

Научная статья

УДК 678.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116

ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛЛАСТОНИТОМ НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЮЩЕЙ КРЕМНИСТОЙ ПОРОДЫ

К.А. Мишагин¹, Е.М. Готлиб², А.Р. Валеева³, Е.С. Ямалеева²

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия; office@kstu.ru

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», Казань, Россия; kai@kai.ru

Аннотация. Применение синтезированного волластонита (основной компонент – β -волластонит) на основе цеолитсодержащей кремнистой породы позволяет обеспечить получение эпоксидных композиций, которые обладают высоким уровнем триботехнических свойств, твердости, износостойкости и адгезии к стали. Силикат кальция из цеолитсодержащей кремнистой породы повышает химическую и термическую стойкость, а также устойчивость к ультрафиолетовому облучению эпоксидных материалов, что делает его перспективным для применения в авиационной промышленности.

Ключевые слова: эпоксидные композиции, цеолитсодержащая кремнистая порода, синтетический волластонит, износостойкость, твердость, антифрикционные свойства, адгезия к стали

Для цитирования: Мишагин К.А., Готлиб Е.М., Валеева А.Р., Ямалеева Е.С. Эпоксидные материалы, наполненные синтетическим волластонитом на основе цеолитсодержащей кремнистой породы // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 107–116. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116.

Scientific article

EPOXY MATERIALS FILLED WITH SYNTHETIC WOLLASTONITE BASED ON ZEOLITE-CONTAINING SILICEOUS ROCK

K.A. Mishagin¹, E.M. Gotlieb², A.R. Valeeva³, E.S. Yamaleeva²

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

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technological University», Kazan, Russia; office@kstu.ru

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI», Kazan, Russia; kai@kai.ru

Abstract. The use of synthesized wollastonite (the main component being β -wollastonite) based on zeolite siliceous rock enables the production of epoxy compositions with high tribotechnical properties, hardness, wear resistance and adhesive strength to steel. Calcium silicate from zeolite-containing siliceous rock increases the chemical and thermal resistance of epoxy materials as well as their resistance to UV radiation, making it a promising material for use in the aviation industry.

Keywords: epoxy compositions, zeolite-containing siliceous rock, synthetic wollastonite, wear resistance, hardness, antifriction properties, adhesion to steel

For citation: Mishagin K.A., Gotlib E.M., Valeeva A.R., Yamaleeva E.S. Epoxy materials filled with synthetic wollastonite based on zeolite-containing siliceous rock. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 107–116. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-107-116.

Введение

Эпоксидные материалы находят все более широкое применение в авиастроении, так как позволяют уменьшить массу корпуса самолета, достичь значительной экономии топлива и снижения выбросов углекислого газа [1]. Для авиационных эпоксидных композиций важными показателями являются высокие адгезионные характеристики, износостойкость, устойчивость к ультрафиолетовому (УФ) облучению и химическим агрессивным средам [2].

Улучшить эти свойства можно за счет наполнения эпоксидных полимеров волластонитом [3], эффективность использования которого обусловлена в первую очередь игольчатой структурой его кристаллов, которая способствует снижению усадки в процессе получения и повышению эксплуатационных показателей керамики строительного назначения [4]. Анизодиаметричная структура волластонита [5] обеспечивает эффективность его применения для наполнения лакокрасочных материалов, защитных покрытий, клеев, а также в черной и цветной металлургии.

Волластонит представляет большой интерес и для авиационных эпоксидных материалов, так как улучшает их антифрикционные и прочностные показатели [6]. Однако вследствие недостаточной разработанности отечественных месторождений этот силикат кальция в основном импортируют из Китая.

Синтез данного наполнителя из отходов рисового производства также имеет слабые стороны [7] из-за преимущественной локализации сырья на юге России и дороговизны транспортных расходов ввиду большого объемного веса шелухи.

