

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-44-53

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ГЕРМЕТИКОВ «ХОЛОДНОЙ» ВУЛКАНИЗАЦИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ДО +400 °С) И ПУТИ ИХ ПОВЫШЕНИЯ

М.А. Илюхина<sup>1</sup>, В.В. Тимонин<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.** На основании ряда исследовательских работ получены результаты по термическому старению кремнийорганических герметиков. Представлены результаты испытаний после термического старения пластин герметиков и образцов герметиков, нанесенных на металл. Показаны зависимости скорости старения образцов герметиков от температуры и длительности ее воздействия. Определены ресурсы работы герметиков при различных температурах. Рассмотрены пути повышения эксплуатационных характеристик кремнийорганических герметиков типа ВИКСИНТ.

**Ключевые слова:** кремнийорганические герметики, термическое старение, термогравиметрический анализ

**Для цитирования:** Илюхина М.А., Тимонин В.В. Исследование эксплуатационных характеристик кремнийорганических герметиков «холодной» вулканизации при повышенных температурах (до +400 °С) и пути их повышения // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-44-53.

Scientific article

## RESEARCH OF OPERATING PROPERTIES OF RTV SILICONE SEALANTS AT ELEVATED TEMPERATURES (UP TO +400 °C) AND WAYS OF THEIR INCREASE

М.А. Ilyukhina<sup>1</sup>, V.V. Timonin<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.** On the basis of a number of research works results on heat ageing of silicone sealants VIKSINT were received. Test results after heat ageing of plates of sealants and samples of the sealants brought on metal are presented. Temperature dependences of properties of sealants on speed and duration of thermal ageing are shown. Resources of work of sealants are defined at various temperatures. Ways of increase of operating properties of silicone sealants are considered.

**Keywords:** silicone sealants, thermal ageing, thermogravimetric analysis

**For citation:** Ilyukhina M.A., Timonin V.V. Research of operating properties of RTV silicone sealants at elevated temperatures (up to +400 °C) and ways of their increase. *Trudy VIAM*, 2022, no. 3 (109), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-44-53.

### Введение

Разработка функциональных материалов с улучшенным комплексом свойств, а также современных технологий их переработки является перспективным направлением в различных отраслях промышленности и обеспечивает мировой уровень и конкурентоспособность разрабатываемых отечественных материалов и технологий, при этом формируется задел для дальнейшего развития и усовершенствования экономики.

Задачи, требующие незамедлительного решения, состоят в разработке материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, необходимыми для создания техники нового поколения, в том числе высоконагруженных композиционных материалов с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам и рабочей температурой до 400 °С, а также элементоорганических связующих электротехнического, теплозащитного, радиотехнического назначения и систем «холодной» вулканизации, изготавливаемых с использованием различных современных технологий [1–5].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ формируются научно-технические заделы, обновляется и развивается приборная база для исследований, разработки и дальнейшего производства новых материалов, которые позволяют создавать авиационную технику для перспективных направлений. Осваиваются новые технологии, предназначенные для замены импортных материалов. Следует отметить, что развитие авиации может обеспечить не только разработку кардинально новых материалов, но также усовершенствование серийных, широко используемых материалов и технологий их изготовления.

В институте созданы герметизирующие материалы, отличающиеся простотой применения и высокими эксплуатационными характеристиками в широком диапазоне температур. В наибольшей степени этим требованиям отвечают кремнийорганические тепло-, морозостойкие герметики, работоспособные как при отрицательных температурах (до –120 °С), так и при длительном воздействии повышенных температур – до 300 °С (кратковременно – до 600 °С).

### Материалы и методы

Исследование кинетики термического разложения кремнийорганических каучуков, содержащих диметильные и диметилметилфенильные группы, проводили в воздушной среде на дериватографе MOM Q-1500D при скорости нагрева 5 °С/мин.

Термическое старение образцов герметиков в виде вулканизованных пластин проводили в термостатах типа SNOL, обеспечивающих равные условия нагрева для всех испытываемых образцов. Образцы герметиков доводили до температуры испытаний 300 °С в течение 2 ч, до температуры испытаний 400 °С – в течение 2,5 ч. Минимальное время выдержки герметиков установлено продолжительностью 1 ч.

Определение прочности связи с металлом при отслаивании, условной прочности и относительного удлинения при разрыве образцов герметиков проводили на испытательной машине Zwick/Roell Z2.5.

