

УДК 678.4

А.М. Чайкун¹, М.А. Венедиктова¹, Я.А. Брык¹**РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ РЕЗИНЫ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКОЙ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ С ТЕМПЕРАТУРНЫМ ДИАПАЗОНОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТ -60 ДО +500°С**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-21-30

В ряде случаев для изделий специального назначения необходимо применение уплотнительных деталей на основе эластомеров, способных обеспечить работоспособность при высоких температурах хотя бы короткое время. Выбор для указанных целей резин обусловлен уникальными высокоэластичными свойствами эластомеров, позволяющими обеспечивать плотный контакт поверхностей при небольшом прижимном усилии. Кроме того, в этом случае значительно упрощается процесс сборки и формирования уплотнительного узла в изделиях сложной конфигурации. Применение для данных целей более термостойких металлов или фторопластов связано со значительными технологическими трудностями. Решение указанной проблемы невозможно без разработки рецептуры резины, способной обеспечивать необходимые технические характеристики в расширенном температурном диапазоне. Кроме того, особенности построения рецептуры и свойства указанной резины во многом определяют и подходы к разработке и выбору оптимальных вариантов технологии изготовления изделий из нее. Заявленные подходы позволят не только разработать резину со значительно улучшенным комплексом свойств, но и в максимальной степени сохранить их при переходе к изготовлению конкретных изделий.

Ключевые слова: резина, кремнийорганический каучук, антипирен, горючесть, уплотнительные детали.

А.М. Chaikun¹, М.А. Venediktova¹, Ya.A. Bryk¹**DEVELOPMENT OF THE COMPOUNDING OF RUBBER EXTREMELY HIGH HEAT RESISTANCE WITH TEMPERATURE RANGE OF EXPLOITATION FROM THE -60 TO +500°С**

In some cases, products of special purpose require application of sealing details on the basis of the elastomer, capable to provide working capacity at high temperatures at least short time. The choice for the specified purposes of rubbers is caused by unique highly elastic properties of the elastomer, allowing providing the hard contact of surfaces at small pressing effort. Besides, in this case process of assembly and forming of seal assembly in products of difficult configuration considerably becomes simpler. Application for these purposes of more heat-resistant metals or fluoroplastic is connected with considerable technological difficulties. The solution of the specified problem is impossible without development of compounding of rubber, ability to provide necessary technical characteristics in the expanded temperature range. Besides, features of creation of compounding and property of the specified rubber in many respects define both approaches to development and choice of optimum options of manufacturing techniques of products from it. The declared approaches will allow not only developing rubber with considerably improved complex of properties, but also in the maximum degree to keep them upon transition to manufacturing of specific products.

Keywords: rubber, organic silicon rubber, flame retardants, combustibility, sealing details.

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

В различных отраслях машиностроения требуется использование уплотнительных деталей для разделения сред с различными свойствами или параметрами. Наиболее часто для изготовления таких деталей используются резины [1–4].

Механизм герметизации данного типа уплотнительных деталей, прежде всего, связан с высокоэластичными свойствами резины, позволяющими обеспечивать плотный контакт поверхностей при небольшом прижимном усилии. Использование уникальных свойств и широкий выбор резин, а также простота формирования деталей и узлов позволили создать большой ассортимент уплотнений. Важно отметить, что эластомеры технически просто установить в зазор между частями формируемого узла, даже если они имеют неровности (шероховатость). В результате упрощается процесс сборки деталей и оптимизируется размер уплотнительного узла [5, 6].

Применение резин упрощает процесс сборки изделий и обеспечивает большую степень герметичности конструкции по сравнению с другими материалами для уплотнений. Уплотнительные детали, изготовленные из резин, работают преимущественно в условиях деформации сжатия и обеспечивают герметичность соединения как подвижных, так и стационарных частей конструкций. Самые универсальные из них – уплотнительные кольца круглого сечения, широко применяемые во многих областях техники. Они эксплуатируются на воздухе, в топливах, гидрожидкостях, минеральных и синтетических маслах при высоких и низких температурах [7].