Вследствие этого практический интерес представляет поиск других отечественных природных материалов, содержащих диоксид кремния с аморфной структурой. В этом аспекте привлекает внимание цеолитсодержащая кремнистая порода (ЦКП) [8], месторождения которой имеются на различных территориях России. При этом Татарско-Шатрашанское месторождение является наиболее полно и всесторонне изученным источником ЦКП в Европейской части России. Поэтому для синтеза силиката кальция в данном исследовании использовали именно эту породу.

Согласно работе [9], ЦКП этого месторождения содержит следующие основные компоненты, %: 59–77 – SiO_2 ; 9,4–19,6 – Al_2O_3 ; 8–18 – CaO .

В связи с изложенным изучение модифицирующего действия в эпоксидных композициях волластонита, синтезированного на основе ЦКП, представляет интерес, в том числе и для авиационной промышленности.

В данной работе проведена оценка влияния волластонита, полученного из ЦКП, на триботехнические и адгезионные свойства, а также устойчивость к эксплуатационным факторам эпоксидных материалов. Исследования проведены с использованием приборной базы Аналитического исследовательского центра ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и кафедры материаловедения, сварки и производственной безопасности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева».

Материалы и методы

Изучены материалы на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-20. В качестве отвердителя применяли аминоалкилфенол (АФ-2) при эквимолярном соотношении эпоксигруппы и амина. Отверждение проводили в течение 7 сут при комнатной температуре.

В качестве наполнителя применяли волластонит, полученный твердофазным методом при температуре 1175 °С в течение 3 ч, на основе ЦКП Татарско-Шатрашанского месторождения [8] и известняка в соотношении 0,56:1 [10, 11].

Износостойкость определяли путем истирания на машине Табера при удельном давлении контртела 1 МПа и скорости скольжения 1 м/с без использования смазки.

Твердость оценивали на приборе TIME TH210 по методу Шора.

Коэффициент трения определяли согласно ГОСТ 11629–2017 на машине Tribometer (компания CSM Instruments) по стандартной схеме испытания «шарик–диск» при линейной скорости 8,94 см/с, частоте выборки 10 Гц, температуре 25 °С, влажности 20 %.

Адгезию к стали и алюминию определяли методом отрыва на тавровых соединениях на приборе Shimadzu AG-50 kNX при использовании программного обеспечения Shimadzu Trapiziumx.

Климатическую стойкость эпоксидных материалов оценивали путем экспозиции образцов в течение 96 ч при температуре 60 °С и мощности излучения 1,38 Вт/м² (двойной полдень (Южная Франция)) в везерометре QUV модели 80-spray в соответствии с ASTM G154–00.

Содержание гель-фракции определяли путем экстракции кипящим ацетоном в аппарате Сокслета в течение 6 ч.

Исследования термостабильности эпоксидных материалов проводили на приборе синхронного термического анализа – дериватографе (фирма Netzsch) в температурном интервале 25–500 °С при скорости нагрева 10 °С/мин в алюминиевом тигле в атмосфере воздуха, который продувался со скоростью 20 мл/мин.

Стойкость к химическим средам эпоксидных композиций определяли согласно ГОСТ 12020–2018 по изменению массы образцов при экспозиции в агрессивных средах в течение 7 сут.

Результаты и обсуждение

Силикатный наполнитель, полученный твердофазным методом с применением ЦКП, состоит главным образом из β-волластонита, содержание которого практически соответствует силикату кальция, как природному, так и синтезированному из отходов производства риса [7].

Фазовый состав полученного волластонита, % (по массе):

β-волластонит	81
Тридимит	4
Кристобалит	4
Кварц	9
Ларнит	2

В качестве примесей ЦКП содержит кристобалит, тридимит и кварц, т. е. три основные полиморфные модификации диоксида кремния с кристаллической структурой, которые различаются способом сочленения тетраэдров. В то же время основной примесью наполнителя из золы рисовой шелухи (ЗРШ) является ларнит.

Отличие состава примесных компонентов связано с тем, что ЦКП включает не только аморфный, но и кристаллический диоксид кремния. Кроме того, в нем содержится карбонат кальция, который влияет на кинетику твердофазной реакции вследствие выделения углекислого газа, способствующего процессам диффузии в реакционной системе, за счет которых обеспечивается массообмен между реагирующими твердыми веществами.