### Результаты и обсуждение

Термостойкие кремнийорганические герметики в соответствии с проводимыми испытаниями в объеме паспорта рекомендуются для длительной (от тысячи до десятков тысяч часов) работы при температурах 150–250 °С и для кратковременного (от 100 до 1000 ч) использования при температурах 300–350 °С. Результаты исследования зависимости скорости старения кремнийорганических герметиков от температуры, свидетельствуют о том, что эти материалы при температурах >300 °С могут работать лишь кратковременно. Тем не менее получение данных о работоспособности наиболее термостойких герметиков при

температурах 350 °С и более представляет практический интерес в связи с продолжающимся ростом скоростей полетов и, соответственно, эксплуатационных температур изделий новой авиационной техники. Главными факторами, вызывающими старение полимеров в условиях эксплуатации, являются температура и температурные перепады, влажность воздуха и атмосферные осадки, солнечная радиация и кислород [6–10].

Одним из способов оценки термостойкости эластомерных материалов являются термогравиметрические исследования кинетики термического разложения вулканизатов, в том числе и на базе низкомолекулярных кремнийорганических каучуков. Термогравиметрический анализ – это исследование изменения массы материала при изменении температуры и времени в регулируемом режиме нагрева. С помощью такого анализа определяют температурные и массовые характеристики термодеструктивных процессов, протекающих в структуре вулканизатов: интервалы температур, в которых они протекают; количество стадий; потери массы по стадиям; температуры максимальных скоростей потери массы; величину твердых остатков.

Использование термогравиметрического анализа позволяет исследовать кинетику термического разложения низкомолекулярных кремнийорганических каучуков «холодной» вулканизации в отвержденном состоянии при различных температурах с разной скоростью нагрева. Полученные термогравиметрические кривые вулканизатов на основе кремнийорганических каучуков с диметильными и диметилметилфенильными группами близки по температурным и массовым характеристикам на разных скоростях нагрева. При скорости нагрева 5 °С/мин интенсивная потеря массы начинается после 360 °С (~7 %), далее идет двухстадийный процесс, заканчивающийся к 500 °С, с потерей массы до 50 %. Проведенные термогравиметрические исследования вулканизатов на основе низкомолекулярных кремнийорганических каучуков подтвердили возможность применения этих композиций при температурах до 400 °С [11–14].

Высокая термическая стойкость и долговечность материалов на основе полиорганосилоксанов обуславливаются высокой энергией связи Si–O. Особый характер термодеструкции, при которой не затрагивается силоксановый скелет макромолекулы и происходит преимущественно разрушение связей Si–C, сопровождающееся образованием дополнительных силоксановых связей, которые ограничивают доступ кислорода к оставшимся заместителям [15–18].

Термическое старение кремнийорганических герметиков при температурах >350 °С по разным режимам позволило проанализировать данные по изменению физико-механических свойств для установления ресурса их работы при повышенных температурах. Проведены исследования поведения кремнийорганических герметиков «холодной» вулканизации в условиях, приближающихся к условиям их работы в самолетных конструкциях, для которых характерно более длительное время воздействия температур и отсутствие существенной теплоотдачи во внутренний объем конструкции.

В данной работе в качестве опытных образцов исследованы композиции на основе кремнийорганических каучуков (с разными функциональными группами и молекулярной массой) с неорганическими наполнителями различной природы и степенью наполнения, защитыми различными вулканизующими системами «холодного» отверждения, – герметики ВИКСИНТ У-1-18, ВИКСИНТ У-2-28, ВИКСИНТ У-4-21, ВГО-1 и УФ-7-21.

Вышеуказанные кремнийорганические герметики различаются по своим технологическим и эксплуатационным характеристикам и могут применяться в широком интервале температур и по различному назначению:

– герметик ВИКСИНТ У-1-18 представляет собой двухкомпонентный уплотнительный термостойкий материал белого цвета, предназначенный для поверхностной

герметизации различных металлических соединений, а также для герметизации аппаратуры, работающей в среде воздуха при температурах от  $-60$  до  $+300$  °С при действии вибрационных, ударных и повторно-переменных нагрузок;

– герметик ВИКСИНТ У-2-28 представляет собой трехкомпонентный пастообразный уплотнительный материал розового или белого цвета, предназначенный для герметизации клепаных, болтовых и сварных соединений конструкций и приборов, работающих в интервале температур от  $-60$  до  $+250$  °С при внутришовной герметизации и при температурах от  $-60$  до  $+300$  °С в среде воздуха, а также для заливки штепсельных разъемов, работающих при температурах от  $-60$  до  $+250$  °С;

