

УДК 667.638.43

Э.К. Кондрашов¹

ТЕРМОСТОЙКИЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ ШПАТЛЕВКИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-7-7

Проведен сравнительный анализ скорости термоокислительной деструкции пленкообразователей различной природы и доказана необходимость использования полиорганосилоксанов для разработки термостойких шпатлевок.

Обоснован выбор неорганических термостойких наполнителей, обеспечивающих минимальные внутренние напряжения в покрытиях шпатлевок с учетом влияния наполнителей на скорость термоокислительной деструкции полиорганосилоксанов. Приведены результаты оценки технологических, физико-механических, реологических и диэлектрических свойств шпатлевок марок КО-0035, КО-0066, КО-0067 и КО-0070, а также их термостойкости при нагревании в изотермических условиях и в газодинамическом потоке.

Ключевые слова: шпатлевка, термостойкость, внутреннее напряжение, вязкость покрытия.

The comparative rate analysis of thermo-oxidative destruction of the film-forming agent of various nature is carried out and necessity of applying polyorganosiloxanes for the development of heat-resistant putties is proved.

The choice of the inorganic heat-resistant fillers providing the minimum internal stresses in coatings with putties taking into account influence of fillers on the rate of thermo-oxidative destruction polyorganosiloxanes is reasonable. Results of assessment of technological, physico-mechanical, rheological and dielectric properties of КО-0035, КО-0066, КО-0067, КО-0070 putties, and also their heat resistance when heating in isothermal conditions and in gas-dynamic flow are given.

Keywords: putty, heat resistance, internal stress, coating viscosity.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Несмотря на достаточно большой объем информации, касающейся термостойких кремнийорганических покрытий [1–4], обобщающие сведения о свойствах и областях применения термостойких кремнийорганических шпатлевок в научно-технической литературе практически отсутствуют.

Вместе с тем они находят достаточно широкое применение в производстве сверхзвуковых летательных аппаратов для защиты элементов конструкций из стеклопластиков от газозерозионного износа и могут найти применение в изделиях нового поколения [5, 6]. Цель данной работы – восполнить этот пробел.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Материалы и методы

В процессе проведения исследований использованы кремнийорганические смолы марок К-9, КО-08, КО-915, КО-945, К-23-Э(3Н) и неорганические дисперсные наполнители и пигменты промышленного производства, а также стандартные для лакокрасочных материалов и покрытий методы испытаний по ГОСТ.

Величину внутренних напряжений определяли по методике А.Г. Санжаровского [7], реологические свойства – с использованием прибора специальной конструкции (рис. 1), диэлектрические свойства – с помощью стенда специальной конструкции (рис. 2). Устойчивость покрытий к газэрозионному износу можно оценивать прямыми или косвенными методами. К прямым методам относятся аэродинамические и газодинамические испытания, к косвенным – термомеханические и реологические исследования.

Более доступными и простыми являются газодинамические методы, когда испытания покрытий проводятся на моделях в потоке выхлопных газов газотурбинного двигателя. Схема такого стенда представлена на рис. 3. Регулируя расстояние от сопла, можно обеспечить требуемый режим испытаний, что и было использовано в данной работе.

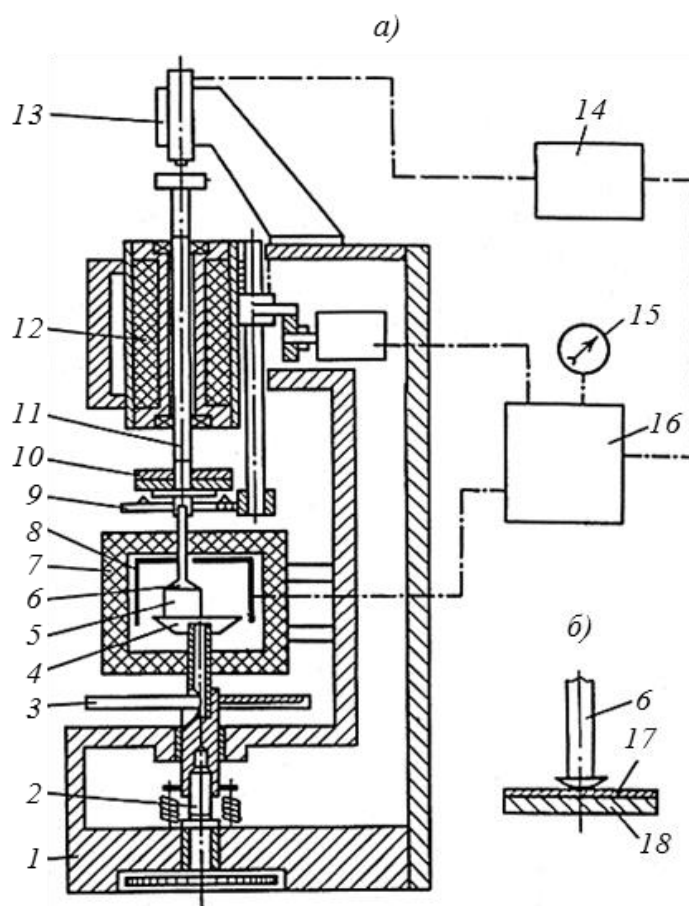


Рис. 1. Прибор для определения термомеханических и реологических свойств полимеров и покрытий при малых нагрузках:

