

УДК 620.1:621.792

Я.А. Брык¹, Д.Н. Смирнов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ
АВИАЦИОННЫХ ГЕРМЕТИКОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-9-9

Рассмотрены принципы создания морозостойких герметизирующих материалов. В работе исследовано влияние компонентов (наполнители, пластификаторы и сшивающие агенты) на морозостойкость герметиков. Изучены два метода оценки морозостойкости герметиков: определение прочности и относительного удлинения материала при отрицательной температуре, определение динамического модуля сдвига G' и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ в области отрицательных температур. Представлены данные по температурам стеклования герметизирующих материалов, а также температурные зависимости динамических механических характеристик герметиков в зависимости от их полимерной основы. Показано, что морозостойкость герметиков является неоднозначным понятием, поскольку работоспособность материала в конструкции зависит не только от его свойств, но и от характеристик герметичных соединений и условий их работы.

Ключевые слова: морозостойкость, полярные и неполярные каучуки, герметизирующие материалы, температура стеклования, модуль сдвига, относительное удлинение.

Ya.A. Bryk¹, D.N. Smirnov¹**RESEARCH OF FROST RESISTANCE
OF AERONAUTICAL SEALANTS**

The principles of creating frost-resistant sealing materials are considered. The influence of components (fillers, plasticizers and crosslinking agents) on the frost resistance of sealants was investigated. Two methods for evaluating the frost resistance of sealants have been studied: the determination of the strength and elongation of the material at a negative temperature, the determination of the dynamic shear modulus G' and the tangent of the mechanical loss angle $\text{tg}\delta$ in the negative temperature region. The article presents data on glass transition temperatures of sealing materials, as well as temperature dependences of the dynamic mechanical characteristics of sealants, depending on their polymer base. It is shown that the frost resistance of sealants is an ambiguous concept, since the operability of the material in a structure depends not only on its properties, but also on the characteristics of hermetic joints and the conditions of their operation.

Keywords: frost resistance, polar and nonpolar rubbers, sealing materials, glass transition temperature, shear modulus, elongation.

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

Активизация промышленного освоения Арктики требует создания новых типов эластомерных материалов, которые могли бы надежно эксплуатироваться в области устойчивых низких температур и обеспечивать присущие эластомерам специального назначения высокие эластические и эксплуатационные характеристики [1]. Крайне низкие температуры в зимнее время года (до -65°C), значительная интенсивность

ультрафиолетового излучения, приводящая к активизации радикальных процессов старения полимерной основы, резкие колебания температуры в осенне-зимний период приводят к появлению термических напряжений, накоплению микротрещин и, как следствие этого, – к разрушению материала.

Под морозостойкостью герметиков понимают их способность сохранять эксплуатационные свойства при низких температурах. Морозостойкость определяется совместным действием двух процессов – стеклования и кристаллизации [1]. Одной из основных областей применения герметиков является авиация и космонавтика.

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») [2–7].

Материалы и методы

Принципы создания морозостойких герметиков

Выбор типа каучука. Морозостойкие герметики изготавливают, как правило, из морозостойких каучуков с низкой температурой стеклования, в которых затруднена кристаллизация. Наличие в главной цепи каучука двойных связей (СКД, СКИ, НК, БСК, БК) и простых эфирных связей (ПОЭ, ПОМ, ЭХГК, силоксановый каучук) обеспечивает повышенную морозостойкость герметиков. Наименее морозостойкими являются каучуки, в главной цепи которых отсутствуют двойные связи, а в боковых цепях содержатся полярные группы (СКФ, АК, ХСПЭ). Герметики из каучуков, содержащих двойные связи в главной цепи и полярные боковые группы (СКН, ХПК), имеют промежуточную морозостойкость [8].