Силикат кальция на основе ЦКП имеет существенно более низкую пористость, чем наполнитель на основе ЗРШ [11], и характеризуется относительно небольшим средним размером частиц (9,8 мкм).

Маслоемкость синтетического волластонита на основе ЦКП составляет 54,3 г/г, рН водной вытяжки при температуре 20 °С достигает 10. Таким образом, данный наполнитель имеет щелочную природу поверхности и маслоемкость, соответствующую показателю силиката кальция, полученного с применением ЗРШ [7, 11].

Главным преимуществом получения волластонита на основе ЦКП по сравнению с ЗРШ является одностадийная технология твердофазного синтеза, не требующая предварительного получения оксида кальция из известняка [10], что существенно уменьшает энерго- и трудозатраты, а следовательно, улучшает экономические показатели получаемого наполнителя.

Исследования показали, что твердость и износостойкость эпоксидных материалов закономерно увеличиваются с повышением содержания волластонита на основе ЦКП (рис. 1). Это связано с относительно высокой твердостью минерала (4,5–5 по Моосу), игольчатой структурой и триклинной сингонией β -волластонита. Снижение износа наполненных композиций обусловлено анизодиаметричной формой частиц силикатов кальция, оказывающих положительное влияние [12] в первую очередь на усталостные свойства материалов.

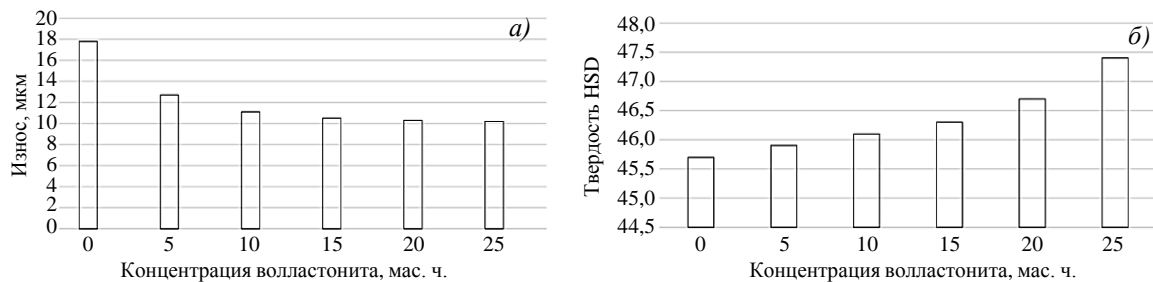


Рис. 1. Зависимости износа (а) и твердости (б) материала от содержания волластонита

Уменьшение степени поперечного сшивания наполненных эпоксидных материалов, зафиксированное по снижению содержания гель-фракции (рис. 2), способствует [13] возрастанию подвижности межузловых участков сетки и, следовательно, уменьшению износа из-за ускорения релаксации приложенных напряжений [14].

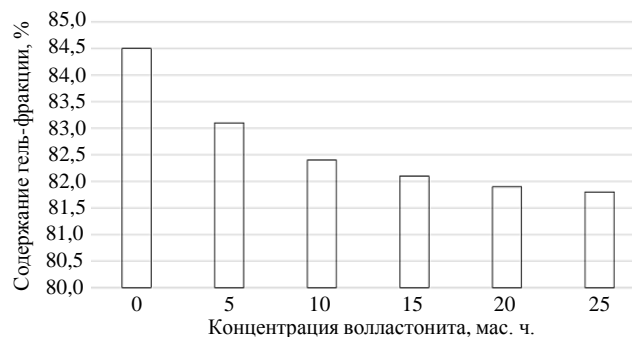


Рис. 2. Зависимость содержания гель-фракции эпоксидных композиций от концентрации волластонита

Для составов с разным содержанием синтетического волластонита на основе ЦКП коэффициент статического трения зависит от времени формирования контакта покрытия с изделием практически одинаковым образом (рис. 3). При этом исследованный наполнитель значительно (более чем в 2 раза при концентрации 25 мас. ч.) уменьшает этот показатель наполненных эпоксидных полимеров.