– герметик ВИКСИНТ У-4-21 представляет собой двухкомпонентный заливочный герметизирующий материал белого цвета, предназначенный для поверхностной герметизации клепаных, болтовых и сварных соединений конструкций и приборов и для защиты электро- и радиоприборов, работающих в среде воздуха при температурах от  $-60$  до  $+300$  °С, а также для заливки штепсельных разъемов, работающих при температурах от  $-60$  до  $+100$  °С;

– герметик ВГО-1 представляет собой однокомпонентный пастообразный материал белого цвета, предназначенный для поверхностной герметизации конструкций, приборов, резисторов, различных изделий радиоэлектронной техники, работающих в среде воздуха при температурах от  $-60$  до  $+250$  °С, а также для ремонта изделий, загерметизированных герметиками типа ВИКСИНТ;

– герметик УФ-7-21 представляет собой двухкомпонентный заливочный герметизирующий материал белого цвета, предназначенный для поверхностной герметизации металлических соединений, крепления полупроводников, работающих в среде воздуха при температурах от  $-110$  до  $+300$  °С.

Определены физико-механические свойства герметиков в исходном состоянии и после воздействия температуры по выбранному режиму. Дополнительно исследовано изменение адгезионных свойств и внешнего вида герметиков, нанесенных на пластины из алюминиевого сплава Д16-АТ с использованием подслоя П-11. Изготовление образцов для испытаний проводили в соответствии с Техническими условиями на каждый заявленный герметик.

Термическое старение образцов герметиков ВИКСИНТ У-1-18, ВИКСИНТ У-2-28, ВИКСИНТ У-4-21, ВГО-1 и УФ-7-21 при температуре  $350$  °С по разным режимам позволило проанализировать данные по изменению физико-механических свойств и определить режимы прогрева для каждого материала.

Пластины вулканизированных герметиков после предварительного термостатирования выдерживали при температуре  $350$  °С в течение 2, 4, 6, 8, 12, 16 и 20 ч, после чего при температуре  $23 \pm 2$  °С определяли следующие параметры: условную прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве, изменение линейных размеров и твердости. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

По результатам испытаний можно сделать вывод, что герметики типа ВИКСИНТ по стойкости к термическому старению располагаются в следующем порядке: У-4-21, ВГО-1, УФ-7-21, У-1-18, У-2-28. В процессе старения происходит значительная линейная усадка герметиков – до 18 %.

На основании полученных данных для дальнейшего исследования выбраны различные режимы нагрева при температуре  $350$  °С:

- 2 ч – для герметика ВИКСИНТ У-1-18;
- 6 и 8 ч – для герметиков ВГО-1 и ВИКСИНТ У-4-21;
- 8 ч – для герметика УФ-7-21.

Таблица 1

**Изменение физико-механических свойств кремнийорганических герметиков типа ВИКСИНТ после термического старения при температуре 350 °С**

Герметик	Свойства*	Значения свойств для герметиков								
		в исходном состоянии	после выдержки при температуре 350 °С в течение, ч							
			2	4	6	8	12	16	20	
У-1-18	$\sigma$	4,5	2,1	Образцы охрупчились, испытаниям не подлежат						
	$\varepsilon$	280	85							
	$\Delta$	–	11							
	$H$	55–58	65							
У-2-28	$\sigma$	2,2	Образцы охрупчились, испытаниям не подлежат							
	$\varepsilon$	284								
	$\Delta$	–								
	$H$	55								
У-4-21	$\sigma$	2,7	–	1,4	2,0	2,1	2,4	1,9	2,0	
	$\varepsilon$	160	–	100	60	60	64	60	60	
	$\Delta$	–	–	10	10	11	13,3	16,6	16,6	
	$H$	50	–	50	65	70	75	70	65	
УФ-7-21	$\sigma$	2,0	–	2,1	–	1,6	2,8	3,1	3,5	
	$\varepsilon$	82	–	60	–	40	40	40	20	
	$\Delta$	–	–	6,2	–	11	–	–	–	
	$H$	56	–	60	–	70	85	90	100	
ВГО-1	$\sigma$	4,6	–	2,5	2,7	3,2	Образцы жесткие, испытать невозможно			
	$\varepsilon$	280	–	128	140	100				
	$\Delta$	–	–	8,8	–	14,4	14,4	15,5	17,7	
	$H$	55–58	–	55	60	68	–	–	–	

\*  $\sigma$  – условная прочность при разрыве, МПа;  $\varepsilon$  – относительное удлинение при разрыве, %;  $\Delta$  – усадка, %;  $H$  – твердость, усл. ед.