a – схема прибора; *б* – конструкция ячейки; 1 – корпус; 2, 3 – механизм подъема стола; 4 – стол; 5 – образец с покрытием; 6 – индентор; 7 – корпус термостата; 8 – нагревательный элемент; 9 – механизм нагружения; 10 – съемный груз; 11 – шток; 12 – электромагнитная катушка; 13 – измерительная головка; 14–16 – регистрирующие устройства; 17 – покрытие; 18 – металлический диск

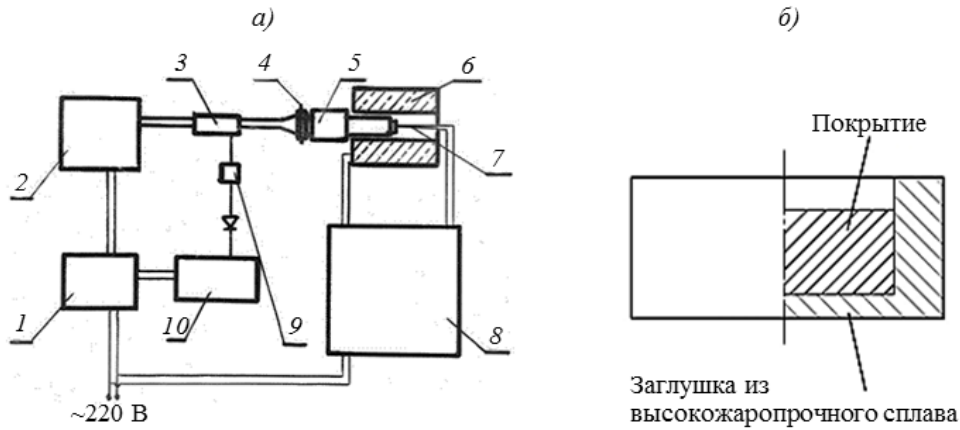


Рис. 2. Стенд для определения диэлектрических характеристик покрытий на частоте 10^{10} Гц: а – схема стенда; б – круглая короткозамыкающая заглушка; 1 – стабилизатор напряжений; 2 – генератор электромагнитного излучения с частотой 10^{10} Гц; 3 – измерительная волноводная линия; 4 – волновод для перехода прямоугольного сечения волноводной линии в круглое; 5 – узел охлаждения цилиндрического волновода; 6 – муфта; 7 – термопара круглой короткозамыкающей заглушки; 8 – блок регулирования температуры муфеля и заглушки; 9 – согласующее устройство; 10 – измеритель сигналов

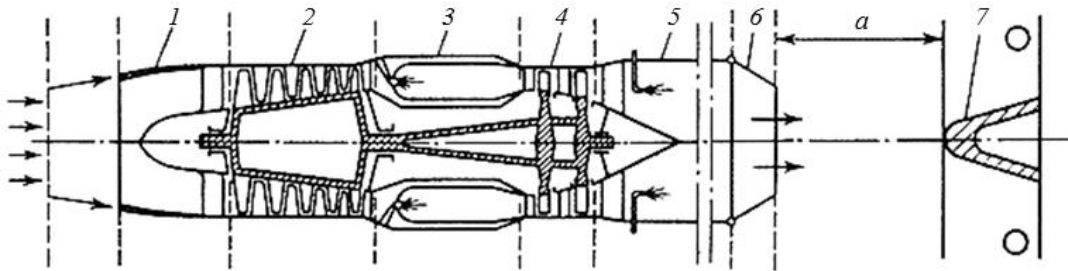


Рис. 3. Стенд для газодинамических испытаний покрытий: 1 – входное устройство; 2 – компрессор; 3 – камера сгорания; 4 – турбина; 5 – форсажная камера; 6 – выходное сопло; 7 – модель; а – расстояние от входного сопла до модели

Результаты и обсуждение

Исследование термостойкости пленкообразователей различных классов методом динамического термогравиметрического анализа (ДТГА) показало, что только полиорганосилоксаны могут рассматриваться в качестве пленкообразователей термостойких покрытий для работы при температурах $>400^{\circ}\text{C}$ (табл. 1), так как все остальные классы пленкообразователей полностью разрушаются при температуре 900°C .

Однако в процессе термоокислительной деструкции полиорганосилоксанов происходит не только изменение их химического состава, но и весьма существенное изменение объема пленки (рис. 4), что приводит к возникновению еще одной составляющей внутренних напряжений – внутренних напряжений, возникающих в покрытии в процессе усадки пленкообразователя при термоокислительной деструкции. Эта часть суммарных внутренних напряжений может быть снята путем введения в покрытие достаточно большого числа термостойких наполнителей и пигментов.