Введение пластификаторов. Наряду с подбором каучуков наиболее эффективным способом снижения температуры стеклования (T_c) является введение пластификаторов. Следует различать пластификаторы, которые понижают T_c , т. е. улучшают морозостойкость, и мягчители, которые улучшают технологические свойства герметиков, не оказывая заметного влияния на их морозостойкость [9]. Из всего многообразия пластификаторов для получения морозостойких герметиков в основном используют сложные эфиры – фталаты, себацинаты, адипинаты. Выбор типа и содержания пластификатора зависит от применяемого каучука и показателя, по которому оценивается морозостойкость. При этом следует учитывать не только возможность снижения физико-механических показателей герметиков, но и многочисленные диффузионные процессы, протекающие в герметиках при их хранении и эксплуатации. Миграция (экстракционная способность) пластификаторов из герметиков в воздух, а также в углеводородные среды при контакте герметика с рабочими жидкостями, особенно при повышенных температурах, может быть причиной снижения морозостойкости герметиков при увеличении времени хранения и эксплуатации. Основная часть пластификаторов экстрагируется из герметиков на первых стадиях набухания в рабочих средах, затем скорость процесса существенно снижается. Полиэфирные пластификаторы вымываются с меньшей скоростью по сравнению с другими, т. е. обеспечивают длительное сохранение морозостойкости и ее высокий уровень. Для создания морозостойких герметиков значительный интерес представляют недавно появившиеся на рынке сырья пластификаторы: ДАЭНДК – смесь сложных эфиров, полученных переэтерификацией диметилвых эфиров низших дикарбоновых кислот со смесью спиртов и их высококипящих эфиров; ДБЭА – дибутоксиэтиладипинат; ТХЭФ – трихлорэтилфосфат; ЭДОС – смесь диоксидных спиртов и их высококипящих эфиров; ПЭФ-1 – смесь монофениловых эфиров этиленгликоля и фенилгликоля.

Влияние вулканизирующей группы. Правильный выбор вулканизирующей группы является важным рецептурным фактором повышения морозостойкости герметиков. Сшивание каучуков приводит к уменьшению свободного объема и повышению T_c , а соответственно, и к снижению коэффициента морозостойкости. В то же время увеличение до определенной степени густоты сетки повышает коэффициент морозостойкости герметиков на основе полярных и неполярных каучуков в области перехода из высокоэластического в стеклообразное состояние – данный эффект наблюдается при температурах на 10–15°C выше T_c . Для герметиков на основе полярных каучуков серной вулканизации превалирует первый эффект, для герметиков пероксидной вулканизации – второй. Для неполярных каучуков повышение коэффициента морозостойкости при увеличении плотности сшивок наблюдается для герметиков как серной, так и пероксидной вулканизации. Для кристаллизующихся каучуков влияние образующихся при вулканизации структур на морозостойкость проявляется прежде всего в нарушении регулярности цепей макромолекул. Для герметиков на основе каучуков общего назначения наиболее сильное замедление кристаллизации достигается при использовании вулканизирующих групп, приводящих к образованию полисульфидных связей и модификации цепи полимера в присутствии ускорителей типа альтакса и каптакса. Весьма эффективно использовать вулканизирующую систему, содержащую серу и сульфенамидные ускорители. В меньшей степени замедляют кристаллизацию системы с тиурамом без серы или с ее минимальным содержанием, а также пероксиды, т. е. когда вулканизационная сетка образована преимущественно моносулфидными и C–C-связями [10].

Выбор наполнителя. Влияние наполнителя на морозостойкость герметиков определяется особенностями структуры, возникающей при взаимодействии наполнителя с каучуком. Так, введение технического углерода, как правило, не изменяет T_c герметиков, однако существенно влияет на их поведение в области перехода из высокоэластического в стеклообразное состояние. Коэффициент морозостойкости снижается с увеличением дисперсности технического углерода и его содержания в герметике, причем этот эффект заметен для неполярных каучуков [10].

