

ПОЛУЧЕНИЕ НОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОГО АНТИКОРРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ

© А. В. Пестов¹, В. А. Осипова¹, О. В. Корякова¹, Т. И. Горбунова¹,
С. В. Смирнов², И. А. Веретенникова²

¹ Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского Уральского отделения РАН,
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 22

² Институт машиноведения Уральского отделения РАН,
620108, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34
E-mail: pestov@ios.uran.ru

Поступила в Редакцию 2 июля 2019 г.

После доработки 24 сентября 2019 г.

Принята к публикации 19 декабря 2019 г.

На основе одноупаковочного эпоксидного клея горячего отверждения получены новые адгезивные материалы для формирования защитных антикоррозионных покрытий. В качестве катализаторов отверждения использованы N-метилпиперазиниламид перфторпентаановой кислоты и полиэтиленполиамин. Адгезивные композиции в отвержденном состоянии характеризовали степенью набухания, содержанием гель-фракции, величиной твердости по Виккерсу, значением модуля упругости и деформацией ползучести, а также антикоррозионными свойствами по отношению к низкоуглеродистой стали (Ст 3) и алюминий-магний-марганцевому сплаву (АМг-6). Установлено, что химическое строение органического растворителя и аминного соотвердителя существенным образом определяет эксплуатационные характеристики получаемых покрытий.

Ключевые слова: эпоксидные антикоррозионные покрытия; твердость; модуль упругости; ползучесть

DOI: 10.31857/S0044461820030111

Высокая реакционная способность эпоксидных групп глицидиловых производных ОН-кислот не только обеспечивает их использование в качестве основы адгезивных материалов для получения клеев, герметиков и лакокрасочных покрытий с эффективными эксплуатационными свойствами [1, 2], но и создает возможность простого химического модифицирования коммерческих эпоксидных смол с целью улучшения или принципиального изменения характеристик конечного продукта [3, 4]. Однако такой путь получения новых материалов на основе диглицидиловых эфиров имеет существенное ограничение, поскольку требует целенаправленного синтеза эпоксидных олигомеров [1, 5, 6], что в конечном счете приводит к низкой коммерческой доступности адгезивной основы. Стратегия модифицирования свойств наиболее распространенных многотоннажных эпоксидных продуктов путем наполнения неорганиче-

скими [7, 8] и органическими [3, 9] соединениями обеспечивает небольшое улучшение механических и эксплуатационных свойств до такого предела, когда повышение количества компонентов не приводит к принципиальным изменениям свойств. Для достижения существенного изменения свойств материала требуется увеличение в нем содержания специальных компонентов [10, 11], что повышает стоимость материала и ограничивает его практическое применение.

Для отверждения эпоксидной смолы любого типа необходимо использование отвердителя или системы соотверждения [1–5], поэтому формирование полифункциональных компонентов и их добавление в адгезивную основу является эффективным методом получения новых материалов на основе диглицидиловых эфиров. Действительно, полиамидамины [2, 12], полиаминосилоксаны [3, 10], анилин-формальдегид-

ные смолы [13] и полииолы [4] в значительной мере определяют механические свойства новых материалов. Использование функционализированного полиэтиленimina позволяет увеличить электропроводность [14], а производных алкоксисиланов повышает термостойкость [3, 9]. Содержание фосфорорганических соединений в адгезивной основе обеспечивает огнестойкость материала [15]. Введение ОН-кислот позволяет повысить адгезию созданного материала [16, 17], а его модифицирование фторорганическими соединениями увеличивает гидрофобность [18] и обеспечивает антикоррозионные свойства [19].

Высокоэффективное отверждение эпоксидных смол обеспечивается при использовании алкоксидов титана(IV) [20, 21], что приводит к качественному склеиванию различных неорганических материалов и увеличению термо- и вакуумстойкости.

С учетом перспективности модифицирования отвердителей для увеличения их функциональности целью настоящей работы являлось получение защитного антикоррозионного покрытия на основе коммерческой эпоксидной смолы ЭД-20, отверждаемой алкоксидом титана(IV).

