

УДК 678

РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Павлычева Е.А.

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»,
Москва, e-mail: pavlychevaliza@mail.ru;

В работе представлены результаты разработки полимерной композиции для получения электроизоляционных покрытий с улучшенными электрофизическими и механическими свойствами. Данная полимерная композиция способна к отверждению при комнатной температуре и может быть использована для защиты электронных, радио- и электротехнических приборов, устройств, оборудования и их отдельных элементов. Полимерная композиция разработана на основе диметилсилоксанового каучука, катализатора К-18 и наполнителей – оксидов алюминия и галлия. Применение данных наполнителей в оптимальных количествах позволяет повысить диэлектрические характеристики получаемых покрытий. При этом оксид алюминия способствует стабилизации электроизоляционных свойств, а оксид галлия повышает адгезию к стальным и алюминиевым поверхностям, а также повышает поверхностную прочность покрытия, что дает дополнительную защиту изолируемой поверхности от механических воздействий. Если количество рассматриваемых наполнителей будет низким, то и электроизоляционные свойства покрытия будут невысокими. Избыток оксида алюминия вызывает нестабильность и анизотропию свойств покрытия, а избыток оксида галлия становится причиной ухудшения адгезии покрытия к обрабатываемой поверхности. Исследования показали, что использование данной полимерной электроизоляционной композиции обеспечивает более высокие по сравнению с известным и близким по составу покрытием электрофизические и механические защитные характеристики.

Ключевые слова: электроизоляционное покрытие, диметилсилоксановый каучук, оксид алюминия, оксид галлия, диэлектрическая проницаемость, удельное объемное электрическое сопротивление, адгезия

DEVELOPMENT OF POLYMER COMPOSITION FOR THE PRODUCTION OF ELECTRICAL INSULATION COATINGS

Pavlycheva E.A.

I.M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, e-mail: pavlychevaliza@mail.ru

The paper presents the results of the development of a polymer composition for obtaining electrical insulating coatings with improved electrophysical and mechanical properties. This polymer composition is capable of curing at room temperature and can be used to protect electronic, radio and electrical appliances, devices, equipment and their individual elements. The polymer composition is developed on the basis of dimethylsiloxane rubber, K-18 catalyzers and fillers – aluminum and gallium oxides. The use of these fillers in optimal quantities makes it possible to increase the dielectric characteristics of the coatings obtained. At the same time, aluminum oxide helps to stabilize the electrical insulating properties, and gallium oxide increases adhesion to steel and aluminum surfaces, as well as increases the surface strength of the coating, which provides additional protection of the insulated surface from mechanical influences. If the number of fillers under consideration is low, then the electrical insulation properties of the coating will be low. An excess of aluminum oxide causes instability and anisotropy of the coating properties, and an excess of gallium oxide causes a deterioration in the adhesion of the coating to the surface to be treated. Studies have shown that the use of this polymer electrical insulation package provides higher electrophysical and mechanical protective characteristics compared to the known and similar coating composition.

Keywords: electrical insulation coating, dimethylsiloxane rubber, aluminum oxide, gallium oxide, permittivity, specific volume electrical resistance, adhesion

Любой материал и изделия из него обладают определенными значениями свойств, которые определяют его возможные области применения и дают преимущества или недостатки перед другими материалами и изделиями. Для расширения областей применения, повышения эффективности использования, усиления преимуществ и уменьшения недостатков проводят модификации материалов с помощью добавок, совершенствуют технологии их получения и производства, создают изделия и конструкции из нескольких слоев, где каждый слой выполняет свои собственные функции.

Последний способ отличается универсальностью, сочетая в себе простоту и широкие возможности по комбинированию слоев, один из которых является основным и в большинстве случаев выполняет функции несущего каркаса для изделия или конструкции. Наносимые на эту основу слои выполняют одну или несколько функций, среди которых наиболее часто присутствуют теплоизоляция, гидроизоляция, пароизоляция, электроизоляция, огнезащита, а также защита от других внешних факторов и придание эстетичного внешнего вида [1–3]. При этом наносимые слои не-

обходимо наносить в определенной последовательности таким образом, чтобы наружные слои выполняли в первую очередь функции защиты от внешних воздействий различного характера и природы, а промежуточные слои, находящиеся между наружным или наружными и основным слоями, придавали дополнительные свойства материалу или конструкции, например снижали теплопроводность.