Результаты и обсуждение

Морозостойкость, т. е. способность материала сохранять работоспособность при отрицательных температурах, является одной из важнейших эксплуатационных характеристик герметика. Однако отсутствует простой и точный метод оценки морозостойкости герметиков. Обычно для этой цели используется косвенный способ определения прочности и относительного удлинения (ϵ_z) материала при заданной отрицательной температуре (ГОСТ 21751–76). Недостатками данного метода являются его трудоемкость, значительный расход азота, испытываемых материалов и низкая точность определения основной характеристики ϵ_z , изменение которой вблизи температуры T_c (или T_n) носит ярко выраженный экстремальный характер [11].

В работе [11] показано, что для оценки морозостойкости герметиков может быть использован динамический механический метод, свободный от перечисленных ранее недостатков. Сущность его [12, 13] заключается в определении динамического модуля сдвига (G') и тангенса угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) (ГОСТ 20812–75) в области отрицательных температур.

При сопоставлении результатов статических и динамических измерений было обращено внимание на принципиальное совпадение кривых $\epsilon_z=f(T)$ и $\text{tg}\delta=f(T)$. Показано, что это совпадение обусловлено единым молекулярным механизмом вязкоупругого поведения эластомерных систем при низких температурах. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что в области стеклования для некоторых серийных герметиков температурные интервалы экстремального поведения ϵ_z и $\text{tg}\delta$ достаточно хорошо совпадают. Наибольшее относительное удлинение при растяжении наблюдается при температуре,

соответствующей максимальному поглощению механической энергии при низкочастотных сдвиговых колебаниях (вершина пика $\text{tg}\delta$ находится в области стеклования аморфного полимера или в области плавления частично кристаллического материала).

Таблица 1

Значения температур, соответствующие максимумам зависимостей ϵ_z и $\text{tg}\delta$, для некоторых серийных герметиков

Герметик	Температура максимальных значений функции, °С	
	ϵ_z	$\text{tg}\delta$
51Г-22	-10	-5
У-30МЭС-5	-50	-56
Виксинт У-2-28	-60	-58*
Виксинт УФ-11-21	-65	-68
Виксинт УФ-7-21	-110	-128

* Температура пика зависимости $\text{tg}\delta$ в области плавления кристаллической фазы.

Динамические механические измерения также дают возможность определить и температуру стеклования T_c . Исследования показали, что именно при T_c величина $\text{tg}\delta$ достигает своего минимального значения и остается практически на этом уровне во всей области стеклообразного состояния вплоть до температуры жидкого азота. Для определения T_c рассчитывается низкочастотная скорость звука $C_t = \sqrt{G/\rho}$, где ρ – плотность герметика.

При температуре T_c на графике $C_t=f(T)$ наблюдается отчетливо выраженный излом, температура которого воспроизводится с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

Поскольку точность измерения температуры максимума ϵ_z гораздо ниже, чем температуры пика зависимости $\text{tg}\delta$ и T_c , то для определения морозостойкости герметиков используют температурные зависимости $\text{tg}\delta$ и C_t , полученные с помощью обратного крутильного маятника.

Данным методом исследовали основные отечественные (У-30МЭС-5, УТ-32, ВЭР-1, ВИТЭФ-1, ВИТЭФ-2) и зарубежные (PR-1431, PR-1750) полисульфидные герметики, применяемые в авиационной технике. Эти герметики, изготовленные на основе полисульфидного олигомера, получаемого поликонденсацией дихлордиэтилформала с тетрасульфидными металлами [14], отличаются типом наполнителя, природой вулканизирующей системы и другими компонентами.

Типичные для этой группы материалов температурные зависимости механических динамических свойств можно рассмотреть на примере герметика У-30МЭС-5 (рис. 1).