Экспериментальная часть

В работе использовали эпоксидно-диановую смолу марки ЭД-20 производства ФКП «Завод им. Я. М. Свердлова» (г. Дзержинск) с эпоксидным числом 21.1%, клей ЭТП [20, 22], полиэтиленimin (разветвленный, Aldrich, средняя молекулярная масса 25 кДа), этилцеллозольв и тетрагидрофуран квалификации х.ч. перед использованием перегоняли и сушили от следов воды. 1-Метил-4-(2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентаноил)пиперазин получали, как описано ранее в работе [23].

Клеевые композиции готовили и отверждали разработанными ранее методами [19–21]. Характеристику их состава проводили с использованием элементного автоматического анализатора PE 2400 (Perkin Elmer) и ИК-Фурье-спектрометра Spectrum ONE (Perkin Elmer). Определение содержания растворимой фракции в отвержденных композициях проводили с использованием исчерпывающей горячей экстракции ацетоном [20].

Исследование механических свойств покрытий осуществляли методом инструментального индентирования с использованием автоматизированной системы для измерения микротвердости FISCHERSCOPE HM2000 XYm в соответствии с ISO 14577. Индентирование проводили на поверхности

покрытия, не подвергнутой механическим воздействиям, что обеспечило отсутствие влияния дополнительной обработки на полученные результаты. Испытания осуществляли при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$. При испытаниях использовали пирамидальный четырехгранный алмазный индентор Виккерса с углом между гранями 136° . В качестве характеризующих величин рассматривали значения твердости (HV), контактного модуля упругости (E^*), доли работы пластической деформации в общей работе вдавливания (n_{plast}) и показателя ползучести (C_{IT}), который рассчитывали как относительное увеличение глубины вдавливания индентора, наблюдаемое при неизменной нагрузке 1 Н в течение 60 с.

Исследование скорости равномерной коррозии покрытых отвержденными клеевыми композициями металлических электродов проводили при комнатной температуре методом поляризационного сопротивления с помощью коррозиметра Эксперт-004 и двухэлектродного измерительного датчика: для стали 3 — в 10%-ном растворе HCl, для сплава АМг-6 — в 3.5%-ном растворе морской соли.

Обсуждение результатов

Одноупаковочный эпоксидный клей, содержащий алкоксид титана(IV), продемонстрировал эффективность не только в качестве клея [19, 20], но и при использовании его для формирования покрытий металлов [19, 21]. С целью повышения технологичности последнего применения, требующего уменьшения вязкости материала для получения равномерного и тонкого покрытия, использовали разбавление готового клея ЭТП этилцеллозольвом. Это изменение потребовало дополнительно использовать аминный сокатализатор отверждения: полиэтиленполиамин — стандартный отвердитель эпоксидных смол и 1-метил-4-(2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентаноил)-пиперазин (МНП) — амид фторсодержащей карбоновой кислоты, ранее продемонстрировавший каталитические свойства в отверждении смолы с одновременным увеличением антикоррозионных свойств [19].

В ИК-спектрах отвержденных композиций наблюдается присутствие полосы поглощения при 910 см^{-1} с разной интенсивностью, что свидетельствует о наличии непрореагировавших оксиановых групп. Определение содержания растворимой фракции (см. таблицу) наглядно демонстрирует различную степень сетчатости структуры отвержденных композиций, величина которой зависит как от природы аминного соотвердителя, его количества, так и от растворителя.

