

---

Обзорная статья

УДК 666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-141-153

## НАПОЛНИТЕЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ (обзор)

Е.А. Тимошина<sup>1</sup>, В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, С.А. Марченко<sup>1</sup>, В.Г. Железняк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены современное состояние и основные тенденции развития в области создания износостойких лакокрасочных покрытий, предназначенных для окраски интерьеров в авиации и строительстве. Обобщены основные принципы разработки износостойких лакокрасочных покрытий. Рассмотрены основные виды наполнителей, применяемых для получения износостойких лакокрасочных покрытий. Определены основные подходы, обуславливающие износостойкость наполненных полимерных покрытий.

**Ключевые слова:** наполнители, структура, физико-механические свойства, износостойкость, лакокрасочные покрытия, наноразмерные наполнители

**Для цитирования:** Тимошина Е.А., Кузнецова В.А., Марченко С.А., Железняк В.Г. Наполнители, применяемые для создания износостойких лакокрасочных покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 141–153. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-141-153.

Review article

## FILLERS USED TO CREATE WEAR-RESISTANT PAINT AND VARNISH COATINGS (review)

E.A. Timoshina<sup>1</sup>, V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, S.A. Marchenko<sup>1</sup>, V.G. Zheleznyak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** This article considers the current state and key development trends in the development of wear-resistant paint and varnish coatings for interiors in the aviation and construction industries. It summarizes the key principles of developing wear-resistant paint and varnish coatings. The main types of fillers used to produce wear-resistant paint and varnish coatings are discussed. The key approaches to ensuring the wear resistance of filled polymer coatings are identified.

**Keywords:** fillers, structure, physical and mechanical properties, wear resistance, coatings, nanosized fillers

**For citation:** Timoshina E.A., Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Zheleznyak V.G. Fillers used to create wear-resistant paint and varnish coatings (review). *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 141–153. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-141-153.

### Введение

В настоящее время возрастает потребность в разработке функциональных лакокрасочных покрытий, в том числе износостойких, применяемых для окраски интерьеров в авиации и строительстве. Обеспечение надежной защиты изделий авиационной техники зависит от выбора лакокрасочных материалов и покрытий на их основе [1–3].

Износостойкие лакокрасочные покрытия – это покрытия, способные противостоять механическому воздействию в процессе эксплуатации, сохраняя целостность, декоративные (внешний вид, блеск, цвет) и защитные свойства [4, 5]. Износостойкость лакокрасочных покрытий определяется их способностью сопротивляться механическому воздействию (трению, удару) и обусловлена природой пленкообразующего вещества, а также химической природой и формой наполнителей [6–9].

Для создания износостойкого покрытия необходимо использовать прочную полимерную матрицу с хорошей адгезией к поверхности наполнителя, т. е. адсорбцией полимера на поверхности дисперсной фазы наполнителя, и/или с активными функциональными группами, позволяющими обеспечить взаимодействие с активными центрами. В настоящее время для производства износостойких лакокрасочных покрытий применяют модифицированные эпоксидные, а также алкидные и полиуретановые пленкообразующие вещества. Эти соединения обладают необходимой твердостью, эластичностью и способны противостоять абразивному износу [10, 11].

Наполнители – это высокодисперсные вещества, которые вводят в состав лакокрасочных материалов для улучшения технологических, физико-механических и декоративных свойств.

Условно выделяют активное и инертное взаимодействие между пленкообразующим веществом и наполнителем. Активное (функциональное) взаимодействие возникает при наличии между пленкообразующим веществом и наполнителем химических связей или адсорбции сегментов полимера на поверхности наполнителя. При отсутствии этих сил взаимодействие является инертным [12]. Для активизации поверхности инертных наполнителей необходимо модифицировать их поверхность.

Активные наполнители способствуют повышению уровня физико-механических свойств готового покрытия. Инертные наполнители (без модификации поверхности), как правило, вводят для снижения себестоимости материала [1].

Наполнители классифицируют по способу получения (природные и синтетические), химическому составу (оксиды, гидроксиды, карбонаты, сульфаты, силикаты) и структуре (порошкообразные, волокнистые и пластинчатые). Форма частиц наполнителя может быть сферической, игольчатой, пластинчатой в зависимости от строения кристаллов химического соединения и способов их измельчения. Часто именно форма и размер наполнителей влияют на свойства лакокрасочного покрытия [12].

Для износостойких лакокрасочных покрытий применяют чешуйчатые, нитевидные, волокнистые наполнители, микросферы и микрокапсулы, а также наноразмерные частицы [5, 13–16].

В данной работе проанализированы наиболее применяемые виды наполнителей, которые могут способствовать увеличению износостойкости лакокрасочных покрытий.

Работа выполнена 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»).

### **Чешуйчатые (пластинчатые) наполнители**

Чешуйчатые наполнители – это материалы с пластинчатой формой частиц, которые используются в полимерных композиционных материалах, в том числе лакокрасочных. К наполнителям данной формы относятся каолин, тальк, слюда, графит, стеклянные чешуйки и др.

Наполнители чешуйчатой (пластинчатой) формы распределяются в основном параллельно друг другу (рис. 1). Такая упаковка частиц является наиболее плотной и создает черепичное перекрытие зазоров между слоями, что снижает газо-, водо- и светопроницаемость, повышает твердость, атмосферо- и износостойкость покрытий, препятствует образованию сквозных трещин.