Таблица 1

Основные параметры* процесса термоокислительной деструкции полимерных пленкообразователей, определенные с использованием метода ДТГА [2]

Полимер	Температура, °С			$E_{эф}$, ккал/моль	ΔW^{900° , %
	$t_{0,01}$	$t_{0,1}$	t_{max}		
КО-08	322	540	324	27,4	13,6
СП-97	430	534	578	33,4	100
К-9	430	525	598	26,7	42,8
ПФСО	468	522	504	38,8	57,4
Ф-42Л	382	430	456	46,4	100
СКФ-26	334	425	452	28,6	100
К-23-Э(ЗН)	324	408	538	24	62
СКФ-32	300	401	462	22,4	100
КО-928	156	392	222	16,0	19,2
Ф-32Л	342	386	410	19,3	100
КО-915	275	368	400	23,3	54,8
ЭП-571	246	322	332	23,7	100
ВИАМ-БЗ	100	300	125	6,6	100
КО-945	168	288	340	19,0	83,8
ХСПЭ	172	278	280	13,8	100
ЭП-730	216	277	322	13,8	100
ПСХ-ЛС	196	246	264	24,6	100
АС-16	150	242	256	13,3	100
ПЭФ-3А	184	234	214	11,8	100
МЧ-025	100	175	228	7,7	100

* $t_{0,01}$, $t_{0,1}$ и t_{max} – температуры, при которых потеря массы составляет 1; 10% и максимальную соответственно; $E_{эф}$ – энергия активации процесса термоокислительной деструкции; ΔW^{900° – потери массы при 900°С.

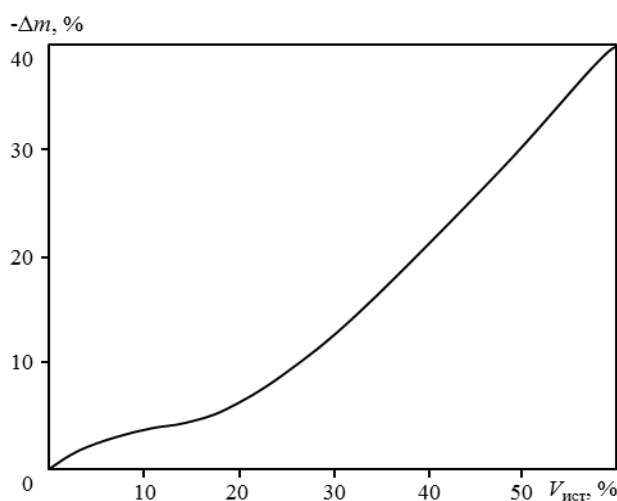


Рис. 4. Уменьшение истинного объема ($V_{ист}$) смолы К-9 от потери массы (Δm) в процессе изотермического старения при температуре 700°С [8]

Таким образом, суммарные внутренние напряжения $\sigma_{в.о}$ могут быть рассчитаны по уравнению

$$\sigma_{в.о} = \sigma_{в.ф} + \sigma_{в.т} + \sigma_{в.т.у},$$

где $\sigma_{в.ф}$ – внутренние напряжения, возникающие в результате формирования покрытия; $\sigma_{в.т}$ – термические внутренние напряжения; $\sigma_{в.т.у}$ – внутренние напряжения, возникающие в покрытии при усадке пленкообразователя в процессе термоокислительной деструкции.

Следует отметить, что внутренние напряжения не только могут вызвать разрушение покрытия в результате его недостаточной прочности и деформативности [8, с. 114], но и явиться также причиной снижения адгезии покрытий к подложке [9, с. 224]. В силу

изложенных причин внутренние напряжения, длительная прочность и удлинение при разрыве являются важными эксплуатационными характеристиками покрытий [8, с. 120].

Использование дисперсных наполнителей для повышения прочности полимерных композиций достаточно подробно рассмотрено в научно-технической литературе. При этом считают, что для хрупких покрытий, какими и являются кремнийорганические покрытия, длительная прочность составляет 0,4–0,5 от кратковременной [8, с. 112].

Однако использование дисперсных неорганических наполнителей в рецептурах термостойких кремнийорганических покрытий требует оценки их влияния на скорость термоокислительной деструкции кремнийорганических пленкообразователей. Поскольку влияние дисперсного наполнителя на скорость термоокислительной деструкции в основном сказывается в зоне поверхности раздела «полимер–наполнитель», определяли величину удельной поверхности наиболее часто используемых пигментов и наполнителей (табл. 2), а в табл. 3 и 4 указаны потери массы полимерных пленкообразователей, которые (потери) зависят не только от природы дисперсного наполнителя, но и от температуры, продолжительности нагрева и объема наполнения.