Характеристика механических свойств отвержденных композиций на основе клея ЭТП

№ композиции	Аминный соотвердитель	Растворитель	Содержание растворимой фракции, %	Твердость по Виккерсу, МПа	Контактный модуль упругости, ГПа	Доля работы пластической деформации, %	Показатель ползучести, %
Покрытие стали 3							
1	—	—	55	260 ± 3	3.83 ± 0.05	54.2 ± 0.2	6.03 ± 0.02
2	Полиэтиленполиамин	—	68	330 ± 3	5.25 ± 0.05	59.3 ± 0.2	7.77 ± 0.02
3	Полиэтиленполиамин	Этилцеллозольв	76	450 ± 3	23.32 ± 0.05	84.9 ± 0.2	6.97 ± 0.02
4	Полиэтиленполиамин	Тетрагидрофуран	62	300 ± 3	5.09 ± 0.05	59.3 ± 0.2	7.21 ± 0.02
5	1-Метил-4-(2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентаноил)пиперазин	Этилцеллозольв	83	200 ± 3	27.84 ± 0.05	99.2 ± 0.2	23.41 ± 0.02
Покрытие алюминиевого сплава АМг-6							
6	—	—	55	275 ± 3	3.87 ± 0.05	52.3 ± 0.2	5.69 ± 0.02
7	Полиэтиленполиамин	—	68	380 ± 3	5.38 ± 0.05	80.7 ± 0.2	7.03 ± 0.02
8	Полиэтиленполиамин	Этилцеллозольв	76	430 ± 3	16.02 ± 0.05	77.3 ± 0.2	7.49 ± 0.02
9	1-Метил-4-(2,2,3,3,4,4,5,5,5-нонафторпентаноил)пиперазин	Этилцеллозольв	83	280 ± 3	5.70 ± 0.05	71.8 ± 0.2	7.19 ± 0.02

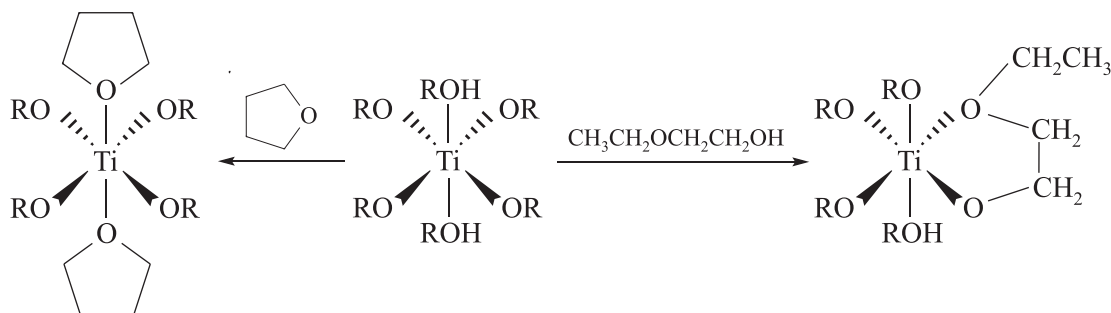
Отвержденные композиции не набухают в воде, соляно-кислотном и водно-солевом растворах.

Качество покрытия напрямую не зависит от степени конверсии эпоксидных групп при отверждении (см. таблицу), как это наблюдается при использовании адгезивных материалов в качестве клея [19, 21]. Наоборот, отвержденная часть эпоксидной смолы фактически выполняет роль наполнителя в неотвержденной или слабо отвержденной части смолы, что способствует ее упрочнению в соответствии с известными закономерностями [5–7, 24, 25]. Действительно, использование самого клея ЭТП для получения покрытия толщиной 0.32–0.35 мм (см. таблицу, композиции № 1 и 6) обеспечивает низкое значение твердости и модуля упругости по сравнению с этим же клеем, отвержденным с помощью полиэтилениполиамины (композиции № 2 и 7). Разбавление клея ЭТП этилцеллозольвом при каталитическом содержании полиэтилениполиамины привело к еще большему упрочнению покрытия (композиции № 3 и 8), несмотря на его меньшую толщину (0.03–0.04 мм). В этом же ряду композиций степень конверсии эпоксидных групп уменьшается, поскольку увеличивается доля растворимой части в отвержденной композиции, что противоречит наблюдаемой закономерности возрастания склеивающей способности при повышении количества гель-фракции. Использование тетрагидрофурана

вместо этилцеллозольва (см. таблицу, композиция № 4) при получении покрытия практически эквивалентно холодному отверждению клея ЭТП (композиция № 2), что свидетельствует об участии алкоксида титана(IV) в формировании комплекса механических свойств конечного материала. Этилцеллозольв — хелатирующий спирт, обладающий большей донорной способностью по сравнению с тетрагидрофураном, который является моновалентным простым эфиром. При использовании этилцеллозольва в отличие от тетрагидрофурана координационная сфера металлоцентра насыщается эффективнее с образованием более прочных координационных соединений (см. схему) [26].