Для создания ряда перспективных изделий, работающих в экстремальных условиях, имеется потребность в эластомерных материалах, сохраняющих свои характеристики на воздухе при 350°C – длительно, при 500°C – кратковременно.

Серийно выпускаемые резины не отвечают требованию по термостойкости. Кроме того, для обеспечения высоких огнезащитных характеристик в композицию необходимо дополнительно вводить антипирены, которые могут привести к снижению упругодеформационных характеристик резин [8–10]. В связи с этим высокую актуальность представляла разработка состава, технологии смешения и вулканизации термостойкой резины, работоспособной до 500°C – кратковременно, а также оптимальной технологии формования уплотнительных деталей из нее.

Целью данной статьи является обобщение результатов комплексных исследований рецептуры резины на основе лестничного высокомолекулярного силоксанового блок-сополимера и оптимизация технологии изготовления уплотнительных изделий на этой основе.

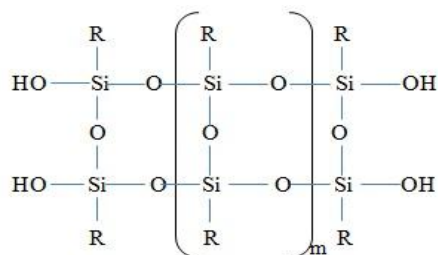
Работа проводилась в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.2. «Эластомерные и уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

Материалы и методы

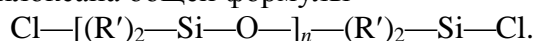
Особый интерес в качестве полимерной основы для разработки резин высокой термостойкости представляют силоксаны. Однако каучуки массового ассортимента работоспособны на воздухе до температур 250–300°C. С учетом развития современных представлений полимерной науки известно, что повышенной термостойкостью обладают так называемые сверхконструкционные полимеры. Их структура представляет собой макромолекулы в виде блок-сополимеров лестничного строения [12]. Кроме того, синтез силоксановых каучуков лестничного строения типа Лестосил приводит к некоторому повышению термостойкости.

Таким образом, по результатам проведенного анализа научных литературных данных по свойствам полимеров, предназначенных для работы в условиях экстремально высоких температур, установлено, что для их выпуска необходимо синтезировать полисилоксаны со специально формируемой лестничной структурой. Единственным эластомером, удовлетворяющим заявленным условиям эксплуатации, является отечественный каучук,

специально синтезированный во ФГУП «НИИСК» кремнийорганический лестничный высокомолекулярный блок-сополимер, который является продуктом реакции гетерофункциональной поликонденсации полифенилсилесквioxсана общей формулы



и дихлорполидиорганосилоксана общей формулы



Полифенилсилесквioxсан получается в результате гидролитической поликонденсации фенилтрихлорсилана (PhSiCl_3). Он является не полностью сконденсированным олигомером, который содержит до 5% (по массе) гидроксильных групп. Полученный кремнийорганический лестничный высокомолекулярный блок-сополимер представляет собой комбинацию главным образом двух фракций. Высокомолекулярная фракция (40%) состоит из макромолекул, в которых гибкие и жесткие блоки соединены химическими связями, и имеет широкое молекулярно-массовое распределение (ММР) – $M_n=(1,0\div 7,0)\cdot 10^{14}$. Низкомолекулярная фракция (60%) содержит олигомерные блоки полифенилсилесквioxсана с концевыми OH-группами [8, 13].

Способы смешения и последующей вулканизации эластомеров из кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера отличаются от изготовления типичных технических резин. Указанный процесс достаточно сложный, энергоемкий и продолжительный. Он включает дополнительные технологические операции.

Для исследования характеристик полученных резин использовали следующие методы.

Упруго-деформационные характеристики оценивали по ГОСТ 270–75. Определение твердости по Шору А – по ГОСТ 263–75. Горючесть резины на воздухе определяли по АП-25, Приложение F, Часть I (Авиационный стандарт пожарной безопасности материалов) и ОСТ1 90094–79 [14–19]. Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению резин (K_v) определяли по ГОСТ 13808–79. Определение относительной остаточной деформации сжатия (ОДС) образцов резин после выдержки при повышенных температурах проводили по ГОСТ 9.029–74 [20, 21].