Таблица 2

Величина удельной поверхности дисперсных термостойких пигментов и наполнителей [2]

Удельная поверхность, м ² /г (м ² /см ³), наполнителя или пигмента											
слюда	Cr ₂ O ₃	ZnO	PbO	ZrO ₂	TiO ₂	талек	красный оксид железа	SiO ₂	MgO	микроасбест	Al ₂ O ₃
4,7 (13,4)	1,45 (7,8)	7,15 (40)	1 (9,5)	3,6 (19)	3,5 (17)	6,7 (20)	13,6 (65)	31,4 (90)	30,8 (98)	23,3 (60)	19,2 (66)

Таблица 3

Потери массы кремнийорганической смолы К-9 в композициях, содержащих дисперсные пигменты или наполнители (из расчета 10 м² поверхности наполнителя на 1 см³ смолы) [2]

Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, ч	Потери массы, %, смолы с термостойкими дисперсными наполнителями или пигментами						
		без наполнителя (смола)	ZrO ₂	TiO ₂	ZnO	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂
250	1	1,3	1	1,05	0,65	0,4	0,2	0,54
	25	3,5	2,65	2,5	2	1,85	1,5	2,4
	1000	4,3	3,6	3	3,5	3,4	2,8	3,1
350	1	5	3,2	4,1	3,6	4,85	2,75	3,45
	15	5,75	3,45	5	3,8	5,65	3	4,15
	100	6,05	4,45	5,15	4,55	5,95	4,55	4,9
700	5 мин	22	20,5	20	19,5	20,5	22	18
	15 мин	40	38	35	37	36,5	37,5	29

Продолжение

Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, ч	Потери массы, %, смолы с термостойкими дисперсными наполнителями или пигментами					
		талек	микроасбест	молотая слюда	Cr ₂ O ₃	красный оксид железа	PbO
250	1	1,8	1,6	1,46	1,1	2,4	1,6
	25	3,9	4	3,25	2,45	4,7	5,9
	1000	4,9	5,7	3,9	5	6	14,3
350	1	2	2,9	3,7	6,05	6,75	11,9
	15	2,65	3,95	4,3	8	7,7	15,3
	100	4,25	5,05	5,05	10,5	8	19,55
700	5 мин	21,5	23	23,5	25	22	62
	15 мин	39,5	36	45	46	34	60

Таблица 4

Потери массы кремнийорганической смолы К-23-Э(ЗН) в композициях, содержащих дисперсные пигменты или наполнители

Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, ч	Потери массы, %, смолы с термостойкими дисперсными наполнителями или пигментами					
		без наполнителя (смола)	TiO ₂	ZnO	тальк	молотая слюда	Cr ₂ O ₃
300	100	8	6,2	8,8	4,5	4,5	10,5
350	100	8	8,1	12	4,8	5,8	12
400	10	16	18	12	10,5	15,8	13,2
700	5 мин	32	27,5	35	22	27	31

Согласно теории гетерогенного катализа, дисперсные системы, которые изменяют реакционную способность адсорбированных молекул и не проявляют при этом признаков химического взаимодействия, относятся к катализаторам (положительный катализ) или антикатализаторам (отрицательный катализ).

Как показало изучение электропроводности, значительная часть дисперсных наполнителей и пигментов – например, оксиды железа, ванадия, меди, марганца, свинца, цинка, магния, алюминия; сульфиды вольфрама, молибдена и цинка; алюмосиликаты, а также другие соединения – в настоящее время классифицируются как полупроводники, что объясняется наличием примесей и отклонениями от стехиометрического состава [10].

С.З. Рогинским установлено [11], что если ширина запрещенной зоны достигает нескольких электрон-вольт, то концентрация электронов в полосе проводимости ничтожно мала и образуется диэлектрик, в котором практически отсутствуют электронная проводимость и окраска в видимой части спектра, и наоборот – при ширине запрещенной зоны, равной 1,2–1,4 эВ, достигается электронная проводимость, характерная для полупроводников, и увеличивается интенсивность окраски в видимой части спектра.

Когда на поверхности полупроводника адсорбируется какое-либо органическое соединение, происходит переход электронов и дырок непосредственно на орбитали адсорбированной молекулы, хотя этот переход не реализуется для огромного количества валентно-насыщенных молекул, которые характерны для процесса адсорбции и катализа [11].

Следует отметить, что в работах по гетерогенному катализу не рассматриваются системы «полимер–дисперсный наполнитель», хотя эти системы широко применяются на практике.

Вместе с тем не только определение потери массы полимерных пленкообразователей в процессе нагревания и ИК и ЯГР спектров, но и результаты хроматографического анализа позволяют отнести дисперсные наполнители к катализаторам или антикатализаторам процесса термоокислительной деструкции.

Выявлены и внешние признаки, подтверждающие участие электронов запрещенной зоны в процессе термоокислительной деструкции и группировании активных центров на определенных участках поверхности наполнителя.

Сравнение интенсивности окраски термостойких покрытий, в которые для придания требуемого цвета вводились термостойкие цветные пигменты с шириной запрещенной зоны 1,2–1,4 эВ, до и после нагрева показывает, что после нагрева интенсивность окраски покрытий во всех случаях снижается в большей или меньшей степени, в то время как нагрев того же пигмента в тех же условиях, но вне полимерной матрицы не приводит к заметному изменению интенсивности окраски.