Как следствие уменьшается льюисовская кислотность атома титана(IV), понижается его активность при отверждении смолы, растворитель из покрытия на стадии сушки весь не удаляется, оставаясь в виде нового координационного соединения. Этот комплекс может выполнять функцию наполнителя смолы, увеличивающего его механическую прочность, и пластификатора, о чем свидетельствует повышенное значение доли работы пластической деформации в общей работе вдавливания (см. таблицу, композиция № 3). Таким образом, выбор растворителя для изменения типа адгезивной композиции, содержащей алкоксид титана(IV), от клея к лаку позволяет осуществлять простое химическое модифицирование отвердителя

Схема взаимодействия алкоксида титана(IV) с тетрагидрофураном и этилцеллозольвом



in situ, приводящее к расширению эксплуатационных возможностей композиции.

При замене аминного соотвердителя полиэтиленполиамина на ранее исследованный амид фторсодержащей карбоновой кислоты — МНП был получен материал (см. таблицу, композиции № 5 и 9), свойства которого уже в сильной степени зависят еще и от природы подложки. Высокие значения содержания растворимой части в отвержденной композиции свидетельствуют о низкой степени сетчатости, что обусловлено дезактивирующим влиянием этилцеллозольва на кислотные люисовские центры и меньшей реакционной способностью амида по сравнению с полиэтиленполиамином [19]. Низкое значение твердости и противоречиво высокая величина n_{plast} демонстрируют высокую пластификацию отвержденного полимера, вклад в которую вносят неотвержденные олигомеры, алкоксиды титана(IV) и амид фторсодержащей карбоновой кислоты.

Известно, что частично фторированные соединения повышают влагостойкость и температуру стеклования целевых материалов на основе эпоксидных смол [27, 28]. При этом именно присутствие МНП в композиции сильно дифференцирует свойства покрытия в зависимости от природы прокрываемого металла. В остальных случаях механические свойства покрытия принципиально не различаются для разных подложек. Показатель ползучести (C_{IT}), который рассчитывали как относительное увеличение глубины вдавливания индентора при неизменной нагрузке, является сравнительной характеристикой для оценки способности материалов выдерживать механические нагрузки в течение длительного времени. Низкое значение величины C_{IT} , полученное для всех композиций, за исключением композиции № 5 (см. таблицу), свидетельствует о высокой эффективности покрытия.

Оценка скорости равномерной коррозии (K_n) электродов, изготовленных из стали 3 и сплава АМг-6 и покрытых адгезивными композициями, показала, что

при переходе от клея к лаку на его основе антикоррозионные свойства не ухудшаются.

Степень защиты (Z), рассчитанная по уравнению

$$Z = \frac{K_{n1} - K_{n2}}{K_{n1}} \cdot 100\%,$$

где K_{n1} и K_{n2} — скорости равномерной соляно-кислотной коррозии электродов из Ст 3 без покрытия и с покрытием соответственно (рис. 1), для покрытия лаком с отвердителем полиэтиленполиамином составляет 79%, с отвердителем МНП — 83%, а с покрытием клеем ЭТП — 87%.