Рис. 1. Схема распределения чешуйчатых (пластинчатых) наполнителей

Износостойкость покрытий на основе чешуйчатых наполнителей достигается за счет механического упрочнения и способности сопротивляться истиранию. Прочные чешуйки, равномерно распределенные в полимерной матрице, принимая на себя механическую нагрузку, способствуют перераспределению механических напряжений, возникающих при истирании покрытий [17–22].

Ученые из Китая в своих исследованиях использовали стеклянные чешуйки, модифицированные 3-триэтоксисилпропиламином для улучшения адсорбционного взаимодействия между пленкообразующим веществом и поверхностью наполнителя. Чешуйки соединили с фитиновой кислотой и ионами цинка. Износостойкость лакокрасочного покрытия с данным наполнителем, по сравнению с исходным покрытием, увеличилась. Толщина наполненного покрытия уменьшилась на 30 % после 1000 циклов испытания на трение [17].

В исследованиях ученых всего мира часто упоминаются модифицированные нанолисты дисульфида молибдена и оксида графита. Эти наполнители способствуют повышению износостойкости и антикоррозионных свойств лакокрасочных покрытий за счет барьерного эффекта от преимущественно параллельного расположения частиц. Содержание данных наполнителей в лакокрасочных материалах, как правило, не превышает 3 %. В основном данный вид наполнителя применяется в антифрикционных лакокрасочных покрытиях для узлов трения с целью снижения коэффициента трения. Нанолисты дисульфида молибдена и оксида графита не применяются для производства интерьерных покрытий: они обладают темно-серым цветом, что затрудняет производство материалов пастельных тонов и ярких цветов, часто используемых при окраске интерьеров. Еще одним недостатком данных наполнителей является высокая стоимость [18–22].

### Микросферы и микрокапсулы

Микросферы – это, как правило, полые сферы из стекла, керамики или полимеров (рис. 2), которые увеличивают износостойкость лакокрасочных материалов за счет снижения коэффициента трения. Абразивные частицы «проскальзывают» по поверхности такого наполнителя, снижая износ покрытия. Микросферы также способствуют равномерному распределению механических нагрузок по всему объему покрытия [23–26].

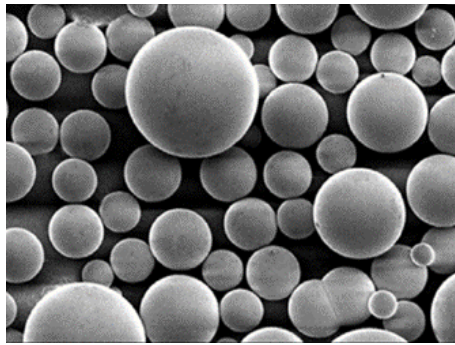


Рис. 2. Стекланные микросферы

Микрокапсулы – это полые сферы, внутри которых содержится вещество, способное «залечивать» трещины и другие повреждения, способствуя восстановлению покрытия при повреждении [27–31].

В работах [23, 24] приведены результаты серии экспериментальных исследований структуры и свойств лакокрасочных покрытий на основе эпоксидной смолы, модифицированной полыми стекланными микросферами. Добавление микросфер приводит к увеличению износостойкости, уменьшению блеска, количества и протяженности микротрещин в покрытии.

Изготовлены покрытия на основе нитрил-бутадиеновых каучуков, армированных полыми стекланными микросферами. Изучено влияние различных силановых связующих и содержания наполнителя на механические свойства и износостойкость лакокрасочного покрытия. Показано, что на износ покрытия влияет не только прочность межфазного взаимодействия между наполнителем и полимерной матрицей, но и концентрация наполнителя. Образец с наполнителем, модифицированным силановым связующим (5 % (по массе)  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилана), обеспечил высокую прочность межфазного сцепления и отличную износостойкость. Кроме того, скорость износа образцов покрытия снижалась с увеличением содержания модифицированного наполнителя до 5 % (по массе) [25].

Следует отметить работу [26], в которой получено полупрозрачное, устойчивое к истиранию супергидрофобное покрытие путем нанесения суспензии пористых кремнеземных микросфер и полиметилсилоксана с последующим обжигом и фторированием. В данном случае пористые кремнеземные микросферы изготовили с помощью метода шаблона. Покрытие продемонстрировало высокую устойчивость к истиранию наждачной бумагой (в течение 2000 циклов испытания на трение) и царапанию.

Исследованы свойства и процесс формирования лакокрасочных покрытий на основе пленкообразующего вещества, модифицированного высокодисперсным сферическим политетрафторэтиленом, полифениленсульфидом и фторкаучуком. Созданная композиция с тройной модификацией образует износостойкое покрытие с повышенной химической и антикоррозионной стойкостью [27]. Добавление политетрафторэтилена привело к существенному снижению коэффициентов трения (79 %) и износа (64,8 %) [28].

Китайские ученые создали многофункциональное покрытие на основе акриловой смолы, политетрафторэтилена и оксида графена. Результаты моделирования подтверждают, что использование частиц графена приводит к улучшению структуры покрытия с точки зрения износа на 14 %. Данное покрытие обладает долговременной коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения, способностью к самоочищению и углом смачивания 165 градусов [29].