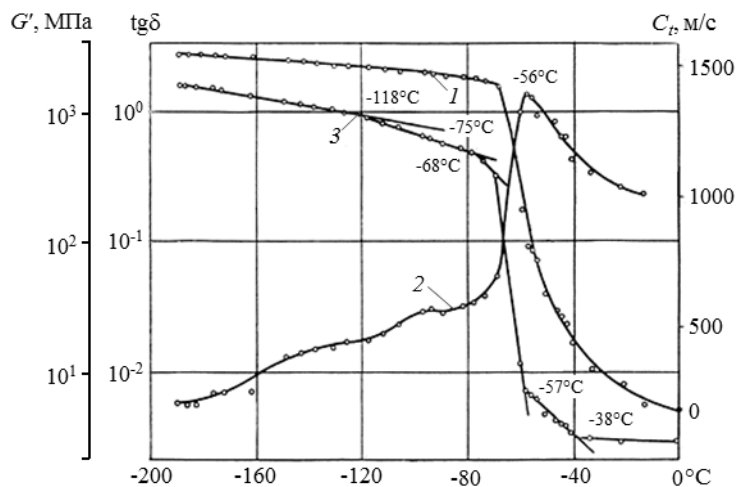


Рис. 1. Температурная зависимость динамического модуля сдвига G' (1), тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (2) и низкочастотной скорости звука C_t (3) герметика У-30МЭС-5

В интервале температур от -70 до -40°C величина модуля упругости (кривая 1) снижается более чем на два порядка. Важными характеристиками герметика являются температура стеклования (T_c) и температура начала области высокоэластичности (T_n). Вследствие структурной гетерогенности аморфного сетчатого полимера (кривая 3) проявляется мультиплетный характер α -перехода [15]: переходу T_c при температуре -68°C предшествует излом при -75°C , который обусловлен началом «размораживания» подвижности сегментов макромолекул в областях с наименьшей упорядоченностью или эффективностью межмолекулярного взаимодействия. Завершение перехода полимера в высокоэластическое состояние также проявляется в виде двух изломов на графике $C_t=f(T)$ (кривая 3). Дополнительный, высокотемпературный излом, по-видимому, устанавливает температуру, при которой приобретают подвижность элементы с наибольшей энергией межмолекулярного взаимодействия [16].

Аналогичные результаты получены и для других полисульфидных герметиков (табл. 2).

Таблица 2

**Низкотемпературные и вязкоупругие свойства и морозостойкость
полисульфидных герметиков**

Герметик	Плотность, кг/м ³	$G'_{-196^{\circ}} \cdot 10^3$	$G''_{0^{\circ}}$	T_c	T_n	$T_{\max \text{ tg}\delta}$
		МПа				
У-30МЭС-5	1390	29	6,0	-68	-38	-56
УТ-32	1789	2,6	10,0	-54	-30	-50
ВИТЭФ-1	1568	2,6	15,0	-39	-17	-33
ВИТЭФ-2	1536	1,7	7,0	-49	-29	-41
ВЭР-1	1424	2,5	10,0	-48	-39	-45
PR-1431	1598	3,0	1,0	-50	-25	-27
PR-1750	1620	2,7	1,0	-48	-30	-42

Показано, что морозостойкость полисульфидных герметиков в зависимости от конкретного состава изменяется в пределах 30°C . Наибольшей морозостойкостью обладают герметики, наполненные углеродной сажей. Герметики с другими наполнителями (за исключением УТ-32), как правило, уступают им по морозостойкости. По-видимому, различие в природе других компонентов (адгезивов, вулканизирующих систем, пластификаторов и др.) также оказывает влияние на низкотемпературные свойства герметиков [17, 18].

Следует отметить, что все испытанные зарубежные аналоги уступают большинству отечественных материалов, и особенно герметику У-30МЭС-5.

Из фторсодержащих герметиков, которые применяются для герметизации топливных кессон-баков, исследованы материалы: ВГФ-4-8, ВГФ-4-10, ВГФ-7-10, ВГФ-1 – на основе фторсилоксановых каучуков и 51Г-9 – на основе фторорганического каучука СКФ-26 (сополимера винилиденфторида и гексафторпропилена) [19].

Поведение фторсодержащих герметиков при низких температурах закономерно для аморфных полимеров, морозостойкость которых ограничена процессом стеклования (рис. 2). Так, герметик 51Г-9 [19] теряет эластические свойства при температуре ниже -20°C (табл. 3).