Термогравиметрический анализ (ТГА) образцов резин проводили в соответствии с методами А и В (в инертной среде и в среде с наличием кислорода) по ГОСТ 29127–91 на синхронном термоанализаторе Netzsch STA 449F3 при скорости нагрева образца, равной 20°C/мин. Термическую стабильность материала оценивали по степени и скорости потери или увеличения массы, определяемой как функция от температуры.

Результаты и обсуждение

Проведены исследования по разработке оптимальной рецептуры резины на основе лестничного высокомолекулярного силоксанового блок-сополимера – выбраны основные классы ингредиентов (дисперсные наполнители, антиструктурирующая добавка, вулканизирующие вещества) для достижения сбалансированного сочетания оптимальных условий изготовления и переработки смеси, вулканизационных и эксплуатационных характеристик.

В процессе разработки рецептуры резиновой смеси на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера в качестве наполнителей

опробованы производные диоксида кремния (аэросил и белая сажа) и диоксид титана пигментный. Их выбор объясняется как рекомендациями производителя каучука, так и результатами их применения в составе резин на основе силоксановых каучуков для повышения упругодеформационных свойств. Типы и дозировки дисперсных наполнителей представлены в табл. 1, свойства экспериментальных образцов резин с наполнителями различных типов в табл. 2 [22, 23].

Таблица 1

Типы и дозировка наполнителей для образцов резин на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера

Наполнитель	Размер частиц наполнителя, нм	Содержание наполнителей, мас. ч., для рецептуры						
		1	2	3	4	5	6	7
Аэросил	5–20	20	30	40	–	20	–	20
Белая сажа	25–40	–	–	–	40	20	–	–
TiO ₂ пигментный	200–500	–	–	–	–	–	50	30

Таблица 2

Свойства экспериментальных образцов резин на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера

Свойства	Значения свойств для рецептуры						
	1	2	3	4	5	6	7
Условная прочность при растяжении, МПа	3,8	4,3	4,4	3,9	4,0	2,8	3,4
Относительное удлинение при разрыве, %	150	140	110	120	120	160	130
Относительное остаточное удлинение после разрыва, %	4	3	3	4	4	5	5
Твердость по Шору А, усл. ед.	62	65	68	67	68	60	63
Время остаточного горения образца, с	15	14	13	14	13	13	14
Время остаточного тления образца, с	0						
Классификация образца по ОСТ1 90094–79	Самозатухающий						

Из анализа данных табл. 1–2 следует, что наилучшими упругодеформационными свойствами обладают композиции, содержащие в качестве наполнителя аэросил. Белая сажа и диоксид титана дают меньший усиливающий эффект, чем аэросил. Это, вероятно, объясняется дисперсным составом и структурой наполнителей, что определяет характер образованных ими связей с каучуком.

В качестве вулканизирующего агента применялся дифенилгуанидин вместо органических пероксидов, традиционно используемых для основных типов силоксановых эластомеров. Выбор вулканизирующего вещества сделан в связи с наличием большого количества гидроксильных групп в основной цепи кремнийорганического блок-сополимера.

Следует отметить, что процессы смешения и вулканизации резин на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера имеют ряд принципиальных отличий от соответствующих технологий для резин на основе каучуков специального назначения, в том числе силоксановых.

Так, при проведении смешения после введения в каучук дисперсных наполнителей и антиструктурирующей добавки, необходимо проведение дополнительной термообработки. Вулканизирующий агент можно вводить только после охлаждения смеси и ее длительного выдерживания при комнатной температуре. Это позволяет сформировать оптимальную для данного типа полимера структуру вулканизационной сетки.

Помимо обычного процесса вулканизации, следует выдерживать полуфабрикат резиновой смеси в свободном состоянии при температуре >200°C в течение 2–3 сут. Таким образом, вторая стадия вулканизации (термостатирование) проводится в другом температурно-временном интервале в отличие от серийных технических резин, в том числе из высокомолекулярных силоксановых каучуков.