Для получения самовосстанавливающегося покрытия с высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью использованы микрокапсулы с двойными стенками, заполненные эпоксидной смолой. Стенки микрокапсул образованы путем нанесения оксида

графена на внешний слой оболочки из полисульфона, модифицированного полидофамином. Поверхность полученных двустенных микрокапсул была шероховатой, размер частиц составил 60–70 мкм, а толщина стенок достигла 2–3 мкм. Благодаря улучшенной дисперсности и совместимости двустенных микрокапсул с наполнителем композиционное покрытие продемонстрировало улучшенные механические характеристики и термическую стабильность. Средний коэффициент трения и скорость износа эпоксидного покрытия, наполненного микрокапсулами в количестве 10 % (по массе), были соответственно на 37,0 и 75,2 % меньше, чем у исходного эпоксидного покрытия [30].

### Нитевидные кристаллы и волокнистые наполнители

Нитевидные кристаллы и волокнистые наполнители (рис. 3) обеспечивают износостойкость покрытий за счет армирования. Данные наполнители равномерно распределяются в полимерной матрице и образуют трехмерную армирующую структуру. При таком армировании покрытия механическая нагрузка равномерно распределяется в пленкообразующем веществе лакокрасочного покрытия. Таким образом значительно повышается стойкость покрытий к механическим воздействиям, в том числе износостойкость [32–39].

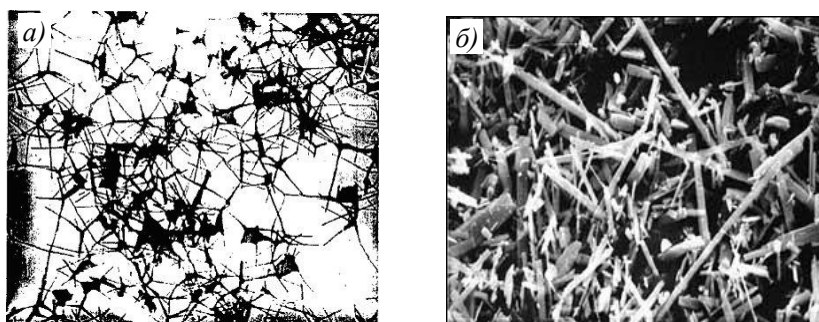


Рис. 3. Внешний вид нитевидных кристаллов (а) и волокнистого наполнителя (б)

Износостойкое супергидрофобное покрытие создано с помощью нитевидных кристаллов оксида цинка и силиконовой смолы. Тетраигольчатые нитевидные кристаллы оксида цинка представляют собой трехмерный нитевидный материал. Четыре иглы растут из одной точки в разных направлениях с углом 109 градусов между двумя иглами, демонстрируя изотропные свойства, которые помогают улучшить механические свойства композиционного материала. Благодаря трехмерной пространственной структуре оксида цинка локальные напряжения, возникающие на одном конце кристалла, будут передаваться на три других, что приведет к равномерному перераспределению напряжения и предотвращению повреждения, вызванного концентрацией напряжения при механическом воздействии. При использовании тетраигольчатых нитевидных кристаллов оксида цинка износостойкость лакокрасочного покрытия увеличилась, гидрофобные свойства и внешний вид покрытия не изменились [32].

Представляет интерес статья ученых из Китая [33]. Представлено новое супергидрофобное износостойкое покрытие на основе эпоксидной смолы и диоксида титана с нитевидной структурой тетраэдра. Частицы диоксида титана синтезировали гидротермальным способом. Используя трехмерную структуру диоксида титана, можно добиться сильного межфазного взаимодействия между наполнителем и эпоксидной смолой, обеспечивая превосходную износостойкость покрытий. Покрытие остается без изменений после 700 циклов испытания на истирание.

Для улучшения механических свойств в состав покрытий можно добавлять нанокристаллы целлюлозы, что приводит к повышению износостойкости на  $\sim(20-30)$  % без ухудшения внешнего вида в сравнении с покрытием без кристаллов [34].

Для армирования покрытия канадские ученые использовали стеклянные волокна, модифицированные дофамином, для улучшения адгезии в эпоксидном связующем. На основании результатов испытаний на растяжение, трение и эрозию установлено, что данное покрытие обладает превосходными механическими свойствами, в том числе износостойкостью [35].

Полиуретановые покрытия привлекли большое внимание благодаря высокой коррозионной стойкости и контролируемым свойствам. Однако в ходе исследований и применения этих покрытий выявлена восприимчивость к механическим повреждениям. Углеродные волокна обладают превосходными механическими свойствами, но в то же время низкой поверхностной энергией, что требует модификации полидофамином. Испытания на трение и износ показали, что коэффициент трения покрытий из непленочного полиуретана составил 0,212, а для покрытий с добавлением углеродных волокон снизился до 0,125 [36].

Интерес представляют работы [37, 38], в которых показано, что волластонит улучшает механические свойства покрытий, в том числе износостойкость, и снижает коэффициент трения. Волластонит в виде мелких частиц способствует армированию покрытия, улучшая износостойкость на 35 %.

### Наноразмерные наполнители

При использовании наноразмерного наполнителя износостойкость достигается за счет небольшого размера частиц и большой удельной поверхности. При хранении наноразмерные наполнители склонны к агломерации вследствие повышенной поверхностной энергии, поэтому модификация поверхности является обязательной стадией их производства. При равномерном распределении по объему полимерной матрицы наполнителя создается плотная и прочная сеть межфазных границ. При трении таких покрытий твердые частицы принимают на себя абразивную нагрузку, и формируется защитный слой. При использовании наноразмерных наполнителей снижается коэффициент трения лакокрасочных покрытий, что увеличивает их износостойкость [1, 40–50].

