
Научная статья

УДК 691.537

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-3-19

ПРОМЫШЛЕННЫЕ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ СМОЛЫ (обзор). Часть 1

Р.О. Шитов¹, А.В. Бутузов¹

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

Аннотация. Проведен анализ научно-технических литературных и патентных источников, рекламных буклетов отечественных и зарубежных компаний по свойствам и методам получения промышленных кремнийорганических смол. Обозначены основные типы классификации промышленных кремнийорганических смол и описаны структурные факторы: тип органических радикалов (R), соотношение R/Si и содержание SiO_x , соотношение Ph/Me и молекулярная масса. Приведены краткий обзор и анализ рынка промышленных кремнийорганических смол и области применения изделий на их основе. Описаны практически значимые методы получения MQ -смол, а также современные представления об их структуре и свойствах.

Ключевые слова: кремнийорганические смолы, органосилоксаны, MQ -смолы, кремнийорганические связующие, термостойкие силоксаны

Для цитирования: Шитов Р.О., Бутузов А.В. Промышленные кремнийорганические смолы (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-3-19.

Scientific article

COMMERCIAL SILICONE RESIN (review). Part 1

R.O. Shitov¹, A.V. Butuzov¹

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

Abstract. The analysis of literary and patent sources, advertising booklets of domestic and foreign companies on the properties and methods of production of commercial silicone resins has been carried out. The main types of classification of commercial silicone resins are outlined and structural factors are described: the type of organic radicals (R), R/S ratio, SiO_x content, Ph/Me ratio and molecular weight. A brief overview is given in the field of market analysis of commercial silicone resins and the scope of products based on them. Practically significant methods of MQ -resins production are described, the latest insights into their structure and properties are shown.

Keywords: silicone resins, organosiloxanes, MQ -resins, silicone binders, heat-resistant siloxanes

For citation: Shitov R.O., Butuzov A.V. Commercial silicone resin (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-3-19.

Введение

В настоящее время развитие полимерных материалов и различных технических изделий на их основе является одним из основных показателей научно-технического прогресса. Особенно очевидно, что такое состояние дел наблюдается в области авиакосмической техники, где полимерные композиционные материалы (ПКМ) с особым

комплексом эксплуатационных свойств весьма востребованы ввиду экстремальных условий их эксплуатации [1–5].

Кремнийорганические смолы находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности (автомобильной, аэрокосмической, военно-морской) и других отраслях производства [6–8]. Они обладают превосходными тепло- и огнестойкими свойствами, которые необходимы для изделий, подвергающихся различным видам теплового воздействия. Хорошо известно, что превосходная термическая стабильность кремнийорганических смол обуславливается более высокой энергией связи Si–O (460,5 кДж/моль) по сравнению со связями C–O (358,0 кДж/моль) и C–C (304,0 кДж/моль) [9]. Перечисленные свойства делают кремнийорганические смолы привлекательными для использования в армированных волокнами композитах для печатных плат, а также в компонентах конструкций для автомобилей, самолетов и морских судов [8]. Кроме того, кремнийорганические смолы имеют низкие диэлектрические постоянные, поэтому могут использоваться в качестве межслойных диэлектрических материалов. Жесткие кремнийорганические смолы также полезны в качестве абразивостойких покрытий [8–10].

В мировом научном сообществе считается, что первооткрывателем кремнийорганических смол является Ю.Г. Рохов [11, 12], однако следует отметить неоценимый вклад выдающихся советских ученых К.А. Андрианова и Н.С. Лезнова в развитие научно-технической базы в области получения кремнийорганических смол [13–17]. В ВИАМ в 1955–1957 гг. Н.С. Лезновым с сотрудниками разработан оригинальный, не имевший аналогов в мире способ получения полиорганилсилоксанов не прямым гидролизом органилхлорсиланов с последующей поликонденсацией, а путем алкоголиза органилацетоксисиланов в безводной среде, внедрение которого позволило получать разнообразные олигоорганилсилоксаны [17]. На основе данного метода в промышленности в большом объеме выпускались метил-, метилфенил- и фенилсилоксановые смолы и олигомеры – смолы марок 182-82, К-9, К-10, К-101, К-2105, К-9-0, К-101-0, лаки марок КО-039, КО-554 и др. [18].

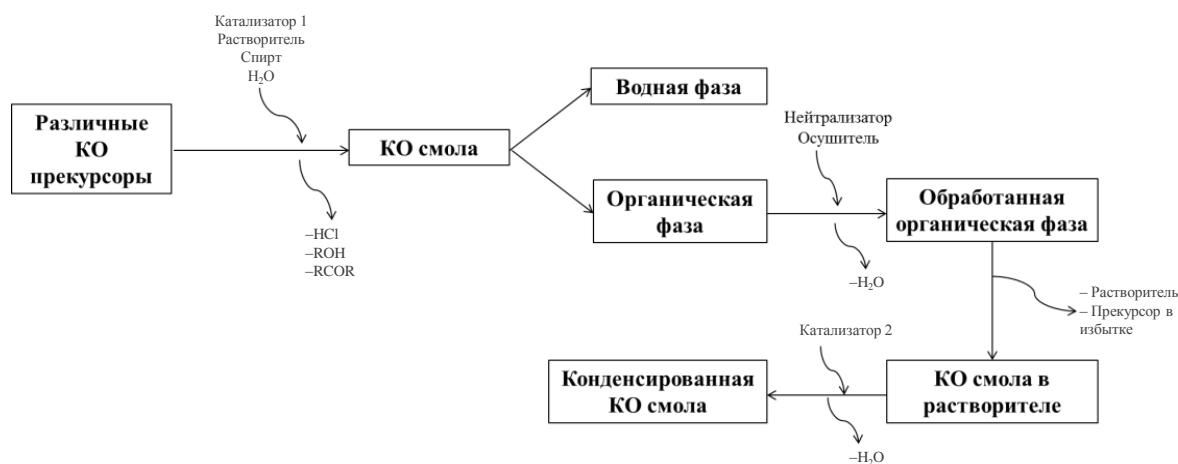


Рис. 1. Схематическое изображение различных методов синтеза кремнийорганических (КО) смол

Начиная с 1940-х гг., во многих патентах и научно-технических статьях были описаны методы получения кремнийорганических смол [19]. Общий метод синтеза изложен и обобщен на рис. 1. Все прекурсоры, содержащие различные функциональные звенья, смешивают в реакторе с нерастворимым в воде растворителем, катализатором, водой и спиртом. После остановки реакции конденсации органическую фазу, содержащую

кремнийорганическую смолу, отделяют от водной фазы, нейтрализуют и сушат. Растворитель в органической фазе может быть выпарен полностью или частично, если необходимо сохранить смолу в растворе. Последним опциональным этапом является конденсация остаточных гидроксильных групп в смоле путем нагревания с катализатором. Этот этап целесообразен, если необходимо получить кремнийорганические смолы, сохраняющие стабильную структуру в течение длительного времени [19].