Наиболее стабильную антикоррозионную защиту электродов из АМг-6 в солевой среде продемонстрировало покрытие лаком с отвердителем полиэтилен-

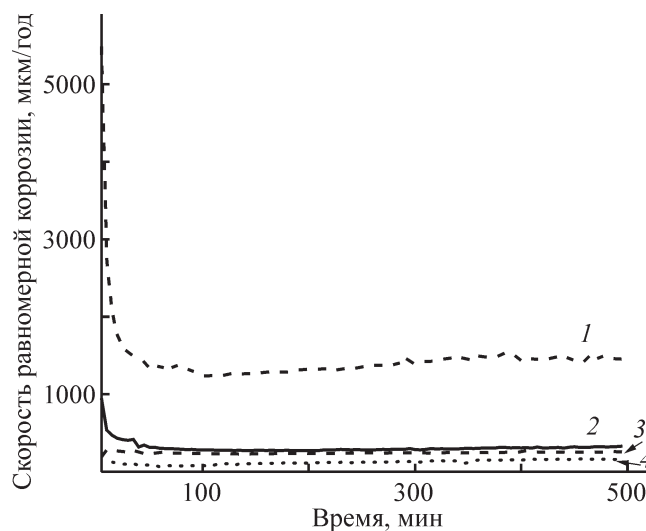


Рис. 1. Зависимость скорости равномерной коррозии электродов, изготовленных из стали 3 и покрытых отвержденными адгезивными композициями, от времени в 10%-ном растворе HCl.

1 — холостой опыт (электроды без покрытия), 2 — покрытие лаком с отвердителем полиэтиленполиамином, 3 — покрытие лаком с отвердителем МНП, 4 — покрытие клеем ЭТП.

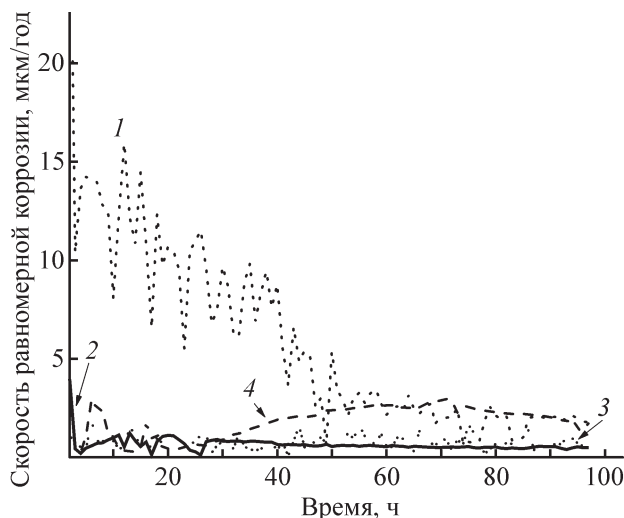


Рис. 2. Зависимость скорости равномерной коррозии электродов, изготовленных из сплава АМг-6 и покрытых отвержденными адгезивными композициями, от времени в 3.5%-ном растворе морской соли.

1 — холостой опыт (электроды без покрытия), 2 — покрытие лаком с отвердителем полиэтиленполиамином, 3 — покрытие лаком с отвердителем МНП, 4 — покрытие клеем ЭТП.

полиамином (рис. 2). Степень защиты составила 77%. Покрытия с отвердителем МНП и клеем ЭТП показали нестабильные результаты с диапазоном степеней защиты 73–97 и 28–97% соответственно, о чем свидетельствуют пилообразные профили скорости равномерной коррозии (рис. 2). Возможной причиной такого поведения двух последних покрытий является неравномерность их толщины из-за некоторой потери адгезии материалов к сплаву АМг-6 по сравнению со сталью 3, что ведет не только к прогрессированию процесса уноса металла с поверхности электрода, но и к ускорению локальной коррозии (питтингу). Практически адгезивные композиции равнозначны для ингибирования коррозии алюминиево-магниевого сплава в условиях морской коррозии.

Таким образом, формируемые покрытия на основе клея ЭТП обладают высокой адгезией по отношению к стали и алюминиевому сплаву и могут обеспечивать дополнительную защиту клеевого соединения или покрытого металла от коррозии в условиях механического воздействия.