В зависимости от того, какие функции выполняют наружные или промежуточные защитные слои, их выполняют из различных материалов, среди которых наиболее распространенными являются материалы на полимерной основе, на основе стекла (эмали, глазури и др.), керамики, металлов и их сплавов, а также композиционные материалы, в которых перечисленные материалы являются связующими или наполнителями [4–6].

Одними из самых широких возможностей обладают композиционные материалы на полимерных связующих за счет большого разнообразия полимерных материалов, а также благодаря практически неограниченным сочетаниям как разных полимеров, так и разных наполнителей между собой [7–9].

В последнее время для получения материалов с высокими физико-механическими, в том числе по гидрофобным и адгезионным показателям, диэлектрическими и другими характеристиками, в качестве полимерных связующих часто используют различные кремнийорганические олигомеры и сополимеры [10–12]. Однако полиорганосилоксановые материалы обладают сравнительно невысокими физико-механическими свойствами, поэтому их наполняют различными наполнителями, в том числе оксидами различных металлов, таких как железо, цинк, титан и т.д. [13]. При этом существенно снижаются диэлектрические характеристики получаемых композиционных материалов, так как упомянутые оксиды металлов являются полупроводниками, что не дает использовать данные материалы в качестве электроизоляционных. В связи с этим большой научный и практический интерес представляет подбор составов полимерных композиций с наполнением оксидами других металлов, чтобы при повышении физико-механических свойств сохранялись и высокие диэлектрические характеристики.

Целью данной работы является разработка полиорганосилоксановой композиции с использованием оксидов алюминия и галлия для получения электроизоляционных покрытий с высокими эксплуатационными и технологическими показателями.

Материалы и методы исследования

Основой разрабатываемой полимерной композиции являлся низкомолекулярный диметилсилоксановый каучук СКТН-А по ГОСТ 13835-73. Данное полиорганосилоксановое связующее представляет собой раствор диметилсилоксановой смолы с концентрацией 48–52% в ароматическом растворителе, стабилизировано активной окисью кремния и отверждается катализаторами холодного отверждения. СКТН-А отличается условной вязкостью 90–150 с, потерями массы не более 2%, термостабильностью не более 2%. Материалы и покрытия, полученные при помощи данного связующего, могут эксплуатироваться при температурах от -60 до $+250$ °С.

В качестве отвердителя холодного отверждения для выбранного полиорганосилоксанового связующего применялся катализатор К-18 по ТУ 6-02-805-75, который представляет собой раствор диэтилдикаприлата олова в этилсиликате при соотношении 1:4 соответственно. В качестве модифицирующих наполнителей применяли активный оксид алюминия Al_2O_3 марки АОА-2 по ГОСТ 8136-85 для повышения диэлектрических характеристик и оксид галлия Ga_2O_3 по ТУ 6-09-3729-80 для повышения физико-механических и электрофизических показателей.

Полимерную композицию получали путем первоначального перемешивания диметилсилоксанового каучука с оксидами алюминия и галлия в определенных данным экспериментом пропорциях в течение 25–30 мин. Затем к полученной смеси добавлялось заданное проводимым исследованием количество катализатора К-18 для перемешивания в течение 10 мин. Обе стадии перемешивания проводились без нагревания. Полученная композиция методом полива через фильеру наносилась на предварительно обезжиренные подложки из стали и алюминия. Отверждение композиции с получением покрытия проводилось в течение 72 ч при температуре 20–25 °С.

Адгезия полученных электроизоляционных покрытий к стальной и алюминиевой подложкам определялась при помощи адгезиометра ПСО-МГ4 по ГОСТ 28574-90 методом отрыва стального цилиндра диаметром 20 мм, приклеенного к нанесенному и отвержденному покрытию.

Для определения электрической проводимости полученных покрытий использовалась измерительная ячейка, состоящая из подвижного и неподвижного электродов, изготовленных из нержавеющей стали, а также прижимного устройства. Измерения

проводились на образцах в виде дисков диаметром 100 мм и толщиной 2 мм, поверхности которых перед контактом с электродами смазывали электропроводящей пастой. Величина электрической проводимости измерялась тераомметром UNI-T в соответствии со стандартной методикой по ГОСТ 20214-74.

