

УДК 620.197:621

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-41-46>

## РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕАКТОПЛАСТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Е. Ф. КУДИНА<sup>1,2</sup>, П. А. КУРИЦЫН<sup>1</sup>, И. В. ПРИХОДЬКО<sup>1</sup>,  
Г. Р. ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель

Получены композиции на основе функционализированной эпоксидиановой смолы. В качестве компонента для функционализации использована фенолформальдегидная смола. Методом решетчатых надрезов исследована адгезионная прочность композиционных материалов к поверхности металла. Показано, что получение агрегативно устойчивых гомогенных смесей на основе состава эпоксидиановая смола/фенолформальдегидная смола достигается при соотношениях исходных компонентов: эпоксидиановая смола (40 %)/фенолформальдегидная смола (60 %); эпоксидиановая смола (50 %)/фенолформальдегидная смола (50 %). Анализ изоляционных свойств полученных композиций осуществлен методом определения удельного объемного сопротивления. Наиболее выражено изоляционные свойства проявились в композициях с содержанием фенолформальдегидной смолы 50 %. Анализ изменения прочности композитов показал, что оптимальная концентрация фенолформальдегидной смолы в образце, позволяющая увеличить ударную вязкость композита на 20 %, составляет 50 %. В композициях с составом эпоксидиановая смола (40 %)/фенолформальдегидная смола (60 %) и эпоксидиановая смола (60 %)/фенолформальдегидная смола (40 %) установлено снижение ударной вязкости на 28 и 39 % соответственно в сравнении с исходным реактопластом.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, реактопласты, функционализация, адгезионная прочность, удельное объемное сопротивление, ударная вязкость.

**Для цитирования.** Разработка композиционных материалов на основе реактопластов для защиты высоковольтных выпрямительных установок / Е. Ф. Кудина [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 2 (97). – С. 41–46. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-41-46>

## DEVELOPMENT OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON THERMOSETS FOR THE PROTECTION OF HIGH-VOLTAGE RECTIFIER UNITS

E. F. KUDINA<sup>1,2</sup>, P. A. KURITSYN<sup>1</sup>, I. V. PRIHODKO<sup>1</sup>,  
G. R. GONCHAROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel

<sup>2</sup>State Scientific Institution “V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus”, Gomel

Compositions based on functionalized epoxy resin were obtained. Phenol-formaldehyde resin was used as a component for functionalization. The adhesive strength of composite materials to the metal surface was studied us-

ing the cross-cut test. It has been shown that the production of aggregation-stable homogeneous mixtures based on the composition epoxy resin/phenol-formaldehyde resin is achieved at the ratios of the initial components: epoxy resin (40 %)/phenol-formaldehyde resin (60 %); epoxy resin (50 %)/phenol formaldehyde resin (50 %). The analysis of the insulating properties of the resulting compositions was carried out by determining the volumetric resistivity. The most pronounced insulating properties were manifested in compositions containing 50 % phenol-formaldehyde resin. An analysis of changes in the strength of the composites showed that 50 % is the optimal concentration of phenol-formaldehyde resin in the sample, which allows to increase the impact strength of the composite by 20 %. Compositions containing epoxy resin (40%)/phenol-formaldehyde resin (60 %) and epoxy resin (60 %)/phenol-formaldehyde resin (40 %) showed a decrease in impact strength of 28 and 39 % respectively, in comparison with the original thermoset.

**Keywords:** composite materials, thermosets, functionalization, adhesion strength, specific resistance, impact strength.

**For citation.** Kudina E. F., Kuritsyn P. A., Prihodko I. V., Goncharov G. R. Development of composite materials based on thermosets for the protection of high-voltage rectifier units. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 2 (97), pp. 41–46 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-2-41-46>