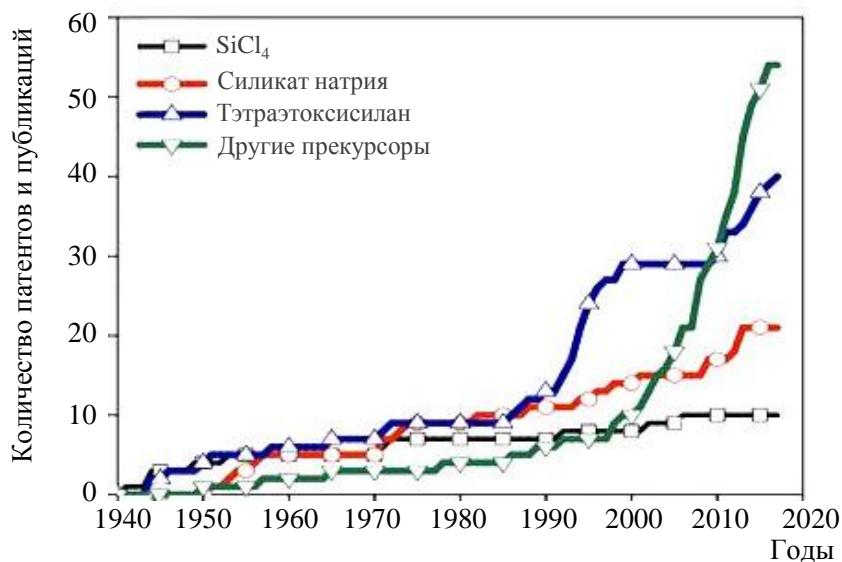


Рис. 2. Динамика количества патентов и статей в области синтеза кремнийорганических смол на основе различных прекурсоров

В последние десятилетия наблюдается большой рост количества патентов в области получения кремнийорганических смол на основе различных используемых прекурсоров (рис. 2) [19].

Рынок кремнийорганических смол является консолидированным с большим количеством глобальных игроков и небольшим количеством региональных и местных игроков. Список основных представителей возглавляют такие компании, как Dow Corning Corp., Shin-Etsu, Wacker, Momentive Performance Products (панее General Electric Silicones), Elkem Silicones (панее Bluestar Silicones/Rhodia Silicones), Kaneka, Gelest. Ожидается, что объем мирового рынка кремнийорганических смол вырастет с 4,8 млрд долл. в 2021 г. до 6,3 млрд долл. к 2026 г. при темпе роста 5,5 % в течение прогнозного периода [20].

В первой части данного обзора обозначены основные типы классификации промышленных кремнийорганических смол и описаны их структурные факторы: тип органических радикалов (R), соотношение R/Si и содержание SiO_x, соотношение Ph/Me (где Ph и Me – фенильные и метильные радикалы) и молекулярная масса. Приведен краткий анализ рынка промышленных кремнийорганических смол и области применения изделий на их основе. Описаны практически значимые методы получения MQ-смол, а также современные представления об их структуре и свойствах.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Строение кремнийорганических смол

Термин «кремнийорганические смолы» относится к классу нелинейных олигоорганосилоксанов, в основном содержащих силсесквиоксаны и сополимеры на их основе. Кремнийорганические смолы (рис. 3) являются плавкими и по большей части растворимыми олигоорганосилоксанами разветвленной (соединения 1 и 2), лестничной (соединение 3), полиэдрической полностью (соединения 4 и 5) и не полностью (соединение 6) структуры [21].

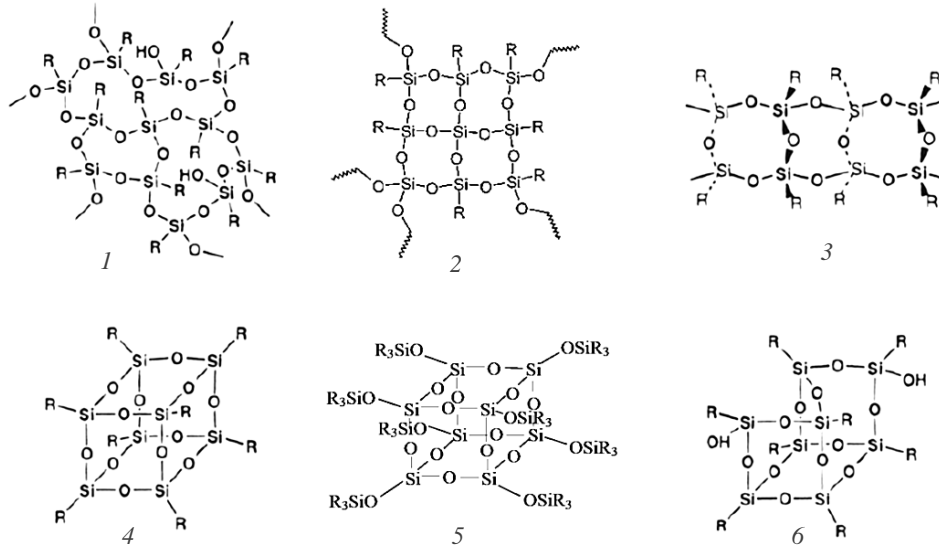


Рис. 3. Структуры олигоорганосилоксанов

Кремнийорганические смолы также представляют собой трехмерные, сильно разветвленные кремнийорганические макромолекулы, состоящие из различных первичных звеньев, называемых M, D, T и Q (рис. 4).

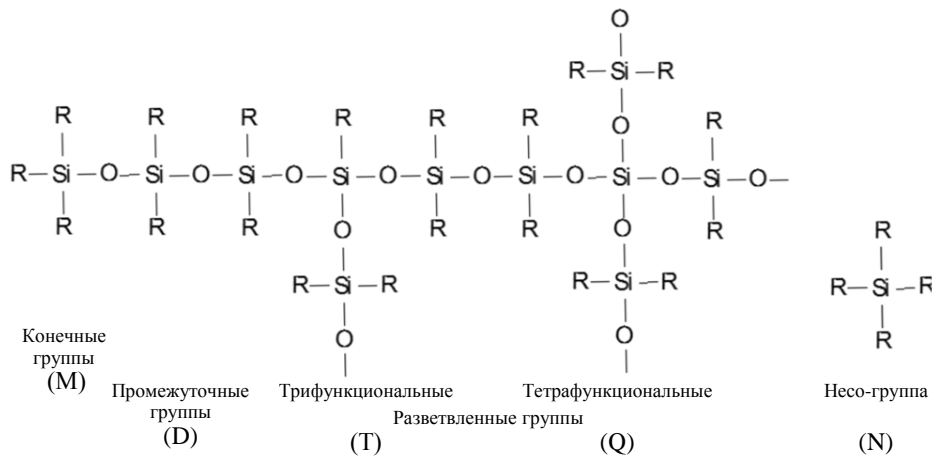


Рис. 4. Основные обозначения олигоорганосилоксанов, включающие названия функциональных звеньев

Данные обозначения впервые приняты в компании General Electric [22] и описывают атом кремния в соответствии с числом связанных с ним атомов кислорода: M обозначает монофункциональную единицу ($R_3SiO_{1/2}$), D – бифункциональную единицу (R_2SiO), T – трифункциональную единицу ($RSiO_{3/2}$) и Q – тетрафункциональную единицу (SiO_2).