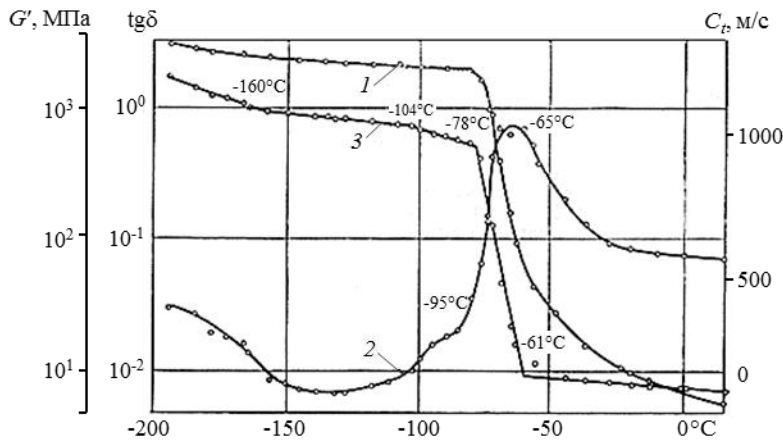


Рис. 2. Температурная зависимость динамического модуля сдвига G' (1), тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (2) и низкочастотной скорости звука C_t (3) герметика ВГФ-4-8

Таблица 3

Вязкоупругие свойства и морозостойкость фторсодержащих герметиков

Герметик	Плотность, кг/м ³	$G'_{-196^\circ} \cdot 10^3$	G'_0	T_c	T_n	$T_{\max \text{tg}\delta}$
		МПа		°C		
ВГФ-4-8	1919	3,0	7,0	-78	-61	-65
ВГФ-4-10	1950	2,5	6,0	-80	-50	-56
ВГФ-7-10	1746	2,0	1,3	-91	-62	-63
ВГФ-1	1843	2,6	7,0	-114	-95	-101
51Г-9	1879	4,0	9,0	-21	-8	-5

Герметики на основе гомометилтрифторпропилсилоксана обладают значительно более высокой морозостойкостью. Так, динамические механические характеристики герметика ВГФ-4-8 в интервале температур от +20 до -56°C (T_n) практически не изменяются (кривая 1). При дальнейшем понижении температуры происходит резкое изменение всех свойств, и при температуре около -80°C (T_c) материал утрачивает каучукоподобное состояние.

Приведенные данные показывают, что герметики на основе гомофторсилоксана в зависимости от своего состава могут сохранять эластичность до температур от -70 до -80°C. Еще более морозостойким является герметик ВГФ-1 на основе сополимера диметилсилоксана с метилтрифторпропилсилоксаном, границы работоспособности которого лежат в интервале температур от -100 до -114°C.

Известно, что морозостойкость герметиков на основе фенилсодержащих полисилоксанов определяется химическим строением полимерной основы и изменяется в широких пределах: от -25°C – для герметика УФ-8П до -120°C – для герметика УФ-7-21 [18, 19].

В данной работе исследованы три серийных герметика: УФ-8П на основе полиметилфенилсилоксана, УФ-7-21 и УФ-11-21 на основе сополимеров метилфенил- и диметилсилоксанов различного состава.

Температурные зависимости динамических механических свойств перечисленных герметиков являются типичными для аморфных полимеров. В качестве примера приведены кривые зависимостей G' , $\text{tg}\delta$ и C_t от температуры для герметика УФ-7-21 (рис. 3).