### Введение

Широкий спектр требований, предъявляемых к электротехническим изделиям, используемым на железнодорожном транспорте, обуславливает необходимость разработки композиционных материалов, обеспечивающих их стойкость к воздействию внешних факторов (вибрация, удары, температура), отличающихся улучшенными эксплуатационными и механическими свойствами. Одним из направлений решения отмеченной задачи является применение функциональных материалов на основе эпоксидиановых смол (ЭС). Они в отличие от других смол (фенольных, полиэфирных, акриловых) наделены уникальными свойствами, такими как малая усадка, высокие значения адгезионной и когезионной прочности, химическая стойкость к действию различных агрессивных сред, атмосферостойкость, достаточно высокие физико-механические показатели, хорошая окрашиваемость и совмещаемость с другими полимерами, а также характеризуются отсутствием при отверждении летучих веществ и обладают способностью отверждаться в широком интервале температур в слоях любой толщины [1–4]. Однако, несмотря на перечисленные достоинства композиционных материалов, получаемых на основе ЭС, их существенным недостатком является хрупкость [5, 6]. Эффективность же применения материала для изоляции высоковольтных компонентов железнодорожного подвижного состава определяется его высокими диэлектрическими свойствами и устойчивостью к воздействию механических нагрузок, возникающих под воздействием вибрации.

**Цель данной работы** – разработка композиционных материалов на основе функционализированной ЭС и оценка возможности их применения в качестве защитных и изоляционных покрытий для высоковольтных выпрямительных установок, используемых на железнодорожном транспорте.

### Объекты исследования

Объектом исследования являлись композиции на основе ЭС марки ЭД-20 (ГОСТ 10587–84). В качестве компонента для функционализации ЭС использована фенолформальдегидная смола (ФФС) (ГОСТ 5962–2013), смешанная в соотношении 1 : 1 с этиловым спиртом до получения однородного состава. Для получения композиций на основе ЭС в реактопласт вводили смесь ФФС/этанол в количестве, обеспечивающем концентрацию ФФС в композиции 40, 50, 60 %. Блочные материалы и покрытия на основе составов ЭС/ФФС сформированы без введения отвердителя при термообработке в климатической камере с постепенным увеличением температуры от 22 до 70 °С в течение 4 ч и последующей выдержке образцов в течение 12 ч.

### Методология исследования

Адгезионная прочность исследуемых композиционных материалов определялась в соответствии с ГОСТ 31149–2014 [7] методом решетчатых надрезов. Для оценки адгезионной прочности полученные составы наносились на металлические пластины из стали марки 30ХМЛ размером  $150 \times 100$  мм. Перед нанесением покрытия пластины подвергали механической обработке и обезжириванию. Толщина формируемого покрытия составила 1,1 мм. В качестве результата испытания принимали значение адгезии в баллах, соответствующее большинству совпадающих значений по классификации, представленной в ГОСТ 31149–2014 [7].

Оценка удельного объемного электрического сопротивления осуществлялась по методике ГОСТ 6433.2–71 [8] с помощью измерителя параметров электроизоляции МЭС-2510. При определении удельного объемного сопротивления использовались металлические нажимные электроды из латуни. Величина испытательного напряжения составила 1000 В, время выдержки образцов под напряжением – 1 мин. Для исследования влияния роста температуры на диэлектрические свойства полученных композиций использовалась климатическая камера СМ-70/100-250 ТВХ.

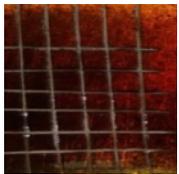
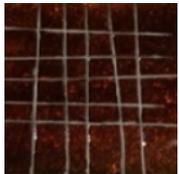
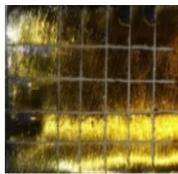
Ударная вязкость определялась по методике, изложенной в ГОСТ Р 57948–2017 [9], на маятниковом копре типа Kason JBW-300. Оценка сопротивления полученных композиционных материалов ударному воздействию осуществлялась на пяти образцах каждого типа с размерами  $12,8 \times 60,5 \times 3,3$  мм (Т × Д × Ш). К средней величине ударной вязкости приведены значения образцов с одинаковой номинальной толщиной, шириной и типом разрушения.

### Результаты исследования и их анализ

Экспериментально установлено, что получение агрегативно устойчивых гомогенных смесей на основе состава ЭС/ФФС достигается при следующих соотношениях исходных компонентов: ЭС (40 %)/ФФС (60 %); ЭС (50 %)/ФФС (50 %); ЭС (60 %)/ФФС (40 %). Анализ полученных образцов показал, что оптимизация концентрационных соотношений компонентов в бинарных смесях позволила получить более эластичные материалы, чем на основе исходного реактопласта.