Структурными факторами, влияющими на свойства промышленных кремнийорганических смол, являются: тип органических радикалов (R), соотношение R/Si, соотношение Ph/Me и молекулярная масса.

Типы органических радикалов

В основном в качестве органических заместителей в кремнийорганических смолах используются метил и фенил, поскольку их термическая стабильность превышает аналогичную характеристику у других органических соединений, перечисленных в табл. 1 [21]. Фенильные кремнийорганические смолы часто используются для термостойких покрытий благодаря их термической стабильности и гибкости после теплового старения. Метильные кремнийорганические смолы используют для гидрофобных и огнезащитных покрытий [21].

Таблица 1

Аппроксимированная оценка периода полураспада органилсилоксанов при температуре 250 °С на воздухе

Органическая группа, связанная с Si	Периоды полураспада, отн. ед.
Фенил	>100000
Метил	>10000
Этил	6
Пропил	2
Бутил	<2
Пентил	4
Нонил	8
Децил	12
Додецил	8
Циклогексил	40
Винил	101

Соотношение R/Si и содержание SiO_x

Соотношение R/Si – это соотношение всех органических групп по отношению ко всем атомам кремния. Смола, состоящая только из Т-звеньев, имеет соотношение R/Si, равное 1,0, а смола, состоящая только из D-звеньев, имеет значение 2,0. Таким образом, сополимер, содержащий как Т-, так и D-звенья, имеет соотношение R/Si между 1,0 и 2,0. С уменьшением значения соотношения R/Si возрастает число связей Si–O и тем более «сшитой» становится смола. Как правило, промышленные кремнийорганические смолы имеют отношение R/Si от 1,0 до 1,7 [21]. Полимер, имеющий такое отношение более чем 1,7, проявляет более линейную природу полимера. Основные области применения смол с различными соотношениями R/Si перечислены в табл. 2.

Таблица 2

Области применения органилсилоксанов в зависимости от содержания органических радикалов

Соотношение R/Si	Основные применения
1,0–1,2	Листовые стеклотекстолиты, листовые и гибкие стекломиканиты, твердые покрытия
1,3–1,6	Теплостойкие покрытия, лаки для электрической изоляции
1,5–1,7	Текстильные покрытия

Содержание соединения SiO_x в смоле используется для описания структуры кремнийорганических смол и показывает, сколько неорганической части смолы в % (по массе)

содержится после преобразования всего силоксанового остатка в соединении SiO_2 . С помощью содержания SiO_x в смоле можно показать разницу в размере органической группы, в то время как по соотношению R/Si этого показать не удастся. Например, содержание соединения SiO_x в фенилсилесквиоксане 46,5 % (по массе) ($MM_{\text{SiO}_2} = 60$ и $MM_{\text{PhSiO}_{3/2}} = 129$, т. е. $(60/129) \cdot 100\%$, где MM – молекулярная масса), в метилсилесквиоксане 89,6 % ($MM_{\text{MeSiO}_{3/2}} = 67$, т. е. $(60/67) \cdot 100\%$), в то время как соотношение R/Si составляет 1,0 для обеих смол.

Соотношение фенильных и метильных радикалов (Ph/Me)

Одними из наиболее распространенных кремнийорганических смол являются смолы, содержащие в своей структуре как фенильные, так и метильные заместители у атома кремния. На их конечные свойства влияет соотношение фенильных и метильных групп и, как можно видеть в табл. 3, приводит к проявлению характеристик, свойственных метильным и фенильным кремнийорганическим смолам.

Таблица 3

Характеристики фенильных и метильных кремнийорганических смол

Метильные смолы	Фенильные смолы
Гидрофобность	Термическая стойкость
Маленькая потеря массы при пиролизе	Окислительная стойкость
Эластичность при низкой температуре	Пластичность при высоких температурах
Химическая стойкость	Не липнет при комнатной температуре
Дугостойкость	Совместимость с органическими полимерами

Традиционно соотношение R/Si, масса смолы по отношению к соединению SiO_x , содержания фенильных и метильных групп (Ph/Me) являются основными параметрами, описывающими свойства кремнийорганических смол [21]. Так, в работах [21, 23] получены четыре различных смолы ($\text{T}^{\text{Me}}\text{-T}^{\text{Ph}}\text{-D}^{\text{Me}2}\text{-D}^{\text{Ph}2}$), имеющих одинаковые значения перечисленных ранее параметров. Варьируя соотношениями $\text{T}^{\text{Me}}/\text{T}^{\text{Ph}}$ и $\text{D}^{\text{Me}2}/\text{D}^{\text{Ph}2}$, показано, что полученные смолы имеют очень схожие свойства.

Молекулярная масса

Молекулярная масса промышленных кремнийорганических смол варьируется от 1000 до более чем 100000 [21, 23]. Из-за трехмерной природы молекул индексы полидисперсности смол, рассчитанные по соотношению M_w/M_n , обычно очень велики. Гель-проникающую хроматографию удобно использовать для определения молекулярной массы смол, но значения M_n и M_w относительно стандартного полистирола значительно отличаются от фактического. Поэтому измерение осмотического давления и метод лазерного светорассеяния рекомендуются для определения точной молекулярной массы для кремнийорганических смол [24].

Низкомолекулярные смолы более совместимы с высокомолекулярными кремнийорганическими смолами, чем с высокомолекулярными кремнийорганическими смолами при одинаковых соотношениях R/Si и метил/фенил. Низкомолекулярные смолы более совместимы с органическими полимерами, в то время как высокомолекулярные смолы превосходят их по термической стойкости и атмосферостойкости.

Классификация кремнийорганических смол

Как показано на рис. 5 промышленные кремнийорганические смолы можно классифицировать с точки зрения структурных звеньев [21].



Рис. 5. Классификация промышленных кремнийорганических смол

Органические полимеры, модифицированные кремнийорганическими смолами, – это сополимеры кремнийорганических и органических полимеров, которые получают с использованием интермедиатов (промежуточных продуктов) смол. Интермедиаты кремнийорганических смол представляют собой относительно низкомолекулярные кремнийорганические олигомеры, содержащие реакционноспособные по отношению к органическому полимеру функциональные группы. Молекулярная масса интермедиатов кремнийорганических смол обычно составляет от 600 до 5000, но также известны смеси олигомеров с большей или меньшей молекулярной массой [25].