В связи с тем, что герметик ВИКСИНТ У-2-28 полностью теряет эластичность после двухчасового воздействия температуры 350 °С дальнейшие его испытания считаются нецелесообразными.

Для исследования термического старения при температуре 400 °С выбраны герметики, показавшие лучшие результаты в исследовании термического старения при температуре 350 °С: ВИКСИНТ У-4-21, ВГО-1 и УФ-7-21. Для предварительного испытания выбран режим нагрева в течение 1 ч. Наряду с пластинами герметика термическому старению подвергали образцы герметиков, нанесенных на металл – алюминевый сплав Д16-АТ.

После прогрева образцов при температуре 400 °С в течение 1 ч установлено, что все исследованные герметики находятся в плохом состоянии и не могут подвергаться механическим испытаниям. Характеристики внешнего вида образцов герметиков после термического старения при температуре 400 °С приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Внешний вид кремнийорганических герметиков типа ВИКСИНТ после термического старения при температуре 400 °С в течение 1 ч**

Герметик	Внешний вид материалов	
	в виде пластины	на металлической подложке
ВИКСИНТ У-4-21	Герметик пористый, расслоился, на поверхности мелкие трещины; эластичность сохраняется	Герметик пористый, большое количество глубоких трещин у поверхности металла
УФ-7-21	Герметик полностью потерял эластичность; форма пластин не изменилась	Герметик хрупкий, без пор
ВГО-1	Герметик хрупкий, пористый	Герметик покрыт глубокими трещинами, у поверхности металла размягчился

Адгезия герметиков к алюминиевому сплаву Д16-АТ на всех образцах сохранилась.

Полученные данные показывают, что исследованные кремнийорганические герметики не могут быть рекомендованы для применения при температуре 400 °С даже в течение 1 ч, так как наблюдаются дефекты типа пор, вздутий и расслоений. Такого рода дефекты могут быть связаны с образованием большого количества летучих продуктов термического распада силоксанового каучука при температуре 400 °С. Обращает на себя внимание отсутствие подобных дефектов у герметика УФ-7-21, основой которого является фенилсилоксановый каучук.

С целью получения более полной характеристики поведения кремнийорганических герметиков типа ВИКСИНТ при температуре 350 °С проведено термическое старение пластин вулканизированных герметиков по режимам, указанным ранее. Одновременно термическому старению подвергали образцы герметиков, нанесенных на металл (алюминиевый сплав Д16-АТ). Определение показателей проводили при температуре 23±2 °С. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Свойства кремнийорганических герметиков типа ВИКСИНТ  
после термического старения по выбранному режиму**

Герметик	Продолжительность термического старения при 350 °С, ч	Физико-механические свойства герметиков после термического старения		Адгезионные свойства после термического старения, кН/см	Внешний вид образцов после термического старения
		σ, МПа	ε, %		
ВИКСИНТ У-1-18	2	2,1	85	1,5 (отрыв когезионный)	Без изменения
ВГО-1	6	2,6	140	–	Образцы пористые, вздулись
	8	3,2	96	0,9 (отрыв когезионный)	
ВИКСИНТ У-4-21	6	2,0	60	0,7	Образцы пористые, трещины на поверхности
	8	2,0	60	0,8 (отрыв когезионный)	
УФ-7-21	8	Пластины с трещинами, испытанию не подлежат		0,7 (отрыв когезионный)	Трещины на поверхности

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

– герметик ВИКСИНТ У-1-18 после 2 ч воздействия температуры 350 °С сохраняет условную прочность и относительное удлинение при разрыве на удовлетворительном уровне, материал не имеет трещин, адгезия сохраняется;

– герметик ВГО-1 имеет удовлетворительные показатели условной прочности и относительного удлинения при разрыве, а также адгезии после 8 ч воздействия температуры 350 °С, однако наблюдается сильное вспучивание герметика, нанесенного на металл;

– герметик ВИКСИНТ У-4-21 быстро снижает величину относительного удлинения при разрыве после воздействия температуры 350 °С в течение 6 ч, которое в течение 2 ч не меняется, но при этом наблюдается склонность образцов к растрескиванию;

– герметик УФ-7-21 имеет низкий исходный показатель относительного удлинения при разрыве, который снижается под влиянием температурного воздействия.