Очень часто в процессе нагрева цветных термостойких покрытий на их поверхности появляются пятна диаметром 2–5 мм, интенсивность окраски которых значительно ниже, чем у остальной поверхности, что, согласно теории «активных

ансамблей», свидетельствует о группировании активных центров на определенных участках поверхности наполнителей и пигментов.

При выборе дисперсных наполнителей необходимо учитывать такой показатель, как критическая объемная концентрация дисперсного наполнителя, которая в значительной степени зависит от величины удельной поверхности наполнителя. С учетом этого показателя наибольший интерес представляют оксиды свинца и хрома и молотая слюда. Однако оксид свинца является катализатором процесса термоокислительной деструкции полиорганосилоксанов (табл. 3), а по сравнению с оксидом хрома только чешуйки молотой слюды обладают армирующим эффектом.

Исследование внутренних напряжений, возникающих в пленках покрытий, содержащих молотую слюду различной дисперсности, показало, что с увеличением размера частиц внутренние напряжения сначала снижаются, а затем возрастают, меняя знак (рис. 5). Это свидетельствует о возможности введения в покрытие молотой слюды с такой дисперсностью, что внутренние напряжения, возникающие в покрытии, будут близки к нулю, а также о влиянии размера частиц молотой слюды на величину внутренних напряжений.

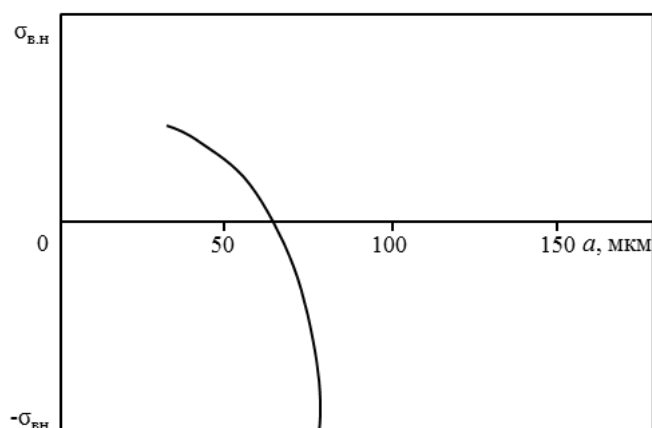


Рис. 5. Зависимость внутренних напряжений ($\sigma_{в.н}$) в кремнийорганическом покрытии от размера частиц молотой слюды (a)

Таким образом, термостойкое кремнийорганическое покрытие с минимальными внутренними напряжениями должно содержать либо частицы молотой слюды со строго определенными размерами (что практически трудно осуществить), либо смесь частиц всех размеров, взятых в определенном соотношении, что и применяется на практике.

Снижение внутренних напряжений в покрытиях при использовании молотой слюды достигается не только за счет формы ее частиц и их соотношения по размерам, но и благодаря низкой удельной поверхности молотой слюды ($13,5 \text{ м}^2/\text{см}^3$), что позволяет вводить ее в больших количествах, чем другие дисперсные наполнители, и в тем большей степени снижать внутренние напряжения.

С использованием молотой слюды определенной дисперсности разработаны шпатлевки КО-0066 (на основе лака КО-915) и КО-0070 (на основе блоксополимера К-23-Э(ЗН)), технические характеристики которых приведены в табл. 5 и 6.

При температурах, превышающих 500°C , термостойкость покрытий с шпатлевками КО-0066 и КО-0070 ограничивается уже минутами, что объясняется снижением прочности покрытий в результате деструкции кремнийорганических пленкообразователей, сопровождающейся увеличением внутренних напряжений в покрытиях в результате их усадки.

Таблица 5

Основные контролируемые характеристики шпатлевки КО-0066

Показатель	Значения показателя
Цвет шпатлевочного слоя	Зеленый, оттенок не нормируется
Внешний вид шпатлевочного слоя	После высыхания поверхность шпатлевки должна быть однородной: без пузырей, трещин и посторонних включений
Массовая доля нелетучих веществ, %	67±2
Остаток на сите №01, %	2,5–4,5
Время высыхания шпатлевки до степени 3 при температуре 250±2°C, ч (не более)	3,5
Способность к нанесению	Шпатлевка должна хорошо наноситься при рабочей вязкости на окрашиваемую поверхность краскораспылителем
Твердость шпатлевочного слоя, усл. ед. (не менее), по маятниковому прибору типа: М-3 ТМЛ (маятник А)	0,25 0,2
Термостойкость при температуре 400±2°C, ч (не менее)	5