Выводы

Метод получения адгезивных композиций путем химического модифицирования отвердителей *in situ* в композиции позволяет формировать новые материалы на основе одноупаковочного эпоксидного клея горя-

чего отверждения, содержащего алкоксид титана(IV). При этом эффективность механических свойств покрытий, таких как твердость, модуль упругости и деформация ползучести, определяются невысокой степенью сетчатости полимера, природой растворителя и аминного соотвердителя. Использование новых адгезивных композиций в качестве покрытия металлических поверхностей обеспечивает и эффективную антикоррозионную защиту в различных средах.

Финансирование работы

Измерения механических свойств выполнены в рамках работ по гранту РНФ № 19-19-00571 (в части исследования покрытия из клея ЭТП, отвержденного полиэтиленполиамином), государственного задания Института машиноведения УрО РАН с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Пластометрия», получение композиций и характеристика антикоррозионных свойств реализованы в рамках государственного задания Института органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Пестов Александр Викторович, к.х.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4270-3041>

Осипова Виктория Александровна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7451-9428>

Корякова Ольга Васильевна, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7081-8367>

Горбунова Татьяна Ивановна, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4288-1988>

Смирнов Сергей Витальевич, д.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2083-5377>

Веретенникова Ирина Андреевна, к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8371-7546>

Список литературы

- [1] Paluvai N. R., Mohanty S., Nayak S. K. Synthesis and modifications of epoxy resins and their composites: A review // Polym. Plast. Technol. Eng. 2014. V. 53. N 16. P. 1723–1758. <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.919658>