Диэлектрическая проницаемость определялась волновым методом на измерительном комплексе, состоящем из прецизионной измерительной линии P1-20, перестраиваемого генератора M31102-1 на диоде Ганна (8–11 ГГц), ферритового вентиля и отрезка волновода стандартного сечения 10x23 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе работы были исследованы характеристики покрытий, полученные на основе составов полимерных композиций, приведенных в табл. 1.

Стоит отметить, что при количествах оксида алюминия свыше 30 мас. ч. происходил избыточный рост вязкости композиции, что затрудняло получение гомогенной смеси при перемешивании и являлось причиной нестабильности и анизотропии свойств получаемых покрытий [14]. В то же время введение менее 10 мас. ч. оксида алюминия не позволяло получить достаточно высокие диэлектрические показатели получаемых

покрытий. Добавка менее 5 мас. ч. оксида галлия практически не влияла на свойства получаемых покрытий, а введение 20 мас.ч. и выше практически не изменяло свойства покрытий по сравнению с образцами, полученными при 15 мас. ч. данного компонента смеси.

Физико-технические характеристики образцов покрытий, полученные в результате проведения исследований, представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что введение используемых в данной работе наполнителей повышает диэлектрические характеристики получаемых покрытий, а введение оксида галлия дополнительно способствует повышению адгезии получаемого покрытия к подложкам из стали и алюминия.

Из полученных результатов также можно сделать вывод о том, что оксид галлия не только повышает объемное электрическое сопротивление, являясь широкозонным полупроводниковым покрытием, но и образует на поверхности покрытия прочную защитную пленку, способствуя защите покрытия и, как следствие, поверхности, на которую это покрытие наносится, от механических воздействий. В свою очередь оксид алюминия, кроме того, что повышает электроизоляционные свойства покрытия, являясь диэлектриком, также способствует улучшению стабильности диэлектрических характеристик.

Таблица 1

Составы композиций для получения образцов покрытий

№ состава	Содержание компонентов, мас. ч.			
	СКТН-А	К-18	Al ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
1	100	6	10	15
2	100	6	30	10
3	100	6	20	5

Таблица 2

Физико-технические характеристики образцов разработанных покрытий

№ образца	Адгезия по методу отрыва R, МПа		Удельное объемное электрическое сопротивление $\rho_v \cdot 10^{11}$, Ом·мм	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
	Стальная подложка	Алюминиевая подложка		
1	0,88	0,62	$1,2 \cdot 10^{11}$	4,0
2	0,53	0,44	$1,4 \cdot 10^{11}$	3,87
3	0,24	0,21	$1,0 \cdot 10^{11}$	3,80

Сравнительная оценка свойств разработанного и известного электроизоляционных покрытий

Свойство	Известное покрытие	Разработанное покрытие
Адгезия по методу отрыва, МПа: – стальная подложка; – алюминиевая подложка	0,14–0,26 –	0,24–0,88 0,21–0,62
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·мм	$1,0 \cdot 10^{10} - 1,0 \cdot 10^{12}$	$1,0 \cdot 10^{11} - 1,4 \cdot 10^{11}$
Диэлектрическая проницаемость	3–4	3,8–4,0

Для дополнительной оценки свойств покрытий, получаемых с использованием исследуемой полимерной композиции, было проведено сравнение их наиболее важных показателей с известным и близким по составу электроизоляционным покрытием, получаемым на основе 15–60 мас. % полиметилфенилсилоксана в роли полиорганосилоксановой основы, 5–20 мас. % оксида металла, в частности хрома, кобальта, меди, титана или цинка, в роли наполнителя, 10–30 мас. % толуола или о-ксилола в роли растворителя и 25–50 мас. % тетраметилсилана или смеси пропан-бутан в роли азеотропного вытеснителя [15]. Сравнение представлено в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что разработанное защитное электроизоляционное покрытие сходно с известным покрытием по диэлектрическим показателям и существенно превосходит его по адгезии к стальным поверхностям, что предполагает повышенные эффективность и долговечность при его применении для электроизоляции.