**Адгезионные свойства.** В таблице представлены результаты оценки адгезионной прочности покрытий на основе функционализированной ЭС к металлической поверхности в зависимости от концентрационных соотношений компонентов. Экспериментально установлено, что при нанесении надрезов на образцах бинарных покрытий на основе ЭС материалы покрытия не отслаиваются и не крошатся. Отмеченные результаты свидетельствуют о том, что функционализация ЭС за счет введения ФФС в заданных соотношениях приводит к улучшению качества, укрывистости и повышению адгезионной прочности покрытия.

#### Определение адгезионной прочности покрытий на основе эпоксидиановых смол

Свойства	Состав, %			
	ЭС (100)	ЭС (40)/ ФФС (60)	ЭС (50)/ ФФС (50)	ЭС (60)/ ФФС (40)
Адгезия, баллы	4	0	0	1
Поверхность покрытия после испытания методом решетчатых надрезов				

**Изоляционные свойства.** В результате анализа изоляционных свойств рассматриваемых материалов методом определения удельного объемного сопротивления в диапазоне температур от 22 до 90 °С (рис. 1) определено, что наибольшим сопротивлением обладает образец с содержанием исходных компонентов ЭС (60 %) / ФФС (40 %). По-видимому, это достигается за счет формирования наиболее однородной пространственной структуры полимерной матрицы, образующейся в процессе отверждения.

Кроме этого, в ходе исследования зафиксировано снижение удельного объемного сопротивления композиций с ростом температуры (рис. 1). Однако полученные значения сопротивления удовлетворяют условиям работы высоковольтных выпрямительных установок на железнодорожном транспорте.

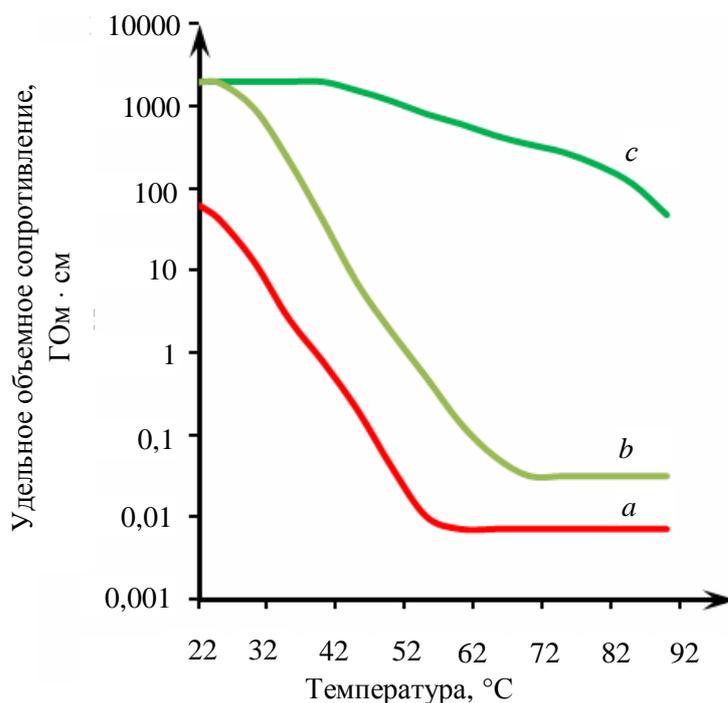


Рис. 1. Диаграмма зависимости удельного объемного сопротивления композиции от температуры:  
a – ЭС (40 %)/ФФС (60 %); b – ЭС (50 %)/ФФС (50 %);  
c – ЭС (60 %)/ФФС (40 %)

**Механические свойства.** В процессе анализа диаграммы зависимости ударной вязкости от концентрации ФФС в исследуемых образцах (рис. 2) отмечено, что ударно-прочные свойства наиболее явно выражены в композициях с содержанием ФФС в количестве 50 %. Возможно это обусловлено тем, что в отмеченной концентрационной области функционализирующий компонент создает более частый армирующий каркас, обеспечивающий монолитизацию матрицы и повышение ее прочности. Таким образом, при разработке композиционного материала на основе ЭС важно учитывать влияние армирующего компонента на морфологию органической матрицы.