Таблица 6

Основные контролируемые характеристики шпатлевки КО-0070

Показатель	Значения показателя
Цвет пленки шпатлевки	Светло-серый, оттенок не нормируется
Внешний вид пленки	Высохшая пленка должна быть ровной, не иметь механических включений
Условная вязкость, с, полуфабриката шпатлевки при температуре 20,0±0,5°C по вискозиметру типа ВЗ с диаметром сопла 4,000±0,015 мм	18–20
Массовая доля нелетучих веществ полуфабриката шпатлевки, %	74–78
Остаток на сите №01 при промывке полуфабриката шпатлевки толуолом, %	3–5
Твердость пленки шпатлевочного слоя по прибору типа М-3, усл. ед. (не менее)	0,25
Термостойкость шпатлевочного слоя при температуре 400±10°C, ч	5
Жизнеспособность шпатлевки после добавления отвердителя А-39 марки В при температуре 20±5°C, ч (не менее)	24

Однако внутренние напряжения отсутствуют в телах, сохраняющих геометрические размеры при снижении вязкости $<10^{13}$ Па·с. Это свойство твердых тел реализовано при разработке шпатлевок КО-0035 и КО-0067М, в которых в качестве основного наполнителя также использовалась молотая слюда.

В качестве пленкообразователя шпатлевки КО-0035 (табл. 7) использована кремнийорганическая смола К-9, на основе которой разработаны наиболее термостойкие стеклопластики, но для снижения вязкости покрытия при температурах $>400^\circ\text{C}$ в смолу К-9 введено определенное количество кремнийорганического лака КО-08, используемого в рецептурах наиболее термостойких лакокрасочных покрытий, а в рецептуре шпатлевки КО-0035 – выполняющего функции термостойкого пластификатора.

Таблица 7

Основные контролируемые характеристики шпатлевки КО-0035

Показатель	Значения показателя
Цвет пленки шпатлевки	Зеленый, оттенок не нормируется
Внешний вид пленки	После высыхания должна быть однородной: без пузырей и посторонних включений
Массовая доля нелетучих веществ, %	66–70
Остаток на сите №01 после мокрого просеивания, %	2,5–4,5
Время высыхания шпатлевки до степени 3 при температуре 210±2°С, ч (не более)	3
Способность к нанесению	Шпатлевка при рабочей вязкости должна хорошо наноситься на окрашиваемую поверхность краскораспылителем
Твердость покрытия по маятниковому прибору типа ТМЛ (маятник А), усл. ед. (не менее)	0,2

В табл. 8 представлены результаты испытаний, подтверждающие эффективность применения молотой слюды в рецептуре шпатлевки КО-0035.

Таблица 8

Прочность на разрыв и внутренние напряжения в покрытиях на основе смолы К-9

Свойства	Значения свойств покрытия на основе	
	смолы К-9	шпатлевки КО-0035
Толщина, мкм	200 ⁺²⁰	200 ⁻²⁰
Внутренние напряжения в покрытии, МПа	+0,52	-0,115
Прочность пленки покрытия на разрыв при постоянной нагрузке, МПа	0,4–0,5	2,5–3,0

С использованием прибора для определения термомеханических и реологических свойств (рис. 1) построена номограмма для определения вязкости (рис. 6) и определена вязкость покрытия шпатлевки КО-0035 (табл. 9).

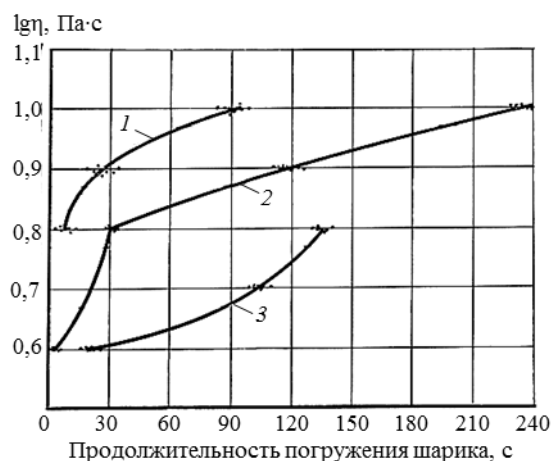


Рис. 6. Номограмма для определения вязкости покрытий при продолжительности погружения в них сферической поверхности ($z=5$ мм) на глубину 0,25 (1); 0,5 (2) и 1 мм (3)

Таблица 9

Вязкость покрытия из шпатлевки КО-0035 толщиной 0,5 мм

Температура испытания, °С	Вязкость при достижении температуры испытаний, Па·с	Продолжительность выдержки при температуре испытания, за которую вязкость превысит 10 ⁹ Па·с, мин
350	10 ⁴ –10 ⁵	3,5
700	~10 ⁸	0,5

Как следует из результатов, представленных в табл. 9, при введении в рецептуру шпатлевки КО-0035 метилфенилполисилоксановой смолы КО-08 вязкость покрытия шпатлевки КО-0035 в интервале температур 350–700°C сохраняется только в течение 0,5–3,5 мин. Поэтому при разработке шпатлевки КО-0067 использовали другой принцип, а именно – превращение слоя покрытия при температурах >700°C в высоковязкий неорганический расплав.