Наряду с комплексом испытаний по определению упругодеформационных характеристик резин на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера, проведены испытания на горючесть с целью сравнить огнестойкость разрабатываемой резины с резинами на основе силиконовых каучуков массового ассортимента.

Проведенные испытания на горючесть показали, что все исследованные образцы резин обладают пониженной горючестью. Резины на основе кремнийорганического блок-сополимера являются самозатухающими материалами по классификации АП-25. Важно указать, что это достигается без добавления в композицию модифицирующих добавок (антипиренов). Пониженная горючесть резин на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера связана, вероятнее всего, с химическим строением, конфигурацией и конформацией макромолекул. За счет указанных факторов формируется сложная разветвленная макроструктура блок-сополимера. Подобные явления выявлены при исследовании лестничных полимеров других химических классов, таких как жидкокристаллические полимеры и полиэфирэфиркетоны [12]. По-видимому, при горении эластомеров из силиконового лестничного высокомолекулярного блок-сополимера имеет место интенсивное образование коксообразующих веществ. Образование при горении кокса способствует предотвращению последующего распространения пламени.

Структуру резин изучали методом электронной микроскопии – исследован микроснимок поверхности среза образца резины на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера при увеличении $\times 1000$ (рис. 1). Видно, что структура резины однородная, компоненты распределены равномерно и отсутствуют агломераты частиц дисперсного наполнителя в эластомерной матрице.

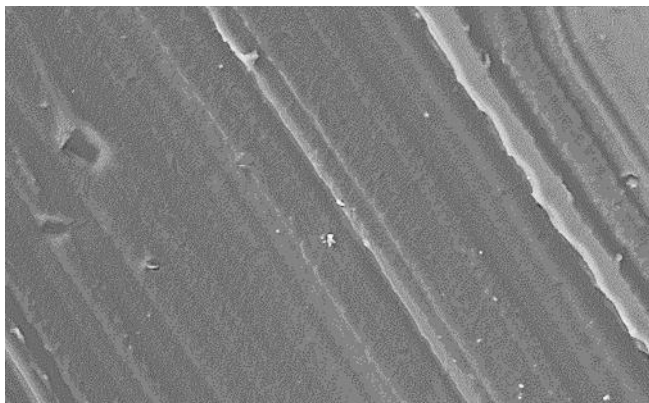


Рис.1. Микроструктура ($\times 1000$) среза резины на основе кремнийорганического блок-сополимера (полосы на срезе – следы от ножа)

В табл. 3 приведены свойства резины на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера после длительной выдержки при высоких температурах.

Из данных табл. 3 следует, что резина не теряет свои упругодеформационные характеристики после длительной выдержки при высоких температурах: в течение 2 недель (336 ч) при температуре 300°C ; в течение 3 сут (72 ч) при температуре 350°C . Полученные результаты подтверждают ее работоспособность в указанных условиях. Рост прочностных показателей при одновременном снижении относительного удлинения, вероятно, связан с проходящими в процессе термического старения процессами структурирования эластомера. При этом тепловое старение сопровождается ростом показателя твердости резины.

Результаты испытаний образцов резины (рецептура 3) на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера после ускоренного теплового старения

Условия ускоренного теплового старения на воздухе		Условная прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Шору А, усл. ед.
температура, °С	продолжительность, ч			
300	168	5,6	160	60
	336	5,0	90	71
350	24	5,8	110	64
	48	5,0	60	82
	72	4,6	30	93

На рис. 2 показаны результаты ТГА резины на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера при нагревании в среде воздуха и аргона. Тип газа выбирали с целью моделирования условий окисления с учетом возможного характера работы деталей из резины на основе кремнийорганического блок-сополимера.

