиция для покрытий: пат. 2333925 Рос. Федерация; заявл. 11.05.07; опубл. 20.09.08.
26. Состав для защиты полимерных композиционных материалов: пат. 2215012 Рос. Федерация; заявл. 27.11.01; опубл. 27.10.03.
27. Composite coating for imparting particle erosion resistance: pat. 6706405 US; field 11. 02.02; publ. 16.03.04.
28. Erosion resistant surface protection: pat. 5486096 US; field 30.06.94; publ. 23.01.96.
29. Composite airfoil leading edge protection: pat. 5449273 US; field 21.03.94; publ. 12.09.95.
30. Coating composition forming wear-resistant coat and article covered with the coat: pat. 630650; field 19.03.98; pub. 23.10.01.
31. Method and apparatus for laying roadway materials: pat. 9711129 EU; field 20.09.96; publ. 27.03.97.
32. Coating composition forming wear-resistant coat and article covered with the coat: pat. 0869154 JP; field 20.09.96; publ. 07.10.98.
33. Composition for providing an abrasion resistant coating on a substrate with a matched refractive index and controlled tintability: pat. 6342097 US; field 20.04.00; publ. 29.01.02.
34. Fast curable epoxy compositions containing imidazole-and 1-(aminoalkyl) imidazole-isocyanate adducts: pat. 8357764 US; field 30. 10.09; publ. 22.01.13.
35. Erosion resistant films for use on heated aerodynamic surfaces: pat. 8096508 US; field 10.08.07; publ. 17.01.12.
36. Method for the preparation of protective coatings having enhanced characteristics: pat. 972272 US; field 04.12.96; publ.13.11.97.
37. Cycloaliphatic epoxy compounds: pat. 0946569 EU; field 16.12.97; publ. 20.08.03.
38. Cycloaliphatic epoxy compounds: pat. 982709 Italy; field 16.12.97; publ. 13.08.98.
39. Preparation method of temperature-resistant and erosion-resistant coating for walling of flue: pat. 101096460 CN; field 30.06.06; publ. 02.01.08.
40. Organic-inorganic hybrid resin containing sesquialter siloxane and preparation method and use thereof: pat. 101139442 CN; field 22.08.07; publ. 07.12.11.
41. Эрозионностойкий, атмосферостойкий, трудносгорающий многослойный материал: пат. 2235645 Рос. Федерация; заявл. 29.04.03; опубл. 10.09.04.
42. Карабанов С.М., Суворов Д.В., Сливкин Е.В. и др. Увеличение эрозионной стойкости покрытий электродов вакуумных и газоразрядных коммутационных приборов // Вестник РГРТУ. 2015. № 54. Ч. 2. С. 127–131.
43. Композитные листы на основе термопласта, включающие натуральные волокна: пат. 2386724 Рос. Федерация; заявл. 08.11.05; опубл. 20.04.10.
44. Система защиты от эрозионно-коррозионного разрушения корпусов морских судов и сооружений: пат. 2496916 Рос. Федерация; заявл. 17.05.12; опубл. 27.10.13.
45. Zhestkov В.Е., Terent'eva V.S. Cite as Multifunctional coating MAI D5 intended for the protection of refractory materials// Russian Metallurgy (Metally) 2010. Vol. 2010. Issue 1. P. 33–40.
46. Способ получения материала для высокотемпературного эрозионностойкого защитного покрытия: пат. 2522552 Рос. Федерация; заявл. 01.11.12; опубл. 20.07.14.
47. Coating for aerospace aluminum parts: pat. 6171704 US; field 29.12.95; publ. 09.01.01.
48. Anti-fouling coating for turbomachinery: pat. 615954 US; field 28.07.99; publ. 12.12.00.
49. Heat and rain erosion resistant coating: pat. 200802086 US; field 28.11.06; publ. 21.02.08.
50. Erosions systems and components comprising the same: pat. 7875354 US; field 28.03.08; publ. 25.01.11.
51. Abrasion resistant coatings: pat. 7736745 US; field 24.05.05; publ. 15.06.10.
52. Thiophene-containing poly(arylene ether) sulfones: pat. 5410013 US; field 01.06.94; publ. 25.04.95.

53. Removable magnetic liner and processes of production, installation, and use thereof: pat. 8287791 US; field 23.12.09; publ. 16.10.12.
54. Processes for repairing erosion resistant coatings: pat. 2008248300 US; field 05.04.07; publ. 09.10.08.
55. Erosion resistant surface and method of making erosion resistant surfaces: pat. 7968184 US; field 03.12.07; publ. 28.06.11.
56. Two-component coating compositions and coatings produced therefrom for improving erosion resistance: pat. 2951466 EU; field 28.04.15; publ. 07.01.16.
57. Method for producing a protective coating for a component of a turbomachine, the component itself and the respective machine: pat. 2010239873 EU; field 10.03.10; publ. 23.09.10.
58. Preparation method for oxidized graphene erosion-resistant coating attached to iron surface: pat. 105215346 CN; field 30.08.15; publ. 06.01.16.
59. Кузнецова В.А. Эрозионностойкая композиция на основе трехфазной системы: эпоксидный олигомер–каучук–армирующий наполнитель: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 1999. 129 с.
60. Чернояров С.А., Иванов А.В., Боркова А.Н., Помахаева Л.И., Помахаев В.П., Аниховская Л.И., Кузнецова В.А. Исследования стойкости к каплеударной эрозии стеклотекстолита с полимерными защитными покрытиями // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. №3. С. 73–75.
61. Боркова А.Н. Эрозионная стойкость авиационных материалов при соударении с твердыми (пылевыми) частицами: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2006. 125 с.
62. Astruc A., Joliff E., Chailan J.-F. et al. Incorporation of kaolin fillers into an epoxy polyamidoamine matrix for coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2009. Vol. 65. Issue 1. P. 158–168.
63. Omid G. Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions // *Progress in Aerospace Science*. 2011. Vol. 47. Issue 4. P. 280–303.
64. Grundwürmer M., Nuyken O., Meyer M. Sol-gel derived erosion protection coatings against damage caused by liquid impact // *16<sup>th</sup> International Conference on Wear of Materials*. 2007. Vol. 263. Issue 1–6. P. 318–329.
65. Farhadinejad Z., Ehsani M., Moemen-Bellah S. Dynamic mechanical and thermal behavior evaluation of an epoxy/anhydride/nano-aluminum oxide composite system // *High Performance Polymers*. 2013. Vol. 25. Issue 5. P. 518–525.
66. Li Ying Guo, Li Yan Wang, Xin Su. Research Progress of New Methods for Toughening Epoxy Resin // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 490–495. P. 3598–3602.
67. Stroganov V.F., Stroganova I.V. Filled epoxy polymer couplings with «shape memory» effect // *Polymer Science (Series D)*. 2011. Vol. 4. Issue 3. P. 183–187.