Результаты исследований, проводимых в последнее время в научных центрах России, показывают пути получения вулканизатов с увеличенным ресурсом работы при температуре 350 °С и более с помощью введения в базовую рецептуру исследованных герметиков таких компонентов, как термостабилизаторы, усовершенствованные наполнители и отверждающие системы, другие усиливающие добавки.

С помощью наполнителей, которые являются третьим по значимости компонентом в герметизирующих композициях, можно улучшить эксплуатационные характеристики – снизить линейную усадку, повысить термостойкость, тиксотропность (при работе на отвесных плоскостях), адгезионные, антикоррозионные и другие свойства. В последние годы разработаны методы получения порошкообразных наполнителей с разделением частиц по размерам воздушно-центробежным способом, которые позволяют получать вулканизаты с улучшенным набором свойств.

В зависимости от формы наполнители делятся на следующие категории:

– с игольчатой формой кристаллов (волластонит, относящийся к природным кристаллам с химической формулой  $\text{Ca}_3(\text{Si}_3\text{O}_9)$ , – водостоек, химически инертен, терлостоек до  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ , морозостоек) [19–21];

– с пластинчатой формой частиц (слюда; по химическому составу – силикаты различных металлов, которые применяются для повышения адгезии, а также препятствуют образованию осадка при хранении) [22, 23];

– с частицами в форме полых микросфер, которые представляют собой шарики правильной формы диаметром до  $400\text{ }\mu\text{м}$  и толщиной стенок  $2\text{--}20\text{ }\mu\text{м}$ , – к ним относятся стеклянные, фенолформальдегидные, эпоксидные и другие. Вулканизаты с такими наполнителями отличаются низкой плотностью и работоспособностью от температуры  $500\text{ }^\circ\text{C}$  и более, применяются в составе тепло- и огнезащитных материалов [24, 25];

– волокнистые наполнители, которые используются в качестве армирующего материала. Наиболее широко применяется асбест, по химическому строению представляющий собой  $3\text{Mg}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  [26]. Асбест образует в кремнийорганических соединениях структуры, обеспечивающие значительное повышение тепло- и термостойкости, а также прочности. В качестве наполнителя также широкое применение имеют волокна оксида алюминия [27], которые сохраняют форму уплотнителя и оказывают сопротивление тепловому потоку после выгорания герметика при действии температур более  $600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ .

### Заключения

Исследовано изменение физико-механических свойств кремнийорганических герметиков при температуре  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . Воздействие этой температуры в течение 1 ч приводит к потере эластичности и растрескиванию всех испытанных образцов кремнийорганических герметиков, что не позволяет рекомендовать их для работы в этих условиях.

Исследование изменения физико-механических свойств и усадок кремнийорганических герметиков при температуре  $350\text{ }^\circ\text{C}$  в течение от 2 до 20 ч показало, что по стойкости к старению герметики типа ВИКСИНТ располагаются в следующем порядке: У-4-21, ВГО-1, УФ-7-21, У-1-18 и У-2-28. Установлен допустимый режим термического старения для каждого материала.

Физико-механические свойства кремнийорганических герметиков ВИКСИНТ У-1-18, ВИКСИНТ У-2-28 и ВГО-1 после воздействия температуры снижаются в меньшей степени, чем у герметика с меньшим наполнением ВИКСИНТ У-4-21.

Термостарение кремнийорганических герметиков ВИКСИНТ У-1-18, ВГО-1, ВИКСИНТ У-4-21 и УФ-7-21 по выбранным режимам показало, что герметик ВГО-1 после воздействия температуры  $350\text{ }^\circ\text{C}$  становится пористым, а герметик ВИКСИНТ У-4-21 растрескивается. Герметик ВИКСИНТ У-1-18 удовлетворительно сохраняет свои свойства после термического старения при температуре  $350\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 ч.

Показаны пути получения вулканизатов с увеличенным ресурсом работы при температуре  $350\text{ }^\circ\text{C}$  и более с помощью введения в базовую рецептуру герметиков таких компонентов, как термостабилизаторы, усовершенствованные наполнители и отверждающие системы, другие усиливающие добавки.

## Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
3. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
4. Минасян Р.М. Силиконовые однокомпонентные клеи-герметики // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2010. № 10. С. 31–34.
5. Шарова И.А., Петрова А.П. Обзор по материалам международной конференции по клеям и герметикам (WAC-2012, Франция) // *Труды ВИАМ*. 2013. № 8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021).
6. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
7. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
8. Чигорина Е.А., Арутюнянц А.А., Бестаев М.В., Чигорина Т.М., Абаев В.Т. Органосилоксановые клеи-герметики с повышенными физико-механическими свойствами // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2010. № 1. С. 24–27.
9. Gosh D., Khastgir D. Degradation and stability of polymeric high-voltage insulators and prediction of their service life through environmental and accelerated aging processes // *ACS Omega*. 2018. No. 3. P. 11317–11330.
10. Савенкова А.В. Герметики с повышенными тепло- и морозостойкостью // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2008. № 3. С. 13–15.
11. Старцев В.О. Методы исследования старения полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 9. С. 16–26.
12. Елисеев О.А., Глазов П.А., Илюхина М.А. Исследование кинетики термического разложения вулканизатов низкомолекулярных кремнийорганических каучуков // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. № 6. С. 18–21.
13. Шитов Р.О., Китаева Н.С., Ширякина Ю.М., Куршев Е.В. Исследование влияния модифицирующих добавок различной природы на термоокислительную устойчивость модельного кремнийорганического связующего // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-19-28.
14. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Котова Е.В. Термостойкие клеи для изделий авиакосмической техники // *Труды ВИАМ*. 2014. № 3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-6-6.
15. Киреев В.В., Дьяченко Б.И., Рыбалко В.П. Строение и термоокислительные превращения полиметилсесквиоксана // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2008. Т. 50. № 4. С. 614.
16. Склеивание в машиностроении: справочник: в 2 т. / под ред. Г.В. Мальшевой. М.: Наука и технологии, 2005. Т. 1. С. 87–97.
17. Хананашвили Л.М., Андрианов К.А. Технология элементоорганических мономеров и полимеров. М.: Химия, 1983. С. 416.
18. Неелова О.В., Газзаева Р.А. Отверждающая система для полиорганосилоксановых композиций // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2016. № 9. С. 2–8.
19. Hamdani S., Longuet C., Perrin D., Lopez-cuesta J.-M. Flame retardancy of silicone-based materials: Review // *Polymer Degradation and Stability*. 2009. Vol. 94. No. 4. P. 465–495. DOI: 10.1016/j.polymerdegradstab.2008.11.019.

20. Kim Y., Joeng H., Lee K.W. Mechanical and Thermal Properties of Environmentally Benign Silicone Foam Filled with Wollastonite // *Elastomers and Composites*. 2020. Vol. 55. No. 4. P. 300–305.
21. Wong J.F., Chan J.X., Hassan A., Mohamad Z. Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: a review // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. No. 2. P. 1–40.
22. Liao Y., Weng Y., Wang J. Silicone rubber composites with high breakdown strength and dielectric loss based on polydopamine coated mica // *Polymers*. 2019. Vol. 11. No. 12. DOI: 10.3390/polym11122030.
23. Wang J., Ji C., Yan Y., Zhao D. Mechanical and ceramifiable properties of silicone rubber filled with different inorganic fillers // *Polymer Degradation and Stability*. 2015. No. 121. P. 149–156.
24. Zubareva A.N., Utkin A.V., Mochalova V.M., Efremov V.P. Experimental study of spall strength of silicon rubber with microspheres under shock-wave action // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. No. 1556. Art. 012026. URL: <http://www.iopscience.iop.org> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1556/012026.
25. Montazeri Sh., Ranjbar Z., Osati M. Preparation and characterization of a thermal barrier heat-resistant silicone coating // *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2020. Vol. 15. P. 65–73.
26. Zhang J., Jiang G., Tianhao H. et al. Synthesis and performance of polyurethane/silicon oxide nano-composite coatings // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2019. Vol. 26. Is. 1. P. 301–307.
27. Ивахненко Ю.А., Баруздин Б.В., Варрик Н.М., Максимов В.Г. Высокотемпературные волокнистые уплотнительные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.