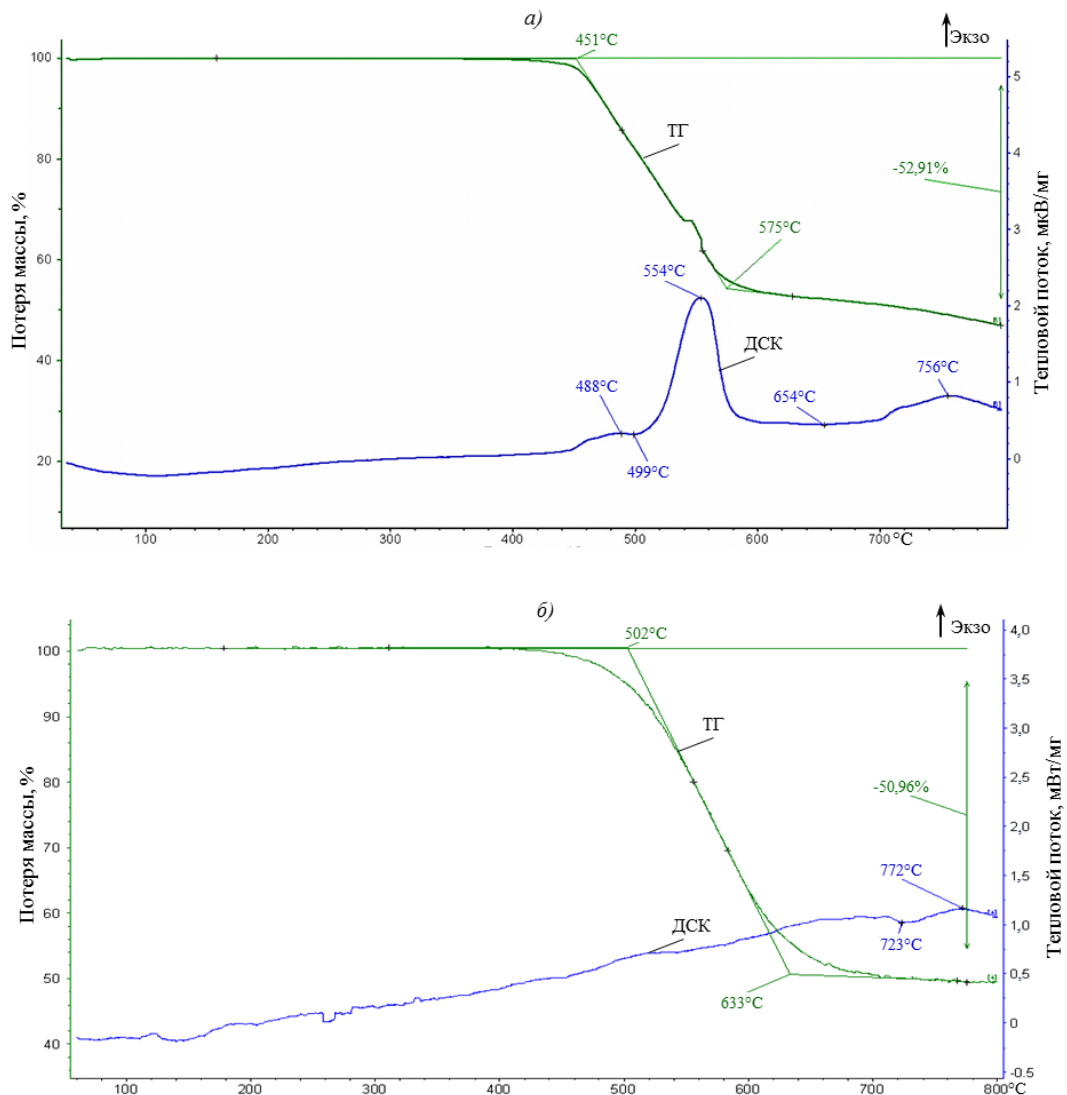


Рис. 2. ТГ-кривая резины в среде воздуха (а) и инертного газа аргона (б)

Из анализа ТГ-кривых резины на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера видно, что:

– при нагревании как на воздухе, так и в инертной среде начало разложения резин имеет место при температурах $>400^{\circ}\text{C}$ ($400\text{--}420^{\circ}\text{C}$);

– в среде аргона процесс деструкции образца резины протекает плавно; благодаря этому экстраполированное начало падения кривой в среде аргона имеет более высокие значения температуры – порядка 500°C . Это можно объяснить отсутствием окисления резины в инертной среде.