Органические полимеры (такие как алкидные, эпоксидные, полиэфирные, акрилатные, фенольные смолы и т. д.), которые модифицируют кремнийорганическими смолами, применяются в соответствии с их свойствами. Интермедиаты кремнийорганических смол и органические полимеры, модифицированные кремнийорганическими смолами, в данном обзоре не рассматриваются.

Промышленные кремнийорганические смолы можно условно разделить на два основных типа: MQ и DT. Смолы на основе комбинации кремнийорганических звеньев (MDT, MTQ, QDT, MQD, DQ) также используются в промышленности. Объемы производства смол MQ и MQD меньше, чем смол DT [25].

Смолы на основе моно- и тетрафункциональных звеньев (MQ-смолы)

Под термином MQ-смолы (MQ-сополимеры) часто подразумевают кремнийорганические соединения, состоящие из моно- (M) и тетра- (Q) функциональных звеньев. Монофункциональные смолы хорошо изученный класс кремнийорганических соединений, используемый в промышленности уже более 50 лет. Простота синтеза MQ-смол сразу привела к широкому распространению их в качестве модифицирующих добавок в различных полимерных композициях [26].

Большой интерес к MQ-смолам за рубежом заметен по многочисленным научным публикациям и количеству выдаваемых патентов по годам. До 1970 г. было выдано два десятка патентов, с 1970 по 1990 г. – 75, с 1990 по 2010 г. – около 150 (патентная база США) [27].

Основополагающими работами в области MQ-смол являются патенты компаний Dow Corning Glass (1944 г.) [28] и Dow Corning Corp. (1954 г.) [27, 29]. В СССР в 1980-х гг. в обзорах [30–32] были подробно описаны методы получения, свойства и области применения MQ-смол, которые в этих обзорах называли смолообразными сополимерами

(resinous copolymers) или сополимерными силоксанами, содержащими SiO₂-фрагменты (copolymeric siloxanes containing SiO₂). Термин MQ-смолы стали использовать в научно-технической литературе с начала 1970-х гг. [31].

Большая часть производимых в промышленности MQ-смол имеет молекулярную массу от 1000 до 10000 и более. Структура MQ-смол чаще всего описывается такими параметрами, как молекулярная масса, соотношение M/Q-звеньев в составе молекулы смолы, массовая доля OH-групп, наличие в составе функциональных групп винильной (Vin), гидридной (H), фенильной (Ph) и др. [33].

Идеальная структура MQ-смол при соотношении M/Q = 1:1 соответствует смоле M₈Q₈, которая имеет форму куба с M-звеньями на концах граней куба (рис. 6) [30]. Смола M₁₆Q₃₂ имеет соотношение звеньев M/Q = 1:2. При этом реальная структура этих смол соответствует более сложным дефектным структурам, содержащим большое количество (обычно ~2 % от массы смолы) гидроксильных групп, которые расположены на не полностью сконденсированных фрагментах диоксида кремния (Q) [34, 35].

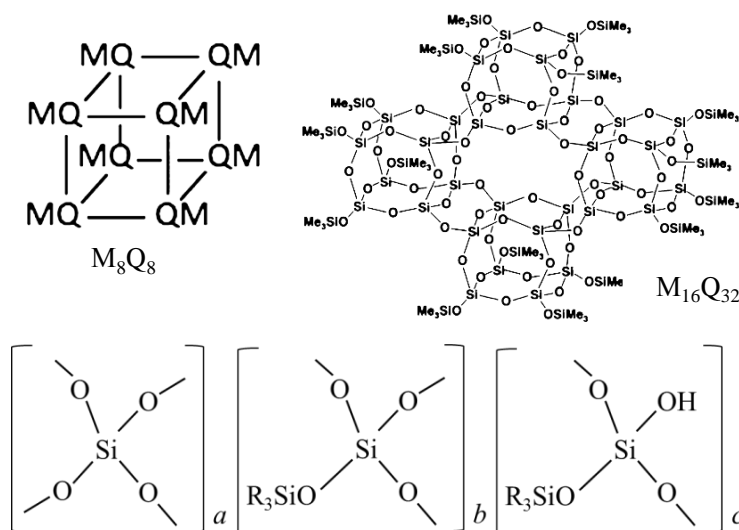


Рис. 6. Кубическая форма для смолы M₈Q₈, полиэдрическая – для смолы M₁₆Q₃₂ и реальная дефектная структура MQ-смол

Особенными свойствами MQ-смол являются практически полное отсутствие нерастворимых сшитых структур после продолжительной высокотемпературной конденсации, хорошая растворимость в органических растворителях (толуоле, спирте, бензине, ацетоне) и совместимость с полидиметилсилоксаном, при этом средняя функциональность MQ-смол часто превышает 2,5 [26]. Перечисленные свойства MQ-смол позволяют использовать их в композициях с полидиметилсилоксаном в качестве армирующих добавок и наполнителей [36, 37], катализаторов отверждения и сшивающих агентов [38], добавок для производства чувствительных к давлению клеев [39], прочных покрытий, компонентов герметиков и заливочных компаундов, а также связующих компонентов для производства нового поколения композиционных материалов различного назначения [40–42].

В настоящее время основными способами получения MQ-смол являются:

- гидролитическая поликонденсация;
- поликонденсация в активной среде;
- гетерофункциональная поликонденсация;
- триметилсилилирование кремневых кислот и силикатов.

Получение MQ-смол методом гидролитической поликонденсации

Наиболее распространенным методом получения MQ-смол является гидролитическая поликонденсация моно- и тетрафункциональных силанов. Основная проблема при гидролитической поликонденсации смеси тетра- и монофункциональных хлор- [43] или алкоксисиланов [44] заключается в различии скоростей их гидролиза, которая больше для тетрафункционального мономера, и образовании продуктов гомоконденсации Si(OH)₄ – нерастворимых соединений, соответствующих силикатным гелям SiO₂. Использование в качестве исходных мономеров для получения MQ-смол алкоксисиланов вместо хлорсиланов (часто в присутствии HCl в качестве катализатора) позволяет избежать гелеобразования при гидролитической поликонденсации [45], а также варьировать структуру и свойства MQ-смол путем введения в процесс различных исходных соединений. Так, в качестве Q-единицы можно использовать соединение Si(OR)₄, а в качестве M-единицы – различные триорганосиланы: R¹₃SiHal, R¹₃Si(OR), R¹₃Si(OCOR), R¹₃SiOR. При этом следует отметить, что органические радикалы (R¹) могут иметь в своем составе скрытые функциональные группы – например, такие как виниловые или гидридные [45–48].