Один из способов повышения износостойкости покрытий описан в работе [40]. Наночастицы пирогенного диоксида кремния, модифицированные гексаметилдисилазаном, наносили на грунтовку из термопластичного полиуретана с тонким слоем графеновых нанопластинок. Термический обжиг при температуре 150 °С и слой графеновых нанопластинок повысили износостойкость лакокрасочных покрытий с наночастицами пирогенного диоксида кремния.

Исследовано влияние наноразмерного диоксида кремния на механические свойства и структуру полимерного лакокрасочного покрытия. Обнаружено увеличение прочности покрытия при истирании (в 2,5 раза), твердости (на 40 %) и модуля упругости по сравнению с исходным покрытием без наполнения. Установлено, что изменение структуры и улучшение механических свойств покрытий обусловлены появлением новых структурообразующих центров вследствие добавления наноразмерного диоксида кремния [41, 42].

Новое антикоррозионное и износостойкое эпоксидное покрытие разработано посредством синергетической модификации наночастиц кремния с использованием фенилтриэтоксисилана и аминопропилтриэтоксисилана. Эта амфифильная стратегия двойной функционализации улучшает дисперсию наночастиц и усиливает межфазную связь с эпоксидной матрицей. Испытания на трение и износ продемонстрировали высокую износостойкость, при этом покрытие сохранило целостность и гидрофобность даже после того, как покрытие контрольной группы вышло из строя [43].

В работе китайских специалистов представлен новый подход к разработке износостойких покрытий из эпоксидной смолы путем включения химически модифицированных сепиолитовых и графитовых наночастиц в послойный композит [44].

Белорусские ученые изучили коррозионную стойкость и износостойкость лакокрасочного покрытия, модифицированного наночастицами углерода, на примере эмали МЛ-21. Показано, что введение в эмаль наночастиц углерода в количестве до 0,25 % приводит к увеличению коррозионной стойкости на ~20 %, износостойкости – на 50 % [45].

В другой работе белорусских ученых представлены результаты исследований лакокрасочных материалов для формирования высококачественного покрытия. Установлено, что введение углеродных нанотрубок в однокомпонентный алкидно-уретановый лак увеличивает стойкость покрытия к истиранию по сравнению с немодифицированным лаком [46].

Однослойные углеродные нанотрубки считаются идеальным наполнителем для использования в составе многофункциональных покрытий благодаря превосходным электрическим, термическим и механическим свойствам. Однако достижение равномерной дисперсии углеродных нанотрубок при сохранении их структуры и эксплуатационных характеристик остается серьезной проблемой. Включение небольших количеств углеродных нанотрубок во фторуглеродные покрытия повышает износостойкость. Скорость износа покрытия, содержащего 0,15 % (по массе) углеродных нанотрубок, уменьшается на 50,1 % из-за улучшенной прочности и теплопроводности, что предотвращает абразивный износ [47].

Для повышения адгезии и получения прочного покрытия нанотрубки галлуазита введены в акриловую смолу. Композиционное покрытие обладает высокой износо- и водостойкостью, устойчивостью к воздействию окружающей среды, что в основном обусловлено сильными межфазными взаимодействиями между компонентами [48].

Следует рассмотреть покрытие из полиуретана, наполненное наночастицами оксида алюминия и графеном. Результаты исследований показали, что покрытие с наноразмерными частицами оксида алюминия обладает значительно более высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью по сравнению с покрытиями без оксида алюминия. Покрытие, содержащее 3 % (по массе) наночастиц оксида алюминия, показало наилучшие результаты с точки зрения коэффициента трения, объема износа, силы тока коррозии и импеданса [49].

Разработан новый метод *in situ* присоединения поли(2-аминотиазола) к поверхности малослойного карбида титана с образованием нанокомпозитов. Анализ поперечного сечения с помощью сканирующей электронной микроскопии показал, что включение в качестве нанонаполнителя карбида титана в эпоксидную смолу эффективно устраняет микродефекты, возникающие в процессе отверждения покрытия. В частности, снижается коэффициент трения покрытия до 0,48, что на 25 % меньше по сравнению с показателем исходной эпоксидной смолы. Эти результаты подчеркивают значительный потенциал нанокомпозитов для разработки многофункциональных покрытий с повышенной износостойкостью [50].

### Заключения

В настоящее время износостойкие лакокрасочные материалы широко применяют при окраске интерьеров в авиации и строительстве. Одним из основных методов повышения износостойкости лакокрасочных покрытий является введение специальных наполнителей.

В данной работе рассмотрены различные типы наполнителей, влияние их формы и размера на свойства покрытий.

Основным направлением исследований по увеличению износостойкости лакокрасочных покрытий является применение микроразмерных наполнителей различной формы, преимуществами которых являются экономическая доступность и возможность достижения необходимых свойств. Но в последние годы все больше научных работ связано с использованием наноразмерных наполнителей, обеспечивающих специальные свойства лакокрасочных покрытий, в том числе износостойкость. Ограниченность широкого использования наноразмерных наполнителей связана с высокой стоимостью и агломерацией при хранении.