- [2] Лобанов М. В., Гуляев А. И., Бабин А. Н. Повышение ударо- и трещиностойкости эпоксидных реактопластов и композитов на их основе с помощью добавок термопластов как модификаторов // Высокомолекуляр. соединения. 2016. Т. 58Б. № 1. С. 3–15 [Lobanov M. V., Gulyaev A. I., Babin A. N. Improvement of the impact and crack resistance of epoxy thermosets and thermoset-based composites with the use of thermoplastics as modifiers // Polym. Sci. Ser. B. 2016. V. 58. N 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1134/S1560090416010048>].
- [3] Chrusciel J. J., Lesniak E. Modification of epoxy resins with functional silanes, polysiloxanes, silsesquioxanes, silica and silicates // Prog. Polym. Sci. 2015. V. 41. P. 67–121. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.08.001>
- [4] Stuparu M. C., Khan A. Thiol-epoxy «click» chemistry: Application in preparation and postpolymerization modification of polymers // J. Polym. Sci. A: Polym. Chem. 2016. V. 54. N 19. P. 3057–3070. <https://doi.org/10.1002/pola.28195>
- [5] Ding C., Matharu A. S. Recent developments on biobased curing agents: A review of their preparation and use // ACS Sustain. Chem. Eng. 2014. V. 2. N 10. P. 2217–2236. <https://doi.org/10.1021/sc500478f>
- [6] Hsiue G.-H., Wei H.-F., Shiao S.-J., Kuo W.-J., Sha Y.-A. Chemical modification of dicyclopentadiene-based epoxy resins to improve compatibility and thermal properties // Polym. Degrad. Stab. 2001. V. 73. N 2. P. 309–318. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00092-1)
- [7] Sprenger S. Epoxy resins modified with elastomers and surface-modified silica nanoparticles // Polymer. 2013. V. 54. N 18. P. 4790–4797. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.06.011>
- [8] Alam A., Wan C., McNally T. Surface amination of carbon nanoparticles for modification of epoxy resins: Plasma-treatment vs. wet-chemistry approach // Eur. Polym. J. 2017. V. 87. P. 422–448. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.10.004>
- [9] Sinh L. H., Son B. T., Nguyen N. ., Lim D.-G., Shin S., Bae J.-Y. Improvements in thermal, mechanical, and dielectric properties of epoxy resin by chemical modification with a novel amino-terminated liquid-crystalline copoly(ester amide) // React. Funct. Polym. 2012. V. 72. N 8. P. 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2012.05.004>
- [10] Ефимов А. А., Загидуллин А. И., Колпакова М. В., Гарипов Р. М., Стоянов О. В. Использование кремнийорганических соединений в качестве модификаторов эпоксидных композиций // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. № 4. С. 12–17.
- [11] Сытов В. А., Верстаков А. Е., Воронин А. Е., Сытов В. В. Современные синтетические клеи на основе эпоксикаучуковых композиций // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 9. С. 6–9
- [12] Sytov V. A., Verstakov A. E., Voronin A. E., Sytov V. V. Modern synthetic adhesives based on epoxy–rubber compositions // Polym. Sci. Ser. D. 2013. V. 6. N 2. P. 116–119. <https://doi.org/10.1134/S1995421213020147>].
- [12] Patel H., Patel B. K. Novel flame-retardant acrylated poly(ester-amide) resins based on brominated epoxy // Int. J. Polym. Mat. 2009. V. 58. N 6. P. 312–321. <https://doi.org/10.1080/00914030902859257>
- [13] Строганов В. Ф., Строганов И. В. Химическая модификация структуры и свойств эпоксидных полимеров при применении хлоранилиновых отвердителей // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 7. С. 5–9 [Stroganov V. F., Stroganov I. V. Chemical modification of the structure and properties of epoxy polymers in the application of chloraniline hardeners // Polym. Sci. Ser. D. 2016. V. 9. N 2. P. 141–144. <https://doi.org/10.1134/S1995421216020222>].
- [14] Hickey D. P., Halmes A. J., Schmidtke D. W., Glatzhofer D. T. Electrochemical characterization of glucose bioanodes based on tetramethylferrocene-modified linear poly(ethylenimine) // Electrochim. Acta. 2014. V. 149. N 1. P. 252–257. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.10.077>
- [15] Derouet D., Morvan F., Brosse J. C. Chemical modification of epoxy resins by dialkyl(or aryl) phosphates: Evaluation of fire behavior and thermal stability // J. Appl. Polym. Sci. 1996. V. 62. N 11. P. 1855–1868. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19961212\)62:11<1855::AID-APP10>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19961212)62:11<1855::AID-APP10>3.0.CO;2-Y)
- [16] Wang Y., Li H., Wang X., Lei H., Huo J. Chemical modification of starch with epoxy resin to enhance the interfacial adhesion of epoxy-based glass fiber composites // RSC Advances. 2016. V. 6. N 87. P. 84187–84193. <https://doi.org/10.1039/C6RA18347F>
- [17] Chen M.-A., Xie X., Zhang X.-M. Interactions of BTESPT silane and maleic anhydride grafted polypropylene with epoxy and application to improve adhesive durability between epoxy and aluminium sheet // Prog. Org. Coat. 2009. V. 66. N 1. P. 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.05.003>
- [18] Hu H. P., Gilbert R. D., Fornes R. E. Chemical modification of cured MY720/DDS epoxy resins using fluorinated aromatic compounds to reduce moisture sensitivity // J. Polym. Sci. A: Polym. Chem. 1987. V. 25. N 5. P. 1235–1248. <https://doi.org/10.1002/pola.1987.080250504>
- [19] Пестов А. В., Пузырев И. С., Мехеев А. В., Горбунова Т. И., Салоутин В. И., Смирнов С. В., Вичужанин Д. И., Матафонов П. П. Модифицирование адгезивных материалов на основе эпоксидных олигомеров фторсодержащими органическими соединениями // ЖПХ. 2014. Т. 87. № 4. С. 482–487. <https://doi.org/10.1134/S10704272140400132>