По результатам проведенных комплексных исследований резине на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера оптимальной рецептуры присвоена марка ВР-38М. Дополнительно проведено сопоставление свойств резины ВР-38М с отечественными и зарубежными аналогами. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Квоты превосходства резины марки ВР-38М

Свойства	Значения свойств для резины			Квоты превосходства, %, перед резиной	
	ВР-38М	5ф-13 (Россия)	SE (США)	5ф-13	SE
Условная прочность при растяжении, МПа	4,3	3,5	5,0	23	–
Относительное удлинение при разрыве, %	140	100	70	40	100
Коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия при -50°C	0,41	0,20	0,20	105	105
Остаточная деформация после 20%-ного сжатия после выдержки при 250°C в течение 24 ч, %	62	45	50	–	–
Группа горючести	2	3	–	На 1	–
Грибостойкость, балл (по шестибальной шкале)	1	4	–	На 3	–

Из данных табл. 4 видно, что резина ВР-38М не уступает аналогам, обладает улучшенным комплексом свойств, прежде всего морозостойкостью и теплостойкостью.

На основании проведенных исследований структуры и свойств резины ВР-38М и для изыскания путей ее использования в конкретных изделиях проведен анализ типов уплотнителей с целью определения областей применения резины ВР-38М с учетом выявленных уникальных технических характеристик, а также разработанной и усовершенствованной технологии изготовления. Поэтому представляется целесообразным использовать резину ВР-38М для изготовления уплотнительных деталей простой конфигурации, таких как кольца (ГОСТ 9833–73), прокладки, манжеты уплотнительные (ГОСТ 14896–84; ГОСТ 24811–81). Разработана технология уплотнительных изделий простой конфигурации из резины ВР-38М с учетом исследованных особенностей ее структуры и свойств. Установлено, что для обеспечения необходимого качества поверхности изделий их выгрузку из пресс-формы после первой стадии вулканизации необходимо производить после охлаждения формы под давлением в вулканизационном прессе. В зависимости от структуры поверхности формуемой уплотнительной детали температура выгрузки находится в интервале $30\text{--}70^{\circ}\text{C}$.

Для подтверждения работоспособности деталей из резины ВР-38М проведены сравнительные испытания резин на основе каучуков различного химического строения. Образцы резин в виде пластин помещали между двумя металлическими плитами, что соответствовало типичному уплотнительному узлу. Указанную конструкцию выдерживали в муфельной печи при различных температурах. Затем образцы выгружали из печи и производили разборку конструкции. Работоспособность резины оценивали по наличию видимых деструктивных изменений или по наличию горения после контакта с кислородом воздуха. Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица 5

Температурные пределы работоспособности резин на основе каучуков различных типов после термического воздействия

Резина	Химическая природа полимерной матрицы	Предельная температура работоспособности после термического воздействия, °С
ИРП-1078	Бутадиен-нитрильный каучук	170
ИРП-1287	Фторкаучук	275
ИРП-1338	Силоксановый каучук	290
ВР-38М	Сополимер полифенилсилсесквиоксана	500

В результате проведенных экспериментов выявлено, что резина ВР-38М сохраняет свою целостность при нагреве и последующей выдержке при 500°С в течение 2 мин. Из данных табл. 5 видно, что резина ВР-38М превосходит по термостойкости все основные технические резины на основе каучуков специального назначения различного химического строения.

Заключения

Установлено, что в качестве полимерной основы высокотемпературной резины ВР-38М следует применять высокомолекулярный кремнийорганический блок-сополимер лестничного строения. Высокомолекулярное соединение указанной молекулярной структуры впервые синтезировано в РФ во ФГУП «НИИСК».