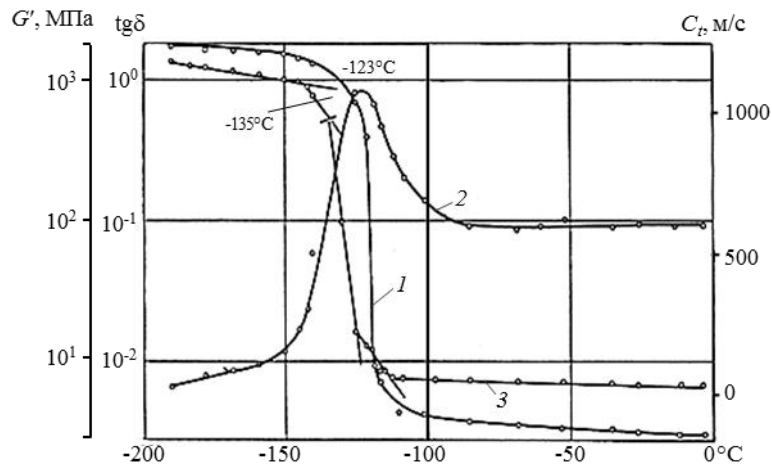


Рис. 3. Температурная зависимость динамического модуля сдвига G' (1), тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (2) и низкочастотной скорости звука C_t (3) герметика УФ-7-21

Для фенилсодержащих герметиков наблюдаются характерные точки: пик зависимости $T_{\text{tg}\delta}$, соответствующий максимальному значению эластичности герметика, и T_c , характеризующая почти полную потерю эластичности:

Герметик	$T_{\text{tg}\delta}$, °C	T_c , °C
УФ-8П	-26	-37
УФ-11-21	-61	-72
УФ-7-21	-123	-135

Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными при исследовании механических свойств герметиков при низких температурах, и ярко иллюстрируют известную зависимость морозостойкости кремнийорганических сополимеров от количества и соотношения метилфенилсилоксановых и диметилсилоксановых звеньев в составе полимера [19].

Динамические механические характеристики при низких температурах определены также для герметиков на основе полидиметилсилоксановых каучуков ВИКСИНТ У-4-21, ВИКСИНТ У-2-28 и ВИКСИНТ У-10-80, отличающихся типом и количеством наполнителей и вулканизирующей системой. Типичные температурные зависимости G' , $\text{tg}\delta$ и C_t для данного ряда герметиков на примере герметика ВИКСИНТ У-4-21 приведены на рис. 4.

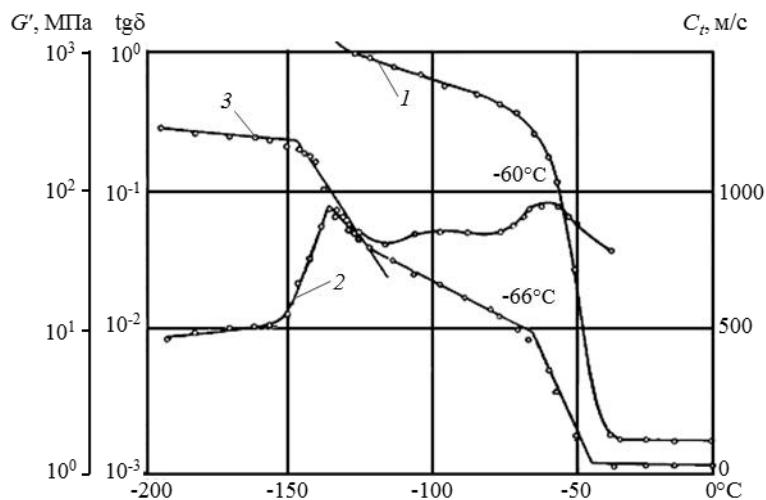


Рис. 4. Температурная зависимость динамического модуля сдвига G' (1), тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (2) и низкочастотной скорости звука C_t (3) герметика У-4-21

Отличительной особенностью рассмотренных материалов является их высокая способность к кристаллизации, определяющаяся, как известно, высокой гибкостью и регулярностью строения полидиметилсилоксанового каучука. В соответствии с этим на кривых динамических механических характеристик полидиметилсилоксановых герметиков наблюдаются две области температурных переходов: переход аморфной фазы полимера в незастеклованное состояние при температурах $-130\div-120^{\circ}\text{C}$ и плавление кристаллической фазы в области температур от -45 до -66°C . Участки кривых между этими граничными точками характеризуют процесс стеклования некристаллизующейся части системы и в зависимости от состава вулканизирующей системы могут иметь более или менее выраженный мультиплетный характер с определенными для той или иной системы точками перегиба.