Заключение

По итогам проведенных в данной работе экспериментальных исследований был разработан состав, включающий диметилсилоксановый каучук в роли полимерной основы и пленкообразующего компонента, оксиды алюминия и галлия в качестве комплексного наполнителя для улучшения характеристик покрытия и катализатор К-18 для холодного отверждения покрытия.

Результаты выполненной работы подтверждают, что применяемые наполнители повышают диэлектрические характеристики получаемого покрытия. При этом оксид галлия дополнительно повышает адгезию к стальным и алюминиевым поверхностям и образует прочную пленку на поверхности покрытия, а оксид алюминия также способствует стабильности диэлектрических характеристик.

По итогам проведенных экспериментов выявлено, что для получения полимерных

покрытий с высокими электроизоляционными показателями и повышенной адгезией к стальным и алюминиевым поверхностям на 100 мас. ч. диметилсилоксанового каучука и 6 мас. ч. катализатора К-18 возможно введение 10–30 мас.ч. оксида алюминия и 5–15 мас.ч. оксида галлия в качестве дисперсных наполнителей и модифицирующих добавок.

При сравнительной оценке образцов получаемых в данной работе покрытий с образцами известного и близкого по составу электроизоляционного покрытия на полимерной основе выявлено, что разработанная полимерная композиция позволяет получить материал, сходный с известным по диэлектрическим показателям и существенно превосходящий его по адгезии к стальным поверхностям.

Таким образом, рассмотренная в данной работе полимерная композиция может применяться для нанесения электроизоляционных покрытий на стальные и алюминиевые поверхности электронных, радио- и электротехнических приборов, устройств, оборудования и их отдельных элементы.

Список литературы

1. Соколов А.Г. Инженерия поверхности и технологии повышения эксплуатационных свойств изделий из металлических сплавов: учебное пособие. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 304 с.
2. Федоревская А.А. Современные материалы для кровельных покрытий // Известия Ростовского государственного строительного университета. 2015. Т. 2. № 20. С. 57–63.
3. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного сырья и стекольного боя // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22–26.
4. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия: учеб. пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 200 с.
5. Шатров А.С. Защитные оксидно-керамические покрытия, формируемые на алюминиевых сплавах методом плазменного электролитического оксидирования // Коррозия: материалы, защита. 2012. № 4. С. 28–37.
6. Маркова А.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г., Чухланов В.Ю., Подолов А.А. Комплексная утилизация отходов Владимирской области в производстве высокопрочной стро-

- ительной керамики из местной малопластичной глины // Экология промышленного производства. 2016. № 3 (95). С. 14–17.
7. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.
8. Чухланов В.Ю., Усачева Ю.В., Селиванов О.Г., Ширкин Л.А. Новые лакокрасочные материалы на основе модифицированных пипериленистирольных связующих с использованием гальваношлама в качестве наполнителя // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. № 12. С. 52–55.
9. Liu T., Ma L., Wang X., Wang J., Qian H., Zhang D., Li X. Self-healing corrosion protective coatings based on micro/nanocarriers: A review // Corrosion Communications. 2021. Vol. 1. P. 18–25.
10. Eduok U., Faye O., Szpunar J. Recent developments and applications of protective silicone coatings: A review of PDMS functional materials // Progress in Organic Coatings. 2017. Vol. 111. P. 124–163.
11. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54–67.
12. Чухланов В.Ю., Селиванов О.Г. Модификация полиорганосилоксаном связующего на основе полиуретана // Пластические массы. 2013. № 9. С. 8–10.
13. Мушенко Р.С. Основные принципы формирования композиционных силиконовых материалов [Электронный ресурс]. URL: https://tkfm.org/principi_formirovania (дата обращения: 15.02.2022).
14. Павлычева Е.А. Разработка полимерной композиции для получения материалов и изделий с улучшенными диэлектрическими характеристиками // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 12. С. 60–64.
15. Журавский М.М., Макаров А.Ф. Кремнийорганическая композиция для электроизоляционного и антикоррозионного покрытия холодного отверждения и способ изготовления этой композиции в аэрозольном исполнении. Патент РФ № 2391364. Опубл. 10.06.2010. Бюл. № 16.