Высокотемпературная резина ВР-38М наряду с улучшенным комплексом упругодеформационных характеристик дополнительно является самозатухающей. При этом результат достигается без добавления в композицию специальных модификаторов (антипиренов). Это объясняется лестничной структурой полимерной матрицы и активным образованием кокса при воздействии высоких температур. При этом продукты горения в виде кокса предотвращают последующее распространение пламени в объеме эластомера.

Выявлены основные принципы создания оптимального состава резины на основе высокомолекулярного кремнийорганического блок-сополимера лестничного строения. В состав резины данного типа входят каучук, дисперсные наполнители, антиструктурирующая добавка, вулканизирующее вещество. Каучук обеспечивает термостойкость, а оптимальное сочетание выбранных ингредиентов и технологии переработки смеси – необходимую структуру формируемой вулканизационной сетки.

Проведены комплексные исследования, доказавшие возможность эксплуатации резины ВР-38М на основе кремнийорганического лестничного высокомолекулярного блок-сополимера при высоких температурах. Эксперименты подтвердили возможность эксплуатации деталей из резины при температурах 350°С – длительно и при 500°С – кратковременно.

Проведен анализ различных типов уплотнительных деталей и выбраны возможные варианты использования резины ВР-38М в уплотнительной технике. Разработана технология формования уплотнительных изделий простой конфигурации из резины ВР-38М с учетом выявленных и описанных характеристик ее структуры и свойств.

Подтверждена возможность применения деталей из резины ВР-38М при одновременном воздействии воздуха и нагрева до температуры 500°C с последующей выдержкой в течение 2 мин, что выражается в сохранении целостности структуры модельных образцов резины после проведенных испытаний в указанных условиях.

Выработанные подходы к разработке рецептуры резины экстремальной теплоустойчивости на основе высокомолекулярного кремнийорганического блок-сополимера лестничного строения и технологии формования изделий из нее позволят в максимальной степени реализовать ценные технические характеристики резины ВР-38М и в будущем расширить ассортимент изделий из технических резин на основе каучуков специального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С.7–27.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
5. Федюкин Д.Л., Махлис Ф.А. Технические и технологические свойства резин. М.: Химия, 1985. 240 с.
6. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
7. Наумов И.С., Петрова А.П., Чайкун А.М. Резины уплотнительного назначения и снижение их горючести // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №5. С. 28–35.
8. Наумов И.С. Уплотнительные резины пониженной горючести: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 118 с.
9. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Венедиктова М.А., Наумов И.С. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-51-55.
10. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 269 с.
11. 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.
12. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2016. 820 с.
13. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктова М.А. Особенности морозостойких резин на основе различных каучуков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №12. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2018).
14. Горение, деструкция и стабилизация полимеров / под ред. Г.Е. Заикова. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 422 с.
15. Clough R.L. Aging Effects on Fire-Retardant Additives in Polymers // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition. 1983. Vol. 21. P. 767–780.
16. Горючесть и дымообразующая способность полимерных материалов авиационного назначения / под ред. Р.Е. Шалина, Б.И. Паншина. М.: ВИАМ, 1986. 104 с.

17. Барботько С.Л., Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Скрылёв Н.С. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов для внешнего контура авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 56–59.
18. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. 3-е изд. М.: Авиаиздат, 2009. 274 с.
19. ГОСТ Р 57924–2017. Композиты полимерные. Метод определения горючести полимерных материалов для авиационной техники. М.: Стандартинформ, 2017. 19 с.
20. Наумов И.С., Чайкун А.М., Елисеев О.А. Российские и международные стандарты на методы испытаний резин, сырых резиновых смесей и высокомолекулярных каучуков // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2014. №11. С. 4–13.
21. *Технология резины: рецептуростроение и испытания*. Пер. с англ. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 632 с.
22. Нурмухаметова А.Н., Зенитова Л.А. Способы получения нанодисперсных наполнителей // Тез. докл. XII Междунар. конф. молодых ученых, студентов и аспирантов «Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений – IV Кирпичниковские чтения». Казань, 2008. С. 120.
23. *Большой справочник резинщика в 2 ч*. М.: Техинформ, 2012. 1385 с.