## Список источников

1. Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Применение и модификация частиц для создания супергидрофобных покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). С. 94–110. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
2. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). С. 62–67. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
3. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70–80. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.12.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
4. Кузнецова В.А., Тимошина Е.А., Шаповалов Г.Г., Железняк В.Г. Тенденции в области разработки матовых износостойких лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). С. 132–144. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
5. Кузнецова В.А., Деев И.С., Железняк В.Г., Силаева А.А. Износостойкое лакокрасочное покрытие с квазикристаллическим наполнителем // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). С. 68–76. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-68-76.
6. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972. 240 с.
7. Gupta B.R. Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites // Tribology of Polymer, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites. Amsterdam: Elsevier, 2023. P. 51–117.
8. Кузнецова В.А., Марченко С.А., Емельянов В.В., Железняк В.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидных олигомеров и отвердителей на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (61). С. 71–79. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
9. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Кодаченко Е.Н., Железняк В.Г. Исследование влияния химической природы грунтовочного слоя на свойства системы покрытий на основе фторполиуретановой эмали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 110–119. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
10. Романова А.В., Соколова Е.А., Разуваев А.В. Защитные износостойкие покрытия деталей машин // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Курск, 2019. С. 313–316.
11. Gohardani O. Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions // Progress in Aerospace Science. 2011. Vol. 47. P. 280–303.
12. Герасимова Л.Г., Скороходова О.Н. Наполнители для лакокрасочной промышленности. М.: ЛКМ-пресс, 2010. 224 с.
13. Козлова А.А., Кондрашов Э.К. Влияние молекулярной массы и элементного состава изоцианатов на свойства фторполиуретановых эмалей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). С. 92–100. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
14. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
15. Кузнецова В.А., Силаева А.А., Емельянов В.В., Марченко С.А. Влияние технологии изготовления дисперсно-армированных лакокрасочных материалов на эксплуатационные свойства покрытий на их основе // Труды ВИАМ. 2019. № 6 (78). С. 75–83. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-75-83.

16. Hennebelle F., Najjar D., Bigerelle M., Iost A. Influence of the morphological texture on the low wear damage of paint coated sheets // *Progress in Organic Coatings*. 2006. Vol. 56. P. 81–89.
17. Jian Z., Wen-Guang L., Hui Y. et al. Improvement of wear-resistance and anti-corrosion of waterborne epoxy coating by synergistic modification of glass flake with phytic acid and  $Zn^{2+}$  // *Ceramics International*. 2023. Vol. 49 (11). P. 17910–17920.
18. Shibo C., Changqing Y., Yi W. et al. Developing polydopamine modified molybdenum disulfide/epoxy resin powder coatings with enhanced anticorrosion performance and wear resistance on magnesium lithium alloys // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 10 (9). P. 2534–2545.
19. Shaofeng Z., Jin Y., Huimin Y. et al.  $ZrO_2$ -anchored rGO nanohybrid for simultaneously enhancing the wear resistance and anticorrosion performance of multifunctional epoxy coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 166. P. 106795.
20. Leifeng S., Han Y., Shan Z. et al. A durable superhydrophobic composite coating towards superior anticorrosion/wear properties // *Applied Surface Science*. 2024. Vol. 655. P. 159662.
21. Yushan H., Xiaoqiang F., Yin H. et al. Experimental and theoretical evaluations on the parallel-aligned graphene oxide hybrid epoxy composite coating toward wear resistance // *Carbon*. 2024. Vol. 217. P. 118629.
22. Макаренко О.А. Повышение износостойкости эпоксидной композиции для внутренней поверхности РВСП путем введения в состав чешуйчатых наполнителей // *Нефтегазовое дело*. 2008. Т. 6. № 2. С. 200–204.
23. Валько Н.Г., Глоба А.И., Касперович А.В., Духович Ю.В. Структура и свойства лакокрасочных покрытий, модифицированных полыми стеклянными микросферами // *Вестник ГГУ им. Янки Купалы*. 2020. Т. 10. № 2. С. 95–102.
24. Kotnarowska D. Kinetics of wear of epoxide coating modified with glass microspheres and exposed to the impact of alundum particles // *Progress in Organic Coatings*. 1997. Vol. 31 (4). P. 325–330.
25. Yanbao G., Zheng Z., Zhiqiang C., Deguo W. Wear behavior of hollow glass beads (HGB) reinforced nitrile butadiene rubber: Effects of silane coupling agent and filler content // *Materials today Communications*. 2019. Vol. 19. P. 366–373.
26. Qinqin S., Fubin W., Yuewen H., Bin W. Abrasion resistant semitransparent self-cleaning coatings based on porous silica microspheres and polydimethylsiloxane // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45 (1). P. 401–408.
27. Квасников М.Ю., Киселев М.Р., Камедчиков А.В., Точилкина Е.О. Лакокрасочные износоустойчивые композиционные покрытия с повышенной химической стойкостью, получаемые методом электроосаждения на катоде // *Журнал прикладной химии*. 2017. Т. 90. № 6. С. 713–723.
28. Shiqiang Z., Xiaohua J., Song L. et al. Epoxy/polytetrafluoro-wax composite coatings demonstrate remarkable wear resistance, offering rapid and durable cyclic self-healing capabilities facilitated by the «sweating» behavior of polytetrafluoro-wax // *Progress in Organic Coatings*. 2024. Vol. 188. P. 108227.
29. Hadi K., Milad R., Sepideh A.-I. Durable superhydrophobic PTFE-rich/Acrylic rGO Loaded Self-lubricating Coating to Advance Wear and Long-time Corrosion: Experimental studies and molecular dynamics simulation of friction and corrosive agents penetration // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. Vol. 713. P. 136518.
30. Pengyan Z., Jin Y., Huimin Y. et al. Wear and corrosion resistance of self-healing epoxy coatings filled by polydopamine-modified graphene oxide assembly of polysulfone double-walled microcapsules // *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 177. P. 107416.
31. Zhongpan Z., Xiaoqiang F., Yawen Z. et al. A novel biphasic epoxy coating reinforced with composite oil microdroplets for ultra-low friction and wear // *Carbon*. 2025. Vol. 245. P. 120847.
32. Jiajun B., Qian W., Yiran Z. et al. Preparation and properties of wear resistant thermochromic superhydrophobic coatings // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. Vol. 707. P. 135882.
33. Xinyi C., Lu Y., Hongqiang C. et al. High wear-resistant superhydrophobic coating based on urchin-like  $TiO_2$ /epoxy composite for concrete // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 496. P. 143837.
34. Vahe V., Bouddah P., Véronic L. et al. Wear resistance of nanocomposite coatings // *Anti-Abrasive Nanocoatings*. Elsevier, 2015. P. 201–223.