Установленное улучшение триботехнических характеристик при применении синтетического волластонита на основе ЦКП связано со способностью силикатов, содержащих оксиды металлов, формировать металлические мостики, обеспечивающие отвод от полимерной матрицы [15, 16] тепла, возникающего при трении. Свой вклад в описанный эффект вносит также увеличение износостойкости и твердости эпоксидных материалов с силикатом кальция на основе ЦКП (рис. 1).

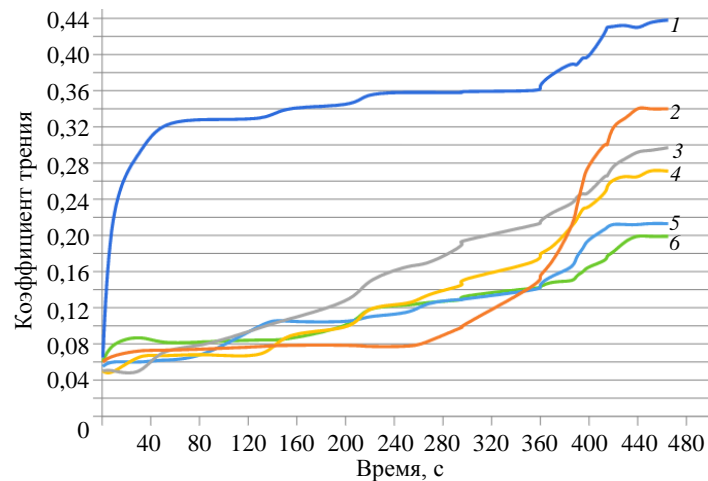


Рис. 3. Зависимости коэффициента статического трения от времени формирования контакта с эпоксидной композицией без наполнителя (1) и с наполнителем в концентрации 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5) и 25 мас. ч. (6)

С повышением концентрации в композиции синтетического волластонита на основе ЦКП значительно увеличивается прочность при отрыве от стали (рис. 4, а). Адгезия эпоксидных покрытий к алюминию значительно меньше, чем к стали (рис. 4, б), и уменьшается при наполнении синтетическим силикатом кальция на основе ЦКП аналогично адгезии волластонитсодержащего наполнителя на основе продукта переработки отходов производства риса. Это может быть связано с образованием оксидной пленки на поверхности этого металла [17]. Для устранения данного недостатка, возможно, требуется специальная обработка поверхности алюминия.

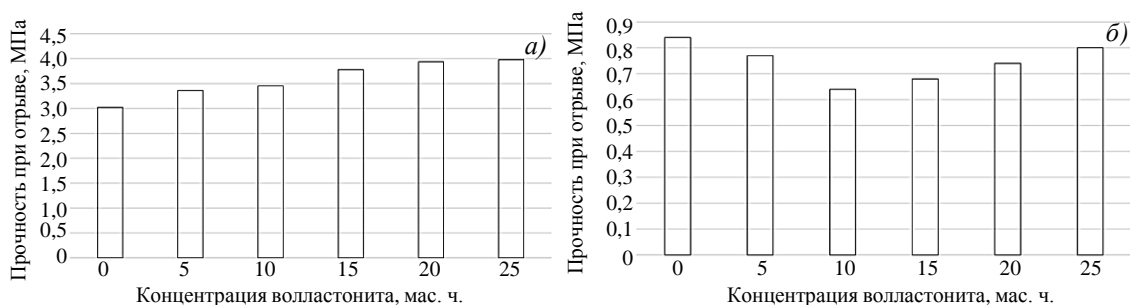


Рис. 4. Зависимости прочности при отрыве эпоксидных композиций от стали (а) и алюминия (б) при различной концентрации наполнителя

На основании полученных результатов оптимальным содержанием синтетического силиката кальция на основе ЦКП можно считать 25 мас. ч. на 100 мас. ч. эпоксидной смолы ЭД-20.