Для оценки практической морозостойкости полидиметилсилоксановых герметиков наиболее показательным, по-видимому, является участок кривой зависимости $\text{tg}\delta$, характеризующийся максимумом потерь при кристаллизации полимера. В соответствии с этим морозостойкость герметиков ограничивается следующими температурными областями: для герметика ВИКСИНТ У-4-21 – от -60 до -66°C , для герметика ВИКСИНТ У-2-28 – от -62 до -66°C , а для герметика ВИКСИНТ У-10-80 – от -55 до -77°C .

При этом необходимо иметь в виду, что для материалов на основе кристаллизующихся полимеров исключительно важное значение имеет время воздействия низких температур.

Заключения

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать выводы о поведении герметиков при низких температурах.

Установлено, что интервал температур между T_n и T_c можно считать областью безусловной морозостойкости. В этих пределах механические свойства материала выше, чем при комнатных условиях, и его работоспособность даже при больших деформациях не вызывает сомнений.

Температурную область между $T_{\text{tg}\delta}$ и T_c , в пределах которой происходит резкое снижение эластичности материала, можно рассматривать как область относительной морозостойкости, когда работоспособность будет определяться характером, величиной и скоростью деформации, испытываемой герметиками в процессе эксплуатации.

Область температур ниже T_c характеризуется потерей герметиком эластичности и может считаться областью ограниченной морозостойкости.

Таким образом, показано, что величина относительного удлинения различных герметиков при температурах до -196°C сохраняется на уровне 3–6%, что не исключает возможности использования материала в жестких конструкциях.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что морозостойкость герметиков является неоднозначным понятием, поскольку работоспособность материала в конструкции зависит не только от его свойств, но и от характеристик герметичных соединений и условий их работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.

5. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
6. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
7. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
8. Зайцева Е.И., Донской А.А. Герметики на основе полисульфидных эластомеров // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. №6–7. С. 15–25.
9. Минкин В.С., Хакимуллин Ю.Н., Дебердеев Т.Р., Берлин А. А. Влияние ионов Fe (III) в составе MnO₂ на кинетику вулканизации жидких тиоколов // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №4. С. 28–30.
10. Мудров О.А., Савченко И.М., Шитов В.С. Справочник по эластомерным покрытиям и герметикам в судостроении Л.: Судостроение, 1982. С. 112.
11. Зайцева Е.И., Донской А.А. Новые полисульфидные герметики для авиационной промышленности // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №3. С. 18–23.
12. Zaitseva E.I., Donskoi A.A. Sealants Based on Polysulfide Elastomers // Polymer Science. Ser. C. 2008. Vol. 1. P. 15–25.
13. Зайцева Е.И., Чурсова Л.В. Исследование микробиологической стойкости полисульфидного герметика с новыми антисептическими добавками // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №1. С. 16–20.
14. Елисеев О.А., Брык Я.А., Смирнов Д.Н. Модификация полисульфидных герметиков ингибиторами коррозии // Авиационные материалы и технологии 2016. №S2 (44). С. 15–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-15-21.
15. Аверенко-Антанович Л.А., Кирпичников П.А., Смылова Р.А. Полисульфидные олигомеры и герметики на их основе. Л.: Химия, 1983. 128 с.
16. Зайцева Е.И., Чурсова Л.В., Смирнов Д.Н. Перспективы снижения плотности полисульфидных герметиков // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 10–14.
17. Брык Я.А., Елисеев О.А., Смирнов Д.Н. Защита от коррозии магниевых сплавов полисульфидными герметиками // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №10. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-10-10.
18. Петрова А.П., Донской А.А. Клеящие материалы, герметики: справочник. СПб.: Профессионал, 2008. С. 503–567.
19. Елисеев О.А., Краснов Л.Л., Зайцева Е.И., Савенкова А.В. Разработка и модифицирование эластомерных материалов для применения во всеклиматических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 309–314.