В настоящее время наиболее широко используемым методом получения MQ-смол является соконденсация Si(OC₂H₅)₄ или продукта его частичного гидролиза и гексаорганодисилоксана в присутствии HCl и спирта при температуре от 0 до 90 °C [34, 40, 49, 50] (рис. 7).

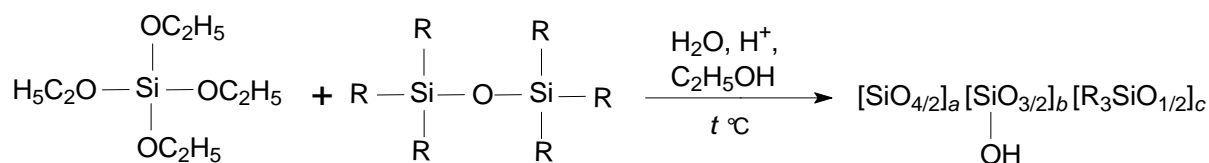


Рис. 7. Способ получения MQ-смол методом гидролитической поликонденсации

Простота регулирования соотношения органических и неорганических единиц структуры, приводящая к получению продуктов с такими разными свойствами, является большим преимуществом процесса гидролитической поликонденсации [51].

Получение MQ-смол методом поликонденсации в активной среде

Еще один метод получения MQ-смол, широко исследованный и доказавший свою эффективность, – поликонденсация алкоксисиланов типа M и Q в так называемой «активной среде», представляющей собой безводную уксусную кислоту, которая используется одновременно в качестве реагента, катализатора и растворителя (рис. 8) [52]. Необходимо отметить, что процесс ацидолиза в неводных средах по современным представлениям является «скрытым гидролизом», так как вода выделяется в процессе реакции [53].

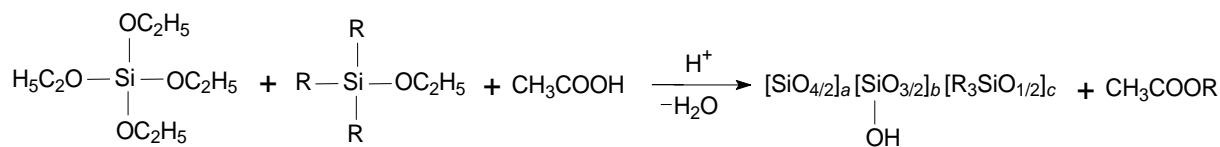


Рис. 8. Способ получения MQ-смол поликонденсацией в активной среде

Метод позволяет получать MQ-смолы с различным соотношением M- и Q-звеньев: от низковязких (M/Q > 2) до высоковязких (M/Q = 1–1,2) жидкостей и твердых

и сушки смолу экстрагировали хлороформом. Растворимую фракцию смолы расплавили при температуре от 140 до 160 °С и она имела соотношение $M/Q = 1,48$, а нерастворимая фракция оставалась и имела соотношение $M/Q = 1,13$.

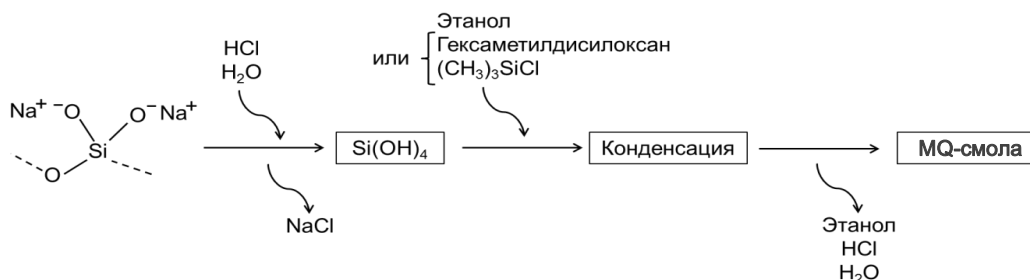


Рис. 11. Способ получения MQ-смол на основе триметилсилилирования силиката натрия

В работах [61, 63, 64] также использовали прекурсоры силиката натрия для получения MQ-смол. Представленные методы похожи на методы Даудта, за исключением того, что в них использован изопропанол вместо этанола и в смесь добавлены гексаметилдисилоксан и триметилхлорсилан. В результате получен раствор MQ-смол с содержанием твердого вещества 75–77 % (по массе) в ксилоле и соотношением $M/Q = 0,8$. Основной проблемой при триметилсилилировании силиката натрия является ограниченная стабильность поликремневых кислот, образующихся на стадии нейтрализации раствора силиката натрия. На оптимизацию этой стадии процесса направлены многочисленные усилия разработчиков [65].

Реакционноспособные MQ-смолы могут быть получены модифицированием процесса изготовления с заменой триметилхлорсилана органофункциональными хлорсиланами, содержащими Vin- или H-группы.

Заключения

В настоящее время кремнийорганические смолы с каждым годом находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Изучение и анализ научно-технических литературных и патентных источников позволили подчеркнуть большое разнообразие кремнийорганических смол, которые могут быть получены или модифицированы.

В первой части данного обзора обозначены основные типы классификации промышленных кремнийорганических смол и подробно рассмотрен класс MQ-смол. В свою очередь MQ-смолы являются важными коммерческими материалами, которые структурно похожи на наночастицы кремнезема, но при этом растворяются в органических растворителях. Доступность и изменчивость структуры и свойств MQ-смол позволяют рассматривать их как хороший пример органо-неорганического материала нанометрового размера, имеющего достаточно широкое коммерческое применение.

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. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.