Эксплуатационные характеристики материалов с волластонитом на основе ЦКП сопоставимы с показателями композиций, содержащих природный и синтезированный из растительного сырья силикат кальция [7]. Можно отметить, что при применении для синтеза волластонита из ЗРШ износостойкость и адгезия к стали наполненных эпоксидных материалов меньше, чем при наполнении силикатом кальция из ЦКП. Это является следствием большой дисперсности волластонита из ЦКП, влияющей на уровень взаимодействия на границе раздела фаз. Свойства межфазного слоя определяют в свою очередь прочность наполненного материала, так как этот слой передает нагрузку с полимерной матрицы на наполнитель.

Одновременно содержащиеся в составе волластонита на основе ЦКП кристаллические диоксиды кремния – прочные кремнеземы. Это перспективные наполнители для различных красок, полимерных покрытий, резин, керамических и силиконовых изделий, что также способствует усилению модифицирующего действия синтетического волластонита на основе ЦКП.

Так, в работе [18] установлено увеличение прочностных характеристик эпоксидных материалов при наполнении кристобалитом. В то же время ларнит, содержащийся в силикате кальция на основе ЗРШ [16], как наполнитель полимеров не описан в научно-технической литературе.

Таким образом, кристаллические диоксиды кремния являются более желательными побочными фазами в составе силиката кальция, чем ларнит, так как они используются как наполнители полимеров [18].

Установлено, что эпоксидные материалы, наполненные синтетическим волластонитом на основе ЦКП, в водных растворах щелочей и солей набухают в меньшей степени по сравнению с базовым (ненаполненным) составом (табл. 1). Химическая стойкость материалов с волластонитом на основе ЦКП также больше, чем при наполнении силикатом кальция из ЗРШ. Это объясняется меньшим объемом и средним размером пор волластонитсодержащего наполнителя из ЦКП [11]. Кроме того, входящий в его состав кристобалит имеет высокое химическое сопротивление.

Большая устойчивость в агрессивных средах эпоксидных композиций с волластонитом на основе ЦКП может быть обусловлена также кристаллической структурой и относительно высокой степенью дисперсности, что должно обеспечивать хорошее межфазное взаимодействие [15].

При эксплуатации материалов в атмосферных условиях наиболее агрессивное воздействие оказывает УФ-область солнечного излучения, приводящая к фотохимическим и окислительным деструктивным процессам [19]. Воздействие УФ-составляющей солнечной радиации приводит к фотодеструкции поверхности полимерного материала, образованию напряжений и трещин, так как энергия фотона формирует свободные радикалы, обуславливающие процессы окисления [20]. При взаимодействии солнечного УФ-излучения с кислородом воздуха образуется озон, который, являясь сильным окислителем, вступает в химическую реакцию с органическими молекулами полимера и вызывает процесс озонного старения [21].

Таблица 1

Стойкость к химическим средам и устойчивость к ультрафиолетовому (УФ) облучению эпоксидных композиций, ненаполненных и содержащих 25 мас. ч. волластонита

Эпоксидная композиция	Степень набухания, %, в 5%-ном растворе		Изменение износа, %, при УФ-облучении
	NaCl	КОН	
Ненаполненная	1,4	1,3	15
Содержащая 25 мас. ч. волластонита на 100 мас. ч. эпоксидной смолы ЭД-20	0,62	0,67	10

Исследования в везерометре показали (табл. 1), что эпоксидные материалы с синтетическим волластонитом на основе ЦКП обладают высокой устойчивостью к УФ-облучению: износостойкость при искусственном старении снижается только на 10 %. Это указывает на небольшую интенсивность деструктивных процессов.

В работе [22] показано, что кремнийсодержащие минералы могут использоваться для защиты материалов от УФ-излучения, так как они способны его поглощать или рассеивать. Возможно, это будет также происходить при применении волластонита в составе эпоксидных материалов.