Для этого использовали гетерогенный катализатор процесса термоокислительной деструкции, который позволил обеспечить за короткое время получение диоксида кремния из полиорганосилоксана (рис. 7) и вошел в состав образовавшегося неорганического покрытия вместе с молотой слюдой и диоксидом кремния, создав высоковязкий расплав.

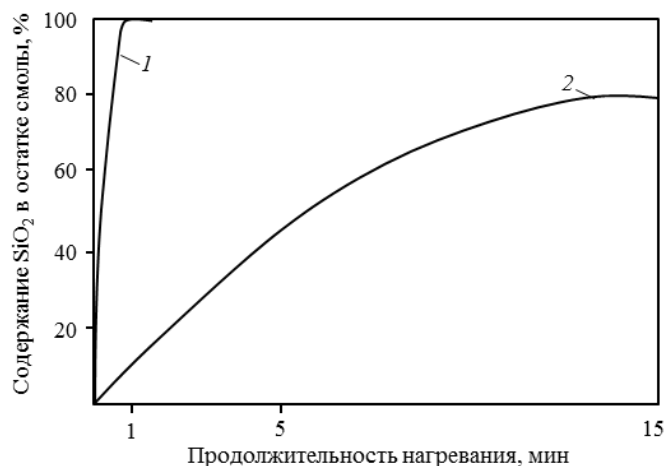


Рис. 7. Скорость образования SiO₂ в процессе термоокислительной деструкции кремнийорганического сополимера К-23-Э(ЗН) с гетерогенным катализатором (1) и без него (2)

В табл. 10 представлены результаты определения вязкости покрытия шпатлевки КО-0067, из которых видно, что в отличие от шпатлевки КО-0035 вязкость покрытия шпатлевки КО-0067 с повышением температуры снижается, но при этом существенно превышает максимальное значение напряжений трения (табл. 11).

Таблица 10

Вязкость покрытия шпатлевки КО-0067 толщиной 0,5 мм

Температура испытания, °С	Вязкость при достижении температуры испытаний, Па·с	Продолжительность выдержки, мин, при температуре испытания, за которую вязкость снизится на 10%
900	~10 ⁷	1
1000	10 ⁵	1
1100	5·10 ³	1
1200	10 ³	0,5

Таблица 11

Зависимость напряжения трения от скорости и высоты полета [12, 13]

Скорость полета – число М	Напряжение трения на поверхности, МПа, при высоте полета, км			
	0,5	1	5	10
1,2	0,14	0,13	0,08	0,04
2	0,38	0,36	0,22	0,11
3	0,86	0,8	0,5	0,2
3,5	1,2	1,0	0,7	0,3

В табл. 12 приведены основные контролируемые характеристики шпатлевки КО-0067, а в табл. 13 – сравнительные данные по термостойкости и диэлектрическим свойствам для шпатлевок марок КО-0066, КО-0035 и КО-0067.

Таблица 12

Основные контролируемые характеристики шпатлевки КО-0067

Показатель	Значения показателя
Цвет шпатлевочного слоя	От светло-желтого до светло-коричневого, оттенок не нормируется
Внешний вид шпатлевочного слоя	После высыхания поверхность шпатлевки должна быть ровной, однородной: без пузырей и механических включений
Условная вязкость шпатлевки по вискозиметру типа ВЗ с диаметром сопла $4,000 \pm 0,015$ мм при температуре $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, с	12–30
Массовая доля нелетучих веществ, %: шпатлевочной пасты суспензии	53–59 67–74
Остаток на сите №01 шпатлевочной пасты после мокрого просеивания, %	1,0–3,5
Время высыхания до степени 3 при температуре $200 \pm 2^\circ\text{C}$, ч (не более)	3
Твердость шпатлевочного слоя по маятниковому прибору типа М-3, усл. ед. (не менее)	0,3
Способность к нанесению	Шпатлевка должна удовлетворительно наноситься на поверхность краскораспылителем
Термостойкость шпатлевочного слоя при температуре $1000 \pm 3^\circ\text{C}$, ч (не менее)	3

Таблица 13

Термостойкость и диэлектрические свойства термостойких кремнийорганических шпатлевок

Свойства	Температура испытания, $^\circ\text{C}$	Значения свойств шпатлевок марок		
		КО-0035	КО-0066	КО-0067
Термостойкость на стеклотекстолите в изотермических условиях, ч	250	2000	500	200
	300	2000	500	100
	400	500	5	Не рекомендуется
	500	12	12	Не рекомендуется
Термостойкость на стеклотекстолите при одностороннем нагревании, мин	600	12	3	То же
	700	3	2	««
	800	2	1	>5
	1000	1	0,5	>5
	1200	Не рекомендуется		>5
	Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^{10} Гц	300	3,27	3,25
500		3,2	3,23	3,7
600		3,16	3,2	4
700		3,1	3,2	4,98
800		3,22	3,1	4,61
900		–	–	4,32
1000		–	–	4,61
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^{10} Гц	300	0,015	0,024	0,02
	500	0,02	0,023	0,014
	600	0,02	0,021	0,017
	700	0,028	0,021	0,1
	800	0,035	0,023	0,06
	900	–	–	0,1
	1000	–	–	0,15