35. Qian Z., Wu Y., Zhao W. Constructing coral-like PDA layer on glass fiber to enhance the erosion resistance of epoxy coating // *Chemical Physics Letters*. 2024. Vol. 841. P. 141199.
36. Wang X., Zhang X., Ma Y. et al. Highly efficient photothermal self-healing wear-resistant and anti-corrosion coating reinforced by CF@PDA@Cu<sub>2</sub>O nanocomposite // *Progress in Organic Coatings*. 2025. Vol. 207. P. 109393.
37. Muslim N.B., Hamzah A.F., Al-kawaz A.E. Study of mechanical properties of wollastonite filled epoxy functionally graded composite // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. P. 669–677.
38. Xian G., Walter R., Hauptert F. Comparative study of the mechanical and wear performance of short carbon fibers and mineral particles (wollastonite, CaSiO<sub>3</sub>) filled epoxy composites // *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*. 2006. Vol. 44. P. 854–863.
39. Mudra E., Shepa I., Hrubovcakova M. et al. Highly wear-resistant alumina/graphene layered and fiber-reinforced composites // *Wear*. 2021. Vol. 484–485. P. 204026.
40. Naderizadeh S., Athanassiou A., Bayer I.S. Interfacing superhydrophobic silica nanoparticle films with graphene and thermoplastic polyurethane for wear/abrasion resistance // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. Vol. 519. P. 285–295.
41. Лыгденов В.Ц., Сызранцев В.В., Бардаханов С.П. и др. Исследование влияния наночастиц диоксида кремния на свойства лакокрасочного покрытия из перхлорвиниловой эмали // *Прикладная механика и техническая физика*. 2020. Т. 61. № 5. С. 246–254. DOI: 10.15372/pmtf20200525.
42. Yang Y., Tu Y., Gui X. et al. Facile fabrication of wear-resistant, fluorine-free, strongly adhesive superhydrophobic coating based on modified SiO<sub>2</sub>/silicone nanocomposites // *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 182. P. 107694.
43. Jintao G., Jianfeng L., Ting H. et al. Enhanced anticorrosion and wear resistance of epoxy coatings via surface amphiphilic functionalization of silica fillers // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. Vol. 722. P. 137198.
44. Sun N., Hou Z., Jiang Z. et al. Facile modification of sepiolite and its application in wear-resistant and superhydrophobic epoxy coatings by mimicking the structure of shark skin // *Applied Clay Science*. 2025. Vol. 264. P. 107642.
45. Зноско К.Ф., Нуретдинов С.А., Юрго А.Г., Казьмин А.А. Коррозионная стойкость и износостойкость лакокрасочных покрытий, модифицированных наночастицами углерода // *Вестник ГГУ им. Янки Купалы*. 2023. Т. 13. № 1. С. 76–87.
46. Игнатович Л.В., Барташевич А.А., Бахар Л.М., Утгоф С.С. Повышение эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий паркетных полов // *Труды БГТУ*. 2011. № 2. С. 158–160.
47. Wang Z., Man T., Nong Z. et al. Preparation and performances of conductive, wear-resistant, and anti-corrosion coatings based on low content monodisperse SWCNTs // *Diamond and Related Materials*. 2024. Vol. 150. P. 111694.
48. Xinyuan Z., Yuqian X., Di Z. et al. Robust and wear-durable coating based on halloysite nanotubes/polymer composite for passive daytime radiative cooling // *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. P. 110566.
49. Xueting C., Xiaoqiu C., Qingyun Z. et al. Alumina nanoparticles-reinforced graphene-containing waterborne polyurethane coating for enhancing corrosion and wear resistance // *Corrosion Communications*. 2021. Vol. 4. P. 1–11.
50. Liu T., Zhang C., Qu D. et al. Enhanced anti-corrosion and wear resistance of epoxy coatings through ploy(2-aminothiazole)-modified Mxene // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. Vol. 725. Part 1. P. 137554.

### References

1. Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Application and modification of particles to create superhydrophobic coatings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), pp. 94–110. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 21, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.
2. Zheleznyak V.G. Modern paint and varnish materials for use in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), pp. 62–67. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.

3. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 70–80. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
4. Kuznetsova V.A., Timoshina E.A., Shapovalov G.G., Zheleznyak V.G. Trends in the development of matte wear-resistant paint coatings. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), pp. 132–144. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
5. Kuznetsova V.A., Deev I.S., Zheleznyak V.G., Silaeva A.A. Anti wear coating with quasicrystal filler. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), pp. 68–76. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-68-76.
6. Bartenev G.M., Lavrentev V.V. *Friction and wear of polymers*. Leningrad: Khimia, 1972, 240 p.
7. Gupta B.R. *Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. Tribology of Polymer, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*. Amsterdam: Elsevier, 2023, pp. 51–117.
8. Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Emelyanov V.V., Zheleznyak V.G. Study of the influence of molecular mass of epoxy oligomers and hardeners on the operational properties of paint coatings. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 71–79. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-71-79.
9. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Kodachenko E.N., Zheleznyak V.G. Study of the influence of the primer layer's chemical nature on the properties of the coating system based on fluoropolyurethane enamel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 110–119. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 19, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
10. Romanova A.V., Sokolova E.A., Razuvaev A.V. Protective wear-resistant coatings of machine parts. *Modern innovations in science and technology: collection of scientific papers of the 9th All-Rus. sci. and tech. conf. with int. participation*. Kursk, 2019, pp. 313–316.
11. Gohardani O. Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions. *Progress in Aerospace Science*, 2011, vol. 47, pp. 280–303.
12. Gerasimova L.G., Skorokhodova O.N. *Fillers for the paint and varnish industry*. Moscow: LKM-press, 2010, 224 p.
13. Kozlova A.A., Kondrashov E.K. Influence of molecular weight and elemental composition of isocyanates on the properties of fluoropolyurethane enamels. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 92–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 24, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-92-100.
14. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
15. Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Emelyanov V.V., Marchenko S.A. Influence of manufacturing techniques of the disperse reinforced paint and varnish materials on operational properties of coverings on their basis. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6 (78), pp. 75–83. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: October 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-75-83.
16. Hennebelle F., Najjar D., Bigerelle M., Iost A. Influence of the morphological texture on the low wear damage of paint coated sheets. *Progress in Organic Coatings*, 2006, vol. 56, pp. 81–89.
17. Jian Z., Wen-Guang L., Hui Y. et al. Improvement of wear-resistance and anti-corrosion of waterborne epoxy coating by synergistic modification of glass flake with phytic acid and Zn<sup>2+</sup>. *Ceramics International*, 2023, vol. 49 (11), pp. 17910–17920.
18. Shibo C., Changqing Y., Yi W. et al. Developing polydopamine modified molybdenum disulfide/epoxy resin powder coatings with enhanced anticorrosion performance and wear resistance on magnesium lithium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 10 (9), pp. 2534–2545.
19. Shaofeng Z., Jin Y., Huimin Y. et al. ZrO<sub>2</sub>-anchored rGO nanohybrid for simultaneously enhancing the wear resistance and anticorrosion performance of multifunctional epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 166, p. 106795.
20. Leifeng S., Han Y., Shan Z. et al. A durable superhydrophobic composite coating towards superior anticorrosion/wear properties. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 655, p. 159662.

21. Yushan H., Xiaoqiang F., Yin H. et al. Experimental and theoretical evaluations on the parallel-aligned graphene oxide hybrid epoxy composite coating toward wear resistance. *Carbon*, 2024, vol. 217, p. 118629.
22. Makarenko O.A. Increasing the wear resistance of the epoxy composition for the inner surface of vertical steel tubes by introducing flaky fillers into the composition. *Neftegazovoe delo*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 200–204.
23. Valko N.G., Globa A.I., Kasperovich A.V., Dukhovich Yu.V. Structure and properties of paint and varnish coatings modified with hollow glass microspheres. *Vestnik GGU im. Yanki Kupaly*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 95–102.
24. Kotnarowska D. Kinetics of wear of epoxide coating modified with glass microspheres and exposed to the impact of alundum particles. *Progress in Organic Coatings*, 1997, vol. 31 (4), pp. 325–330.
25. Yanbao G., Zheng Z., Zhiqiang C., Deguo W. Wear behavior of hollow glass beads (HGB) reinforced nitrile butadiene rubber: Effects of silane coupling agent and filler content. *Materials today Communications*, 2019, vol. 19, pp. 366–373.
26. Qinqin S., Fubin W., Yuewen H., Bin W. Abrasion resistant semitransparent self-cleaning coatings based on porous silica microspheres and polydimethylsiloxane. *Ceramics International*, 2019, vol. 45 (1), pp. 401–408.
27. Kvasnikov M.Yu., Kiselev M.R., Kamedchikov A.V., Tochilkina E.O. Wear-resistant composite paint and varnish coatings with increased chemical resistance obtained by electrodeposition on a cathode. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2017, vol. 90, no. 6, pp. 713–723.
28. Shiqiang Z., Xiaohua J., Song L. et al. Epoxy/polytetrafluoro-wax composite coatings demonstrate remarkable wear resistance, offering rapid and durable cyclic self-healing capabilities facilitated by the «sweating» behavior of polytetrafluoro-wax. *Progress in Organic Coatings*, 2024, vol. 188, p. 108227.
29. Hadi K., Milad R., Sepideh A.-I. Durable superhydrophobic PTFE-rich/Acrylic rGO Loaded Self-lubricating Coating to Advance Wear and Long-time Corrosion: Experimental studies and molecular dynamics simulation of friction and corrosive agents penetration. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, vol. 713, p. 136518.
30. Pengyan Z., Jin Y., Huimin Y. et al. Wear and corrosion resistance of self-healing epoxy coatings filled by polydopamine-modified graphene oxide assembly of polysulfone double-walled microcapsules. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 177, p. 107416.
31. Zhongpan Z., Xiaoqiang F., Yawen Z. et al. A novel biphasic epoxy coating reinforced with composite oil microdroplets for ultra-low friction and wear. *Carbon*, 2025, vol. 245, p. 120847.
32. Jiajun B., Qian W., Yiran Z. et al. Preparation and properties of wear resistant thermochromic superhydrophobic coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, vol. 707, p. 135882.
33. Xinyi C., Lu Y., Hongqiang C. et al. High wear-resistant superhydrophobic coating based on urchin-like TiO<sub>2</sub>/epoxy composite for concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 496, p. 143837.
34. Vahe V., Bouddah P., Véronic L. et al. Wear resistance of nanocomposite coatings. *Anti-Abrasive Nanocoatings*. Elsevier, 2015, pp. 201–223.
35. Qian Z., Wu Y., Zhao W. Constructing coral-like PDA layer on glass fiber to enhance the erosion resistance of epoxy coating. *Chemical Physics Letters*, 2024, vol. 841, p. 141199.
36. Wang X., Zhang X., Ma Y. et al. Highly efficient photothermal self-healing wear-resistant and anti-corrosion coating reinforced by CF@PDA@Cu<sub>2</sub>O nanocomposite. *Progress in Organic Coatings*, 2025, vol. 207, p. 109393.
37. Muslim N.B., Hamzah A.F., Al-kawaz A.E. Study of mechanical properties of wollastonite filled epoxy functionally graded composite. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, pp. 669–677.
38. Xian G., Walter R., Hauptert F. Comparative study of the mechanical and wear performance of short carbon fibers and mineral particles (wollastonite, CaSiO<sub>3</sub>) filled epoxy composites. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 2006, vol. 44, pp. 854–863.
39. Mudra E., Shepa I., Hrubovcakova M. et al. Highly wear-resistant alumina/graphene layered and fiber-reinforced composites. *Wear*, 2021, vol. 484–485, p. 204026.