В узлах трения авиационных приборов наблюдается большое тепловыделение [23, 24], из-за которого протекают процессы трибоокислительной деструкции полимерных антифрикционных покрытий. В связи с этим важно оценить влияние синтетического волластонита на основе ЦКП на термическую стабильность наполненных эпоксидных композиций.

Экспериментальные данные показали (табл. 2), что характеристические температуры потери массы эпоксидных материалов выше при наполнении волластонитом, синтезированным на основе ЦКП, по сравнению с базовым составом.

Таблица 2

Характеристические температуры потери массы эпоксидных композиций

Эпоксидная композиция	Температура, °С, потери массы, %	
	10	50
Ненаполненная	335	405
Содержащая 10 мас. ч. волластонита на 100 мас. ч. эпоксидной смолы ЭД-20	355	430

Таким образом, синтетический наполнитель на основе ЦКП оказывает заметный термостабилизирующий эффект в эпоксидных композициях благодаря развитой кристаллической структуре и высокому содержанию кремния в элементном составе [25, 26].

При этом силикат кальция на основе ЦКП, как менее пористый, более эффективно увеличивает термостойкость эпоксидных материалов, чем синтезированный с применением ЗРШ. Это обеспечивает определенные преимущества его использования для наполнения авиационных материалов антифрикционного назначения.

Заключения

Силикат кальция, синтезированный твердофазным методом на основе ЦКП, содержит β -волластонит в том же количестве, что и силикат кальция природного происхождения и синтезированный на основе карбонизированной шелухи риса. При этом его получают по одностадийной, т. е. более экономичной, технологии, он является относительно малопористым и высокодисперсным. Эпоксидные материалы, наполненные синтетическим волластонитом на основе ЦКП, обладают высоким уровнем триботехнических свойств, твердости, износостойкости и адгезии к стали, а также химической и термической стойкостью и устойчивостью к УФ-облучению. Это позволяет применять их в авиационной промышленности, например, при изготовлении деталей фюзеляжа, крыльев и хвостового оперения самолетов, для защиты металлических поверхностей от коррозии.

Высокая термостойкость и некоторые эксплуатационные характеристики эпоксидных материалов с этим силикатным наполнителем объясняются составом примесных компонентов, которые представляют собой кристаллические модификации диоксида кремния, также успешно выполняющие функции наполнителей полимеров.

Список источников

1. Семенуха О.В., Воронина С.Ю. Особенности использования эпоксидных смол при изготовлении композиционного материала для антенных рефлекторов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2020. Т. 1. С. 352–353.
2. Туранов Р.А. Композиционные материалы с использованием бора в авиационной промышленности // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-2. С. 230–231.
3. 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 (51). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.