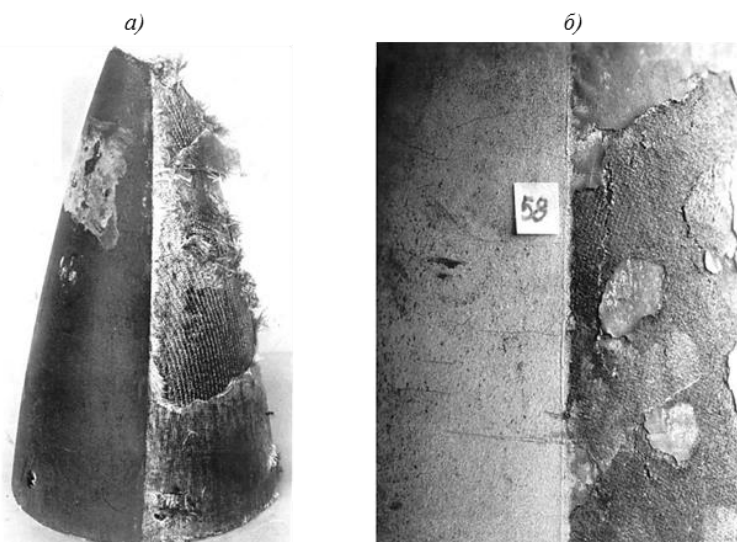


Рис. 8. Внешний вид части поверхности конусов из стеклопластика после газодинамических испытаний:

а – при температуре 450°C в течение 2,5 ч на фенолфурфурольном стеклотекстолите ФН – покрытие шпатлевкой на основе смолы ВИАМ-БЗ (табл. 1) с молотой слюдой (справа) и шпатлевкой КО-0066 (слева); *б* – при температуре 800°C в течение 1 мин на кремнийорганическом стеклотекстолите СК-9МР (смола К-9) – покрытие шпатлевкой КО-0066 (справа) и шпатлевкой КО-0067 (слева)

Для оценки устойчивости к газоэрозионному износу, шпатлевки марок КО-0066 и КО-0067 испытаны в потоке выхлопных газов газотурбинного двигателя (рис. 3). Внешний вид части поверхности макетных конусов после испытаний представлен на рис. 8.

Заключения

Разработана кремнийорганическая радиопрозрачная шпатлевка КО-0067 с термостойкостью 1200°C, не имеющая аналогов в мире, которая может использоваться не только в авиационно-космической технике, но и на внешней поверхности универсального спасательного средства для эвакуации в случае пожара персонала инженерных сооружений, работающего в акваториях морей, в том числе на арктическом шельфе [14]. Для защиты от увлажнения в атмосферных условиях, шпатлевки марок КО-0035, КО-0066 и КО-0067 обычно применяются в системах с эмалями на основе фторсополимеров [15]. Особое значение для шпатлевок такого типа, работающих в экстремальных условиях, приобретает контроль качества покрытий [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашов Э.К., Семенова Л.В. Термостойкие лакокрасочные покрытия // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 316–322.
2. Кондрашов Э.К., Семенова Л.В. Термоокислительная стабильность ненаполненных и дисперсно-наполненных полимерных пленкообразующих // Авиационные материалы и технологии. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 36–41.
3. Семенова Л.В. Термостойкая эмаль ВЭ-63 // Авиационные материалы и технологии. 2003. Вып.: Лакокрасочные материалы и покрытия. С. 41–44.
4. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Лебедева Т.А., Малова Н.Е. Антикоррозионные, терморегулирующие, термостойкие и влагозащитные лакокрасочные покрытия МКС «Буран» // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 137–141.

5. 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.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севостьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // *Стекло и керамика*. 2012. №4. С. 7–11.
7. Санжаровский А.Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. М.: Химия, 1975. 264 с.
8. Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н., Бейдер Э.Я. Эрозионностойкие лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 1989. 136 с.
9. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. 296 с.
10. Киселев Ф.Ф., Крылов С.В. Адсорбционные процессы на поверхности полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1978. 255 с.
11. Рогинский С.З. Электронные явления в гетерогенном катализе. М.: Наука, 1975. 270 с.
12. Голенко Ю.В., Кондрашов Э.К., Старина А.И. Определение реологических свойств покрытия эмали ФП-5105 // *Оборонная техника*. 1977. №7. С. 73–74.
13. Голенко Ю.В., Кондрашов Э.К., Старина А.И. Исследование реологических свойств лакокрасочных покрытий при реально действующих нагрузках // *Авиационная промышленность*. 1977. №5. С. 27–28.
14. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // *Научно-технические проблемы освоения Арктики*. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
15. Кондрашов Э.К., Малова Н.Е. Лакокрасочные покрытия на основе сополимеров трифторхлорэтилена // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2. С. 39–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-39-44.
16. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности и эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. №1. С. 3–8.