40. Naderizadeh S., Athanassiou A., Bayer I.S. Interfacing superhydrophobic silica nanoparticle films with graphene and thermoplastic polyurethane for wear/abrasion resistance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 519, pp. 285–295.
41. Lygdenov V.Ts., Syzrantsev V.V., Bardakhanov S.P. et al. Study of the influence of silicon dioxide nanoparticles on the properties of paint and varnish coatings made of perchlorovinyl enamel. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2020, vol. 61, no. 5, pp. 246–254. DOI: 10.15372/pmtf20200525.
42. Yang Y., Tu Y., Gui X. et al. Facile fabrication of wear-resistant, fluorine-free, strongly adhesive superhydrophobic coating based on modified SiO<sub>2</sub>/silicone nanocomposites. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 182, p. 107694.
43. Jintao G., Jianfeng L., Ting H. et al. Enhanced anticorrosion and wear resistance of epoxy coatings via surface amphiphilic functionalization of silica fillers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, vol. 722, p. 137198.
44. Sun N., Hou Z., Jiang Z. et al. Facile modification of sepiolite and its application in wear-resistant and superhydrophobic epoxy coatings by mimicking the structure of shark skin. *Applied Clay Science*, 2025, vol. 264, p. 107642.
45. Znosko K.F., Nuretdinov S.A., Yurgo A.G., Kazmin A.A. Corrosion resistance and wear resistance of paint and varnish coatings modified with carbon nanoparticles. *Vestnik GGU im. Yanki Kupaly*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 76–87.
46. Ignatovich L.V., Bartashevich A.A., Bakhar L.M., Utgof S.S. Improving the performance properties of paint and varnish coatings of parquet floors. *Trudy BGTU*, 2011, no. 2, pp. 158–160.
47. Wang Z., Man T., Nong Z. et al. Preparation and performances of conductive, wear-resistant, and anti-corrosion coatings based on low content monodisperse SWCNTs. *Diamond and Related Materials*, 2024, vol. 150, p. 111694.
48. Xinyuan Z., Yuqian X., Di Z. et al. Robust and wear-durable coating based on halloysite nanotubes/polymer composite for passive daytime radiative cooling. *Composites Science and Technology*, 2024, vol. 251, p. 110566.
49. Xueting C., Xiaoqi C., Qingyun Z. et al. Alumina nanoparticles-reinforced graphene-containing waterborne polyurethane coating for enhancing corrosion and wear resistance. *Corrosion Communications*, 2021, vol. 4, pp. 1–11.
50. Liu T., Zhang C., Qu D. et al. Enhanced anti-corrosion and wear resistance of epoxy coatings through ploy(2-aminothiazole)-modified Mxene. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, vol. 725, part 1, p. 137554.

**Информация об авторах**

**Тимошина Екатерина Александровна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Кузнецова Вера Аркадьевна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Марченко Сергей Андреевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Железняк Вячеслав Геннадьевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Ekaterina A. Timoshina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vera A. Kuznetsova**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Sergey A. Marchenko**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vyacheslav G. Zheleznyak**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; получена после доработки 20.02.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.03.2026.  
The article was submitted 12.02.2026; received in revised form 20.02.2026; approved and accepted for publication after reviewing 26.03.2026.