4. Гладун В.Д., Акатьева Л.В., Андреева Н.Н., Холькин А.И. Получение и применение синтетического волластонита из природного и техногенного сырья // Химическая технология. 2004. № 9. С. 4–11.
5. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 122–144. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
6. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Качаев А.А. Способы соединения керамических композиционных материалов на основе SiC с керамическими и металлическими материалами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). С. 75–83. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
7. Гаршин А.П., Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Перспективы развития и пути совершенствования авиационных тормозных систем на базе керамоматричных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С. 104–121. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
8. Шарафиев Д.Р., Хацринов А.И. Анализ потребительских свойств природных цеолитов в странах СНГ // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 12. С. 95–98.
9. Морозов Н.М., Хохряков О.В., Морозова Н.Н., Хозин В.Г., Сагдатуллин Д.Г. Эффективность цеолитсодержащих мергелей в цементных бетонах // Известия КГАСУ. 2011. № 3 (17). С. 134–138.
10. Мишагин К.А., Твердов И.Д., Готлиб Е.М. и др. Исследование природного отечественного сырья для получения силикатных наполнителей // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 3. С. 67–73.
11. Mishagin K., Gotlib E., Yamaleeva E. et al. Comparison of the Properties of Calcium Silicates Derived from Different Raw Materials // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/202341001001.
12. Колесников В.И., Бардушкин В.В., Лапицкий А.В. и др. Эффективные упругие характеристики антифрикционных композитов на эпоксидной основе // Вестник Южного научного центра РАН. 2010. Т. 6. № 1. С. 5–10.
13. Каримов Н.К., Ганиев И.Н., Олимов Н.С. Исследование влияния основных факторов на физико-химические свойства композиционных эпоксидных материалов, применяемых в качестве антифрикционных и антикоррозионных покрытий // Доклады академии наук Республики Таджикистан. Сер.: Композиционные материалы. 2008. Т. 51. № 9. С. 685–689.
14. Okonkwo A.O., Jagadale P., GarciaHerrera J.E. et al. High-toughness/low-friction epoxy coating forced with carbonnano structures // Polymer Testing. 2015. Vol. 47. P. 113–119.
15. Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. 2009. Т. LIII. № 4. С. 4–18.
16. Готлиб Е.М., Ямалеева Е.С., Валева А.Р. и др. Антифрикционные эпоксидные материалы, наполненные силикатами на основе ископаемого, растительного и техногенного сырья // Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 214–223.
17. Кусков В.Н., Коленчин Н.Ф., Шадрин П.Н., Сафронов А.В. Строение и свойства анодной оксидной пленки на алюминии и сплаве Д16 // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-3. С. 625–629.
18. Keishi N., Michiyuki Y., Yoshihide A. Tensile properties of cristobalite-filled epoxy resin // Journal of Applied Polymer Science. 2020. Vol. 138 (16). P. 50410.
19. Arjmandi R., Hassan A., Majeed K., Zakaria Z. Rice Husk Filled Polymer Composites // International Journal of Polymer Science. 2015. Vol. 2. P. 798–829.
20. Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Железина Г.Ф. Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба // Вопросы материаловедения. 2016. Т. 87. № 3. С. 104–114.

21. Павлов М.Р., Николаев Е.В., Андреева Н.П., Барботько С.Л. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). С. 98–112. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11.
22. Wang H., Liu Z., Luo S. et al. Preparation and properties of UV curable SiO₂/Epoxy resin composite // 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Dalian, China, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPT56209.2022.9872589.
23. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
24. Бабинова А.А., Князев А.В., Беляченков И.О., Сорокин О.Ю. Испытания на стойкость керамических материалов к высокотемпературной коррозии при температуре 900 °С // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 99–110. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.06.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-99-110.
25. Gribova I.A., Vinogradova O.V. Advances in the Production of Thermostable Antifrication Plastics // Russian Chemical Reviews. 2019. Vol. 48. No. 1. P. 95–102.
26. Волков Д.П., Егоров А.Г., Мироненко М.Э. Теплофизические свойства полимерных композиционных материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 287–293.

References

1. Semenukha O.V., Voronina S.Yu. Features of Using Epoxy Resins in the Manufacture of Composite Materials for Antenna Reflectors. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2020, vol. 1, pp. 352–353.
2. Turanov R.A. Composite Materials Using Boron in Aircraft Manufacturing. *Sovremennye naukoymkiye tekhnologii*, 2013, no. 8–2, pp. 230–231.
3. 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 tekhnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
4. Gladun V.D., Akateva L.V., Andreeva N.N., Kholkin A.I. Production and application of synthetic wollastonite from natural and man-made raw materials. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2004, no. 9, pp. 4–11.
5. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
6. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Kachaev A.A. Methods for joining ceramic composite materials based on SiC with ceramic and metallic materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 75–83. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
7. Garshin A.P., Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Prospects for development and ways to improve aircraft braking systems on the base ceramic matrix composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 104–121. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
8. Sharafiev D.R., Khatsrinov A.I. Analysis of consumer properties of natural zeolites in the CIS countries. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 12, pp. 95–98.
9. Morozov N.M., Khokhryakov O.V., Morozova N.N., Khozin V.G., Sagdatullin D.G. Efficiency of zeolite-containing marls in cement concretes. *Izvestiya KGASU*, 2011, no. 3 (17), pp. 134–138.
10. Mishagin K.A., Tverdov I.D., Gotlib E.M. et al. Study of natural domestic raw materials for the production of silicate fillers. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2022, no. 3, pp. 67–73.
11. Mishagin K., Gotlib E., Yamaleeva E. et al. Comparison of the Properties of Calcium Silicates Derived from Different Raw Materials. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 410, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/202341001001.

12. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Lapitsky A.V. et al. Effective elastic characteristics of antifriction composites on an epoxy basis. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 5–10.
13. Karimov N.K., Ganiev I.N., Olimov N.S. Study of the influence of the main factors on the physicochemical properties of composite epoxy materials used as antifriction and anticorrosion coatings. *Doklady akademii nauk Respubliki Tadjikistan. Ser.: Kompozitsionnyye materialy*, 2008, vol. 51, no. 9, pp. 685–689.
14. Okonkwo A.O., Jagadale P., GarciaHerrera J.E. et al. High-toughness/low-friction epoxy coating forced with carbon nano structures. *Polymer Testing*, 2015, vol. 47, pp. 113–119.
15. Bakhareva V.E., Nikolaev G.I., Anisimov A.V. Improving the functional properties of antifriction polymer composites for sliding friction units. *Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva*, 2009, vol. LIII, no. 4, pp. 4–18.
16. Gotlib E.M., Yamaleeva E.S., Valeeva A.R. et al. Antifriction epoxy materials filled with silicates based on fossil, plant, and technogenic raw materials. *Polzunovskiy vestnik*, 2024, no. 1, pp. 214–223.
17. Kuskov V.N., Kolenchin N.F., Shadrina P.N., Safronov A.V. Structure and properties of the anodic oxide film on aluminum and D16 alloy. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2012, no. 11-3, pp. 625–629.
18. Keishi N., Michiyuki Y., Yoshihide A. Tensile properties of cristobalite-filled epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, vol. 138 (16), p. 50410.
19. Arjmandi R., Hassan A., Majeed K., Zakaria Z. Rice Husk Filled Polymer Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015, vol. 2, pp. 798–829.
20. Deev I.S., Kurshev E.V., Lonskiy S.L., Zhelezina G.F. The influence of long-term climatic aging on the surface microstructure of epoxy organoplastics and the nature of its destruction under bending conditions. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, vol. 87, no. 3, pp. 104–114.
21. Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Andreeva N.P., Barbotko S.L. To question of technique of assessment of firmness of polymeric materials to influence of solar radiation (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 7, pp. 98–112. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 06, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11.
22. Wang H., Liu Z., Luo S. et al. Preparation and properties of UV curable SiO₂/Epoxy resin composite. *23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. Dalian, China, 2022, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICEPT56209.2022.9872589.
23. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 82, no. 3, pp. 158–167.
24. Babinova A.A., Knyazev A.V., Belyachenkov I.O., Sorokin O.Yu. Testing the resistance of ceramics materials to high temperature corrosion at a temperature of 900 °C. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 99–110. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-99-110.
25. Gribova I.A., Vinogradova O.V. Advances in the Production of Thermostable Antifriction Plastics. *Russian Chemical Reviews*, 2019, vol. 48, no. 1, pp. 95–102.
26. Volkov D.P., Egorov A.G., Mironenko M.E. Thermophysical properties of polymer composite materials. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 287–293.

Информация об авторах

Мишагин Кирилл Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Готлиб Елена Михайловна, профессор, д.т.н., КНИТУ, office@kstu.ru

Валеева Алина Равильевна, доцент, к.т.н., КНИТУ – КАИ, kai@kai.ru

Ямалеева Екатерина Сергеевна, доцент, к.т.н., КНИТУ, office@kstu.ru

Information about the authors

Kirill A. Mishagin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena M. Gotlib, Professor, Doctor of Sciences (Tech.), KNRTU, office@kstu.ru

Alina R. Valeeva, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), KNRTU – KAI, kai@kai.ru

Ekaterina S. Yamaleeva, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), KNRTU, office@kstu.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.07.2025.
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 08.07.2025.