3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 42–47.
4. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
5. Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Размахов М.Г., Гуляев А.И. Исследование теплофизических характеристик теплозащитного материала на основе стеклопластика при его деструкции // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-91-97.
6. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморреактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Пленочные кремнийорганические связующие для стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 15–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-15-18.
8. High fracture toughness hydrosilylation cured silicone resin: pat. US 6689859B2; filed 05.03.02; publ. 10.02.04.
9. Zhou W., Yang H., Guo X., Lu J. Thermal degradation behaviours of some branched and linear polysiloxanes // Polymer Degradation and Stability. 2006. Vol. 91 (7). P. 1471–1475. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.10.005.
10. Handbook of Silicone Materials / ed. M. Tanimura. Tokyo: Dow Corning Toray Silicone, 1993. Ch. 7 (in Japanese). 299 p.
11. Rochow E.G., Gilliam W.F. Polymeric methyl silicon oxides // Journal of the American Chemical Society. 1941. Vol. 63 (3). P. 798–800.
12. Methyl silicones and related products: pat. US 2258218; filed 01.08.39; publ. 07.10.41.
13. Способ получения полиорганосилоксановых смол для стеклотекстолитовых и стеклослюдинитовых цилиндров электротехнического назначения: а. с. № 122876 СССР; заявл. 17.01.59; опубл. 14.07.59.
14. Способ получения кремнийорганических лаков: а. с. № 127346 СССР; заявл. 28.03.56; опубл. 10.10.60.
15. Способ изготовления жидких полиметил-фенилсилоксаноэфирных смол: а. с. № 113047 СССР; заявл. 13.08.54; опубл. 01.01.58.
16. Способ получения полиорганосилоксанов: а. с. № 274359 СССР; заявл. 23.06.67; опубл. 24.06.70.
17. Китаева Н.С., Ширякина Ю.М., Мухаметов Р.Р., Шитов Р.О. Николай Семенович Лезнов: биография и вклад в развитие науки // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-112-124.
18. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
19. Robeyns C., Picard L., Ganachaud F. Synthesis, characterization and modification of silicone resins: An «Augmented Review» // Progress in Organic Coatings. 2018. Vol. 125. P. 287–315.
20. Silicone Resins Market by Type (Methyl, Methyl Phenyl), Application, End-Use Industry (Automotive & Transportation, Building & Construction, Electrical & Electronics, Healthcare, Industrial) and Region – Global Forecast to 2026. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/silicone-resin-market-95422194.html> (дата обращения: 16.08.2022).
21. Baney R.H., Itoh Maki, Sakakibara Akihito, Suzuki Toshio. Silsesquioxanes // Chemical Reviews. 1995. Vol. 95 (5). P. 1409–1430.
22. Hurd C.B. Studies on siloxanes. 1. The specific volume and viscosity in relation to temperature and constitution // Journal of the American Chemical Society. 1946. Vol. 68 (3). P. 364–370.

23. Brown L.H. Silicones in Protective Coatings // Treatise on Coatings. New York: Marcel Dekker, 1972. Vol. 1. P. 513.
24. Lee Smith. A., Winefordner J.D., Kolthoff I.M. The Analytical Chemistry of Silicones. Wiley Interscience. New York, 1991. P. 150–155.
25. Heilen W., Herrwerth S. Silicone Resins and their Combinations. Hanover: Vincentz Network, 2015. P. 112.
26. Tatarinova E., Vasilenko N., Muzafarov A. Synthesis and Properties of MQ Copolymers: Current State of Knowledge // Molecules. 2017. Vol. 22 (10). P. 1768.
27. Виноградов С.В., Поливанов Е.А., Чупрова Е.А. MQ-смолы. История и современность // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 4. С. 38–42.
28. Organo-siloxanes and methods of making them: pat. US 2441320; filed 20.03.44; publ. 11.05.48.
29. Copolymeric siloxanes and methods of preparing them: pat. US 2676182; filed 13.09.50; publ. 20.04.54.
30. Органосилоксаны, содержащие в основной цепи структурные фрагменты двуокиси кремния / сост. Б.В. Молчанов, Е.А. Чупрова, Е.А. Чернышев и др. М.: НИИТЭхим, 1984. 38 с.
31. Композиционные материалы на основе олиготриорганосилоксисилоксанов / сост. Б.В. Молчанов, С.В. Виноградов, Е.А. Чупрова. М.: НИИТЭхим, 1988. 34 с.
32. Виноградов С.В., Поливанов А.Н., Чупрова Е.А. Современное состояние технологии MQ-смол // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 10. С. 35–39.
33. Arkles B. Commercial Applications of Sol-Gel-Derived Hybrid Materials // MRS Bulletin. 2001. Vol. 26 (05). P. 402–408.
34. Flagg D.H., McCarthy T.J. Rediscovering Silicones: MQ Copolymers // Macromolecules. 2016. Vol. 49. P. 8581–8592.
35. Донской А.А. Тенденции применения эластомерных герметиков в авиационной промышленности и перспективы улучшения их свойств // Клеи. Герметики. Технологии. 2010. № 1. С. 24–27.
36. Lewis L.N., Wengrovius J.H., Burnell T.B., Rich J.D. Powdered MQ Resin-Platinum Complexes and Their Use as Silicone-Soluble Hydrosilylation Cure Catalysts // Chemistry of Materials. 1997. Vol. 9 (3). P. 761–765.
37. Di M., He S., Li R., Yan D. Radiation effect of 150 keV protons on methyl silicone rubber reinforced with MQ silicone resin // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2006. Vol. 248 (1). P. 31–36.
38. Chen D., Chen F., Hu X. et al. Thermal stability, mechanical and optical properties of novel addition cured PDMS composites with nano-silica sol and MQ silicone resin // Composites Science and Technology. 2015. Vol. 117. P. 307–314.
39. Amouroux N., Petit J., Leger L. Role of Interfacial Resistance to Shear Stress on Adhesive Peel Strength // Langmuir. 2001. Vol. 17. P. 6510–6517.
40. Xiang H., Ge J., Cheng S. et al. Synthesis and characterization of titania/MQ silicone resin hybrid nanocomposite via sol-gel process // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2011. Vol. 59. P. 635–639.
41. Shi X., Chen Z., Yang Y. Toughening of poly(L-lactide) with methyl MQ silicone resin // European Polymer Journal. 2014. Vol. 50. P. 243–248.
42. Jia P., Liu H., Liu Q., Cai X. Thermal degradation mechanism and flame retardancy of MQ silicon/epoxy resin composition // Polymer Degradation and Stability. 2016. Vol. 134. P. 144–150.
43. Organo-Siloxanes and Methods of Making Them: pat. US 2441320; filed 20.09.1944; publ. 11.05.48.
44. Siloxane Compositions which Form Ceramics at High Temperatures: pat. US 4269757; filed 18.01.80; publ. 26.05.81.
45. Organopolysiloxane compositions having pressure-sensitive adhesive properties: pat. US 2857356; filed 08.07.54; publ. 21.10.58.
46. Tough unsupported films formed from organopolysiloxanes: pat. US 3629358; filed 02.07.69; publ. 21.12.71.