- [Pestov A. V., Puzyrev I. S., Mekhaev A. V., Gorbunova T. I., Saloutin V. I., Smirnov S. V., Vichuzhanin D. I., Matafonov P. P. Modification of adhesive materials based on epoxy oligomers with fluorinated organic compounds // Russ. J. Appl. Chem. 2014. V. 87. N 4. P. 474–479. <https://doi.org/10.1134/S10704272140400132>].
- [20] Суворов А. Л., Дульцева Л. Д., Овчинникова Г. И., Ятлук Ю. Г., Алехина В. Д. Свойства полимеров на основе эпоксидных смол и сложноэфирных олигомеров, содержащих титан // Пласт. массы. 1989. № 3. С. 95–96.
- [21] Пестов А. В., Кузнецов В. А., Мехеев А. В., Горбунова Т. И., Салоутин В. И., Смирнов С. В., Вичужанин Д. И., Матафонов П. П. Разработка новых адгезивных материалов на основе эпоксидных олигомеров, наполненных органическими соединениями // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 8. С. 12–14 [Pestov A. V., Kuznetsov V. A., Mekhaev A. V., Gorbunova T. I., Saloutin V. I., Smirnov S. V., Vichuzhanin D. I., Matafonov P. P. Designing new adhesive materials based on epoxy oligomers filled with organic compounds // Polym. Sci. Ser. D. 2015. V. 8. N 2. P. 149–152. <https://doi.org/10.1134/S1995421215020136>].
- [22] Суворов А. Л., Дульцева Л. Д., Овчинникова Г. И., Хрусталева Е. А., Останина Н. Ю., Абрамова В. И. Получение и изучение свойств полимеров на основе эпоксидных смол и олигохелатотитанофениленилсилоксанов // ЖПХ. 2003. Т. 76. № 11. С. 1895–1900. <https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000018697.76047.67> [Suvorov A. L., Dul'tseva L. D., Ovchinnikova G. I., Khrustaleva E. A., Ostanina N. Yu., Abramova V. I. Preparation and properties of polymers derived from epoxy resins and oligochelatotitanophenylsiloxanes // Russ. J. Appl. Chem. 2003. V. 76. N 11. P. 1844–1849. <https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000018697.76047.67>].
- [23] Горбунова Т. И., Бажин Д. Н., Запеевалов А. Я., Салоутин В. И. Ингибирующая активность фторсодержащих четвертичных аммониевых солей с N-метилпиперазинильным фрагментом // ЖПХ. 2013. Т. 86. № 7. С. 1059–1063 [Gorbunova T. I., Bazhin D. N., Zapevalov A. Ya., Saloutin V. I. Inhibitory activity of fluorine-containing quaternary ammonium salts comprising an n-methylpiperazinyl moiety // Russ. J. Appl. Chem. 2013. V. 86. N 7. P. 992–996. <https://doi.org/10.1134/S1070427213070082>].
- [24] Лунатов Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. С. 120–146.
- [25] Смирнов С. В., Веретенникова И. А., Смирнова Е. О., Пестов А. В. Оценка влияния наполнителей на механические свойства эпоксидного клеевого покрытия, определенные методом инструментального микроиндентирования // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2017. N 6. С. 103–111. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2017.6.103-111>
- [26] Постникова И. И., Синельникова Л. Н., Ятлук Ю. Г., Хрусталева Е. А., Суворов А. Л. Комплексообразование бутилортотитаната с простыми эфирами // ЖОХ. 1992. Т. 62. № 1. С. 36–38.
- [27] Федосеев М. С., Державинская Л. Ф., Карманов В. И., Бажин Д. Н., Запеевалов А. Я., Горбунова Т. И., Салоутин В. И. Синтез и свойства эпоксидангидридных полимеров, модифицированных полифторалкилсодержащими оксиранами при их отверждении // ЖПХ. 2010. Т. 83. № 4. С. 671–675. <https://doi.org/10.1134/S1070427210040270> [Fedoseev M. S., Dershavinskaya L. F., Karmanov V. I., Bazhin D. N., Zapevalov A. Ya., Gorbunova T. I., Saloutin V. I. Synthesis and properties of epoxy-anhydride polymers modified with polyfluorolalkyl-substituted oxiranes in the course of curing // Russ. J. Appl. Chem. 2010. V. 83. N 4. P. 723–727. <https://doi.org/10.1134/S1070427210040270>].
- [28] Minisini B., Rolère S., Coulon J-F., Poncin-Epaillard F. Influence of the chemical composition and formulation of fluorinated epoxy resin on its surface characteristics // Eur. Polym. J. 2019. V. 112. P. 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.01.035>