#### References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Авиационные материалы и технологии*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
3. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
4. Minasyan R.M. Silicone one-component adhesive-sealants. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, no. 10, pp. 31–34.
5. Sharova I.A., Petrova A.P. Review of world adhesive and sealant conference (WAC-2012, France). *Trudy VIAM*, 2013, no. 8, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021).
6. Kablov E.N. VIAM: materials of new generation for PD-14. *Krylya Rodiny*. 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
7. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
8. Chigorina E.A., Arutyunyan A.A., Bestaev M.V., Chigorina T.M., Abaev V.T. Organosiloksanovye glues-sealants with the increased physico-mechanical properties. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 1, pp. 24–27.
9. Gosh D., Khastgir D. Degradation and stability of polymeric high-voltage insulators and prediction of their service life through environmental and accelerated aging processes. *ACS Omega*, 2018, no. 3, pp. 11317–11330.
10. Savenkova A.V. Sealants with increased heat and frost resistance. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2008, no. 3, pp. 13–15.
11. Startsev V.O. Methods for studying the aging of polymer binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 9, pp. 16–26.

12. Eliseev O.A., Glazov P.A., Pyukhina M.A. Study of the kinetics of thermal decomposition of vulcanizates of low molecular weight organosilicon rubbers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2015, no. 6, pp. 18–21.
13. Shitov R.O., Kitaeva N.S., Shiryakina Yu.M., Kurshev E.V. Research of influence of modifiers of varied nature on the thermo-oxidative stability of a model silicone binder. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-19-28.
14. Lukina N.F., Petrova A.P., Kotova E.V. Heat-resistant adhesives used in aviation and space technique. *Trudy VIAM*, 2014, no. 3, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-6-6.
15. Kireev V.V., Dyachenko B.I., Rybalko V.P. Structure and thermo-oxidative transformations of polymethylsilsesquioxanes. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*. Ser.: A, 2008, vol. 50, no. 4, p. 614.
16. *Bonding in mechanical engineering*: reference book: in 2 vols. Ed. G.V. Malyshev. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2005, vol. 1, pp. 87–97.
17. Khananashvili L.M., Andrianov K.A. Technology of organoelement monomers and polymers. Moscow: Khimiya, 1983, p. 416.
18. Neelova O.V., Gazzaeva R.A. Curing system for polyorganosiloxane compositions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2016, no. 9, pp. 2–8.
19. Hamdani S., Longuet C., Perrin D., Lopez-cuesta J.-M. Flame retardancy of silicone-based materials: Review. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, vol. 94, no. 4, pp. 465–495. DOI: 10.1016/j.polymerdegradstab.2008.11.019.
20. Kim Y., Joeng H., Lee K.W. Mechanical and Thermal Properties of Environmentally Benign Silicone Foam Filled with Wollastonite. *Elastomers and Composites*, 2020, vol. 55, no. 4, pp. 300–305.
21. Wong J.F., Chan J.X., Hassan A., Mohamad Z. Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: a review. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, no. 2, pp. 1–40.
22. Liao Y., Weng Y., Wang J. Silicone rubber composites with high breakdown strength and dielectric loss based on polydopamine coated mica. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 12. DOI: 10.3390/polym11122030.
23. Wang J., Ji C., Yan Y., Zhao D. Mechanical and ceramifiable properties of silicone rubber filled with different inorganic fillers. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, no. 121, pp. 149–156.
24. Zubareva A.N., Utkin A.V., Mochalova V.M., Efremov V.P. Experimental study of spall strength of silicon rubber with microspheres under shock-wave action. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, no. 1556, art. 012026. Available at: <http://www.iopscience.iop.org> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1556/012026.
25. Montazeri Sh., Ranjbar Z., Osati M. Preparation and characterization of a thermal barrier heat-resistant silicone coating. *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 2020, vol. 15, pp. 65–73.
26. Zhang J., Jiang G., Tianhao H. et al. Synthesis and performance of polyurethane/silicon oxide nano-composite coatings. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2019, vol. 26, is. 1, pp. 301–307.
27. Ivakhnenko Yu.A., Baruzdin B.V., Varrik N.M., Maksimov V.G. High-temperature fibrous sealing materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, No. S, pp. 272–289. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-272-289.

**Информация об авторах**

**Илюхина Марина Анатольевна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Тимонин Владимир Васильевич**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Marina A. Pyukhina**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vladimir V. Timonin**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 22.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.12.2021.

The article was submitted 22.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 30.12.2021.