47. Method for the preparation of an organopolysiloxane containing tetrafunctional siloxane units: pat. US 5070175; filed 28.05.91; publ. 03.12.91.
48. Organo-silicon copolymers and process of making same: pat. US 2562953; filed 06.03.47; publ. 07.08.51.
49. Ganicz T., Pakula T., Stanczyk W.A. Novel liquid crystalline resins based on MQ siloxanes // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2006. Vol. 691 (23). P. 5052–5055.
50. Suzuki T., Sakae Y., Kushibiki N., Mita I. Preparation and properties of inorgano-organic composite materials containing $R_3SiO_{1/2}$, SiO_2 and TiO_2 units // *Chemistry of Materials*. 1994. Vol. 6 (5). P. 692–696.
51. Kuo C.-F.J., Chen J.-B., Shih C.-Y., Huang C.-Y. Silicone resin synthesized by tetraethoxysilane and chlorotrimethylsilane through hydrolysis-condensation reaction // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. Vol. 131 (11). Art. 40317.
52. Egorova E.V., Vasilenko N.G., Demchenko N.V., Tatarinova E.A., Muzafarov A.M. Polycondensation of Alkoxysilanes in an Active Medium as a Versatile Method for the Preparation of Polyorganosiloxanes // *Doklady Chemistry*. 2009. Vol. 424. P. 15–18.
53. Sharp K.G. A two-component, non-aqueous route to silica gel // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 1994. Vol. 2. P. 35–41.
54. Zeitler V.A., Brown C.A. Tetrakis(triphenyl)siloxytitanium and Some Related Compounds // *Journal of American chemical society*. 1957. Vol. 79 (17). P. 4616–4618.
55. Chugunov V.S. The syntheses of some triphenylmethyl- and trivinylcyclohexane // *Russian Chemical Bulletin. Ser. Chem*. 1957. Vol. 11. P. 1368.
56. Sommer L.H., Creen L.Q., Whitmore F.C. Preparation of Organopolysiloxanes from Sodium Trimethylsilanolate // *Journal of American chemical society*. 1949. Vol. 71. P. 3253–3254.
57. Andrianov K.A., Dabagova A.K., Syrzova Z.S. Heterofunctional cocondensation of methyl(phenyl)acetoxysilanes with organosilicon compounds containing silicon-attached ethoxy groups // *Russian Chemical Bulletin. Ser. Chem*. 1962. Vol. 9. P. 1487–1491.
58. Improvements in or Relating to co-Polymeric Siloxanes and the Application Thereof: pat. GB 706719; filed 27.07.51; publ. 07.04.54.
59. Copolymeric siloxanes and methods of preparing them: pat. US 2676182; filed 13.09.50; publ. 20.04.54.
60. Organopolysiloxane adhesive and pressure-sensitive adhesive tape containing same: pat. US 2814601; filed 29.04.54; publ. 26.11.57.
61. Lentz C.W. Silicate minerals as sources of trimethylsilyl silicates and silicate structure analysis of sodium silicate solution // *Inorganic Chemistry*. 1964. Vol. 3 (4). P. 574–579.
62. Cervantes J., Rodriguez-Rodriguez E., Guzman-Andrade J.J. et al. Trimethylsilylation of natural silicates: Useful route toward polysiloxanes // *Silicon Chemistry*. 2003. Vol. 2. P. 185–194.
63. Organo-siloxanes: pat. US 2486162; filed 26.02.42; publ. 25.10.49.
64. Organo-siloxanes and method of making them: pat. US 2458944; filed 20.03.42; publ. 11.01.49.
65. Process for preparing a silicone resin: pat. US 2009/0093605; filed 19.12.06; publ. 09.04.09.

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». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
3. Kablov E.N. Materials of the new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 42–47.
4. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 10, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.

5. Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Razmahov M.G., Gulyaev A.I. Examination of thermophysical characteristics of a heat-protective material based on fiberglass during destruction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 10, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-91-97.
6. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. Davydova I.F., Kavun N.S. Plenochnye kremnijorganicheskie svyazuyushhie dlya stekloplastikov. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 15–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-15-18.
8. *High fracture toughness hydrosilylation cured silicone resin*: pat. US 6689859B2; filed 05.03.02; publ. 10.02.04.
9. Zhou W., Yang H., Guo X., Lu J. Thermal degradation behaviours of some branched and linear polysiloxanes. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91 (7), pp. 1471–1475. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.10.005.
10. *Handbook of Silicone Materials*. Ed. M. Tanimura. Tokyo: Dow Corning Toray Silicone, 1993. Ch. 7 (in Japanese), 299 p.
11. Rochow E.G., Gilliam W.F. Polymeric methyl silicon oxides. *Journal of the American Chemical Society*, 1941, vol. 63 (3), pp. 798–800.
12. *Methyl silicones and related products*: pat. US 2258218; filed 01.08.39; publ. 07.10.41.
13. *Method for producing polyorganosiloxane resins for glass-textolite and glass-mica cylinders for electrical purposes*: certificate of authorship No. 122876 USSR; filed 17.01.59; publ. 14.07.59.
14. *Method for obtaining organosilicon varnishes*: certificate of authorship No. 127346 USSR; filed 28.03.56; publ. 10.10.60.
15. *Method for the manufacture of liquid polymethyl-phenylsiloxane resins*: certificate of authorship No. 113047 USSR; filed 13.08.54; publ. 01.01.58.
16. *Method for obtaining polyorganoalkoxysilanes*: certificate of authorship No. 274359 USSR; filed 23.06.67; publ. 24.06.70.
17. Kitaeva N.S., Shiryakina Yu.M., Mukhametov R.R., Shitov R.O. Nikolay Semenovich Leznov: biography and contribution to the development of science. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-112-124.
18. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.
19. Robeyns C., Picard L., Ganachaud F. Synthesis, characterization and modification of silicone resins: An «Augmented Review». *Progress in Organic Coatings*, 2018, vol. 125, pp. 287–315.
20. *Silicone Resins Market by Type (Methyl, Methyl Phenyl), Application, End-Use Industry (Automotive & Transportation, Building & Construction, Electrical & Electronics, Healthcare, Industrial) and Region – Global Forecast to 2026*. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/silicone-resin-market-95422194.html> (accessed: August 16, 2022).
21. Baney R.H., Itoh Maki, Sakakibara Akihito, Suzuki Toshio. Silsesquioxanes. *Chemical Reviews*, 1995, vol. 95 (5), pp. 1409–1430.
22. Hurd C.B. Studies on siloxanes. 1. The specific volume and viscosity in relation to temperature and constitution. *Journal of the American Chemical Society*, 1946, vol. 68 (3), pp. 364–370.
23. Brown L.H. Silicones in Protective Coatings. *Treatise on Coatings*. New York: Marcel Dekker, 1972, vol. 1, p. 513.
24. Lee Smith. A., Winefordner J.D., Kolthoff I.M. *The Analytical Chemistry of Silicones*. Wiley Interscience. New York, 1991, pp. 150–155.
25. Heilen W., Herrwerth S. *Silicone Resins and their Combinations*. Hanover: Vincentz Network, 2015, p. 112.
26. Tatarinova E., Vasilenko N., Muzafarov A. Synthesis and Properties of MQ Copolymers: Current State of Knowledge. *Molecules*, 2017, vol. 22 (10), p. 1768.
27. Vinogradov S.V., Polivanov E.A., Chuprova E.A. MQ resins. History and modernity. *Glues. Sealants. Technology*, 2015, no. 4, pp. 38–42.

28. *Organo-siloxanes and methods of making them*: pat. US 2441320; filed 20.03.44; publ. 11.05.48.
29. *Copolymeric siloxanes and methods of preparing them*: pat. US 2676182; filed 13.09.50; publ. 20.04.54.
30. *Organosiloxanes containing structural fragments of silicon dioxide in the main chain*. Moscow: NIITEKhim, 1984, 38 p.
31. *Composite materials based on oligotriorganosiloxysiloxanes*. Moscow: NIITEKhim, 1988, 34 p.
32. Vinogradov S.V., Polivanov A.N., Chuprova E.A. Current state of MQ-resin technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, no. 10, pp. 35–39.
33. Arkles B. Commercial Applications of Sol-Gel-Derived Hybrid Materials. *MRS Bulletin*, 2001, vol. 26 (05), pp. 402–408.
34. Flagg D.H., McCarthy T.J. Rediscovering Silicones: MQ Copolymers. *Macromolecules*, 2016, vol. 49, pp. 8581–8592.
35. Donskoy A.A. Trends in the use of elastomeric sealants in the aviation industry and prospects for improving their properties. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2010, no. 1, pp. 24–27.
36. Lewis L.N., Wengrovius J.H., Burnell T.B., Rich J.D. Powdered MQ Resin-Platinum Complexes and Their Use as Silicone-Soluble Hydrosilylation Cure Catalysts. *Chemistry of Materials*, 1997, vol. 9 (3), pp. 761–765.
37. Di M., He S., Li R., Yan D. Radiation effect of 150 keV protons on methyl silicone rubber reinforced with MQ silicone resin. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2006, vol. 248 (1), pp. 31–36.
38. Chen D., Chen F., Hu X. et al. Thermal stability, mechanical and optical properties of novel addition cured PDMS composites with nano-silica sol and MQ silicone resin. *Composites Science and Technology*, 2015, vol. 117, pp. 307–314.
39. Amouroux N., Petit J., Leger L. Role of Interfacial Resistance to Shear Stress on Adhesive Peel Strength. *Langmuir*, 2001, vol. 17, pp. 6510–6517.
40. Xiang H., Ge J., Cheng S. et al. Synthesis and characterization of titania/MQ silicone resin hybrid nanocomposite via sol-gel process. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2011, vol. 59, pp. 635–639.
41. Shi X., Chen Z., Yang Y. Toughening of poly(L-lactide) with methyl MQ silicone resin. *European Polymer Journal*, 2014, vol. 50, pp. 243–248.
42. Jia P., Liu H., Liu Q., Cai X. Thermal degradation mechanism and flame retardancy of MQ siloxane/epoxy resin composition. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 134, pp. 144–150.
43. *Organo-Siloxanes and Methods of Making Them*: pat. US 2441320; filed 20.09.1944; publ. 11.05.48.
44. *Siloxane Compositions which Form Ceramics at High Temperatures*: pat. US 4269757; filed 18.01.80; publ. 26.05.81.
45. *Organopolysiloxane compositions having pressure-sensitive adhesive properties*: pat. US 2857356; filed 08.07.54; publ. 21.10.58.
46. *Tough unsupported films formed from organopolysiloxanes*: pat. US 3629358; filed 02.07.69; publ. 21.12.71.
47. *Method for the preparation of an organopolysiloxane containing tetrafunctional siloxane units*: pat. US 5070175; filed 28.05.91; publ. 03.12.91.
48. *Organo-silicon copolymers and process of making same*: pat. US 2562953; filed 06.03.47; publ. 07.08.51.
49. Ganicz T., Pakula T., Stanczyk W.A. Novel liquid crystalline resins based on MQ siloxanes. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2006, vol. 691 (23), pp. 5052–5055.
50. Suzuki T., Sakae Y., Kushibiki N., Mita I. Preparation and properties of inorgano-organic composite materials containing $R_3SiO_{1/2}$, SiO_2 and TiO_2 units. *Chemistry of Materials*, 1994, vol. 6 (5), pp. 692–696.
51. Kuo C.-F.J., Chen J.-B., Shih C.-Y., Huang C.-Y. Silicone resin synthesized by tetraethoxysilane and chlorotrimethylsilane through hydrolysis-condensation reaction. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, vol. 131 (11), art. 40317.

52. Egorova E.V., Vasilenko N.G., Demchenko N.V., Tatarinova E.A., Muzafarov A.M. Polycondensation of Alkoxysilanes in an Active Medium as a Versatile Method for the Preparation of Polyorganosiloxanes. *Doklady Chemistry*, 2009, vol. 424, pp. 15–18.
53. Sharp K.G. A two-component, non-aqueous route to silica gel. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 1994, vol. 2, pp. 35–41.
54. Zeitler V.A., Brown C.A. Tetrakis(triphenyl)siloxytitanium and Some Related Compounds. *Journal of American chemical society*, 1957, vol. 79 (17), pp. 4616–4618.
55. Chugunov V.S. The syntheses of some triphenylmethyl- and trivinylcyclohexane. *Russian Chemical Bulletin. Ser. Chem.*, 1957, vol. 11, pp. 1368.
56. Sommer L.H., Creen L.Q., Whitmore F.C. Preparation of Organopolysiloxanes from Sodium Trimethylsilylanolate. *Journal of American chemical society*, 1949, vol. 71, pp. 3253–3254.
57. Andrianov K.A., Dabagova A.K., Syrzova Z.S. Heterofunctional cocondensation of methyl(phenyl)acetoxysilanes with organosilicon compounds containing silicon-attached ethoxy groups. *Russian Chemical Bulletin. Ser. Chem.*, 1962, vol. 9, pp. 1487–1491.
58. *Improvements in or Relating to co-Polymeric Siloxanes and the Application Thereof*: pat. GB 706719; filed 27.07.51; publ. 07.04.54.
59. *Copolymeric siloxanes and methods of preparing them*: pat. US 2676182; filed 13.09.50; publ. 20.04.54.
60. *Organopolysiloxane adhesive and pressure-sensitive adhesive tape containing same*: pat. US 2814601; filed 29.04.54; publ. 26.11.57.
61. Lentz C.W. Silicate minerals as sources of trimethylsilyl silicates and silicate structure analysis of sodium silicate solution. *Inorganic Chemistry*, 1964, vol. 3 (4), pp. 574–579.
62. Cervantes J., Rodnguez-Rodnguez E., Guzman-Andrade J.J. et al. Trimethylsilylation of natural silicates: Useful route toward polysiloxanes. *Silicon Chemistry*, 2003, vol. 2, pp. 185–194.
63. *Organo-siloxanes*: pat. US 2486162; filed 26.02.42; publ. 25.10.49.
64. *Organo-siloxanes and method of making them*: pat. US 2458944; filed 20.03.42; publ. 11.01.49.
65. *Process for preparing a silicone resin*: pat. US 2009/0093605; filed 19.12.06; publ. 09.04.09.

Информация об авторах

Шитов Роман Олегович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бутузов Александр Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Roman O. Shitov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Butuzov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.09.2022.

The article was submitted 26.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 01.09.2022.