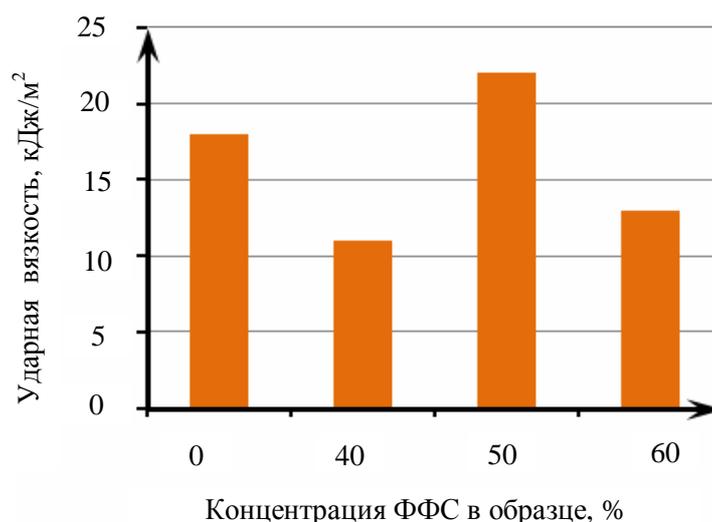


Рис. 2. Диаграмма зависимости ударной вязкости от концентрации фенолформальдегидной смолы в образцах

### Заключение

Проведенные исследования показали, что совершенствование физико-механических свойств композиционных материалов на основе эпоксидиановой смолы может быть достигнуто применением олигомера фенолоформальдегидной смолы в качестве реагента для функционализации. Введение в состав покрытия ФФС приводит к улучшению качества, изоляционных и механических свойств композиций на основе ЭС, а также к повышению прочности адгезии органического покрытия к поверхности стали. Установленные в процессе испытаний закономерности позволили получить multifunctional материалы с улучшенными в сравнении с исходным реактопластом эпоксидиановой смолы эксплуатационными свойствами, которые могут использоваться в качестве изоляционных и защитных покрытий металлических поверхностей для высоковольтных выпрямительных установок, работающих на железнодорожном транспорте.

*Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 4.1.16 «Разработка функциональных композиционных материалов технического назначения для защиты металлических поверхностей и оборудования» (2021–2025 гг.).*

### Литература

1. Бобылев, В. А. Современное производство эпоксидных смол. Диановые и специальные смолы на основе бисфенола и его производных / В. А. Бобылев // Композитный мир. – 2006. – № 5. – С. 10–14.
2. Воробьев, А. Эпоксидные смолы / А. Воробьев // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8. – С. 170–173.
3. Связующие для стеклопластиков / под ред. Н. В. Королькова. – М. : Химия, 1975. – 159 с.
4. Чернин, И. З. Эпоксидные полимеры и композиции / И. З. Чернин, Ф. М. Смехов, Ю. В. Жердев. – М. : Химия, 1982. – 230 с.
5. Кудина Е. Ф. Защита газо-нефтепроводов от внешних повреждений. Ч. 1. Полимерные материалы (обзор) // Нефтяник Полесья. – 2013. – № 2. – С. 88–93.
6. Kudina, N. F. Composite Materials Intended to Repair Mechanochemical Defects in

- Pipelines / H. F. Kudina, S. N. Bukharov, V. P. Sergienko // In: *Advances in Engineering Research* / ed. by V. M. Petrova. – Vol. 26. – New York, 2019. – Chap. 3. – P. 107–172.
7. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза : ГОСТ 31149–2014 (ISO 2409 : 2013). – Введ. 01.10.16. – Минск : Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 2016. – 16 с.
  8. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении : ГОСТ 6433.2–71. – Взамен ГОСТ 6433–65 (в части определения электрических сопротивлений) ; введ. 17.12.92. – Минск : Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 2023. – 24 с.
  9. Композиты полимерные. Метод определения ударной вязкости образцов без надреза : ГОСТ Р 57948–2017. – Введ. 01.06.18. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2018. – 28 с.

### References

1. Bobylev V. A. Modern production of epoxy resins. Diane and special resins based on bisphenol and its derivatives. *Compositny mir = Composite World*, 2006, no. 5, pp. 10–14 (in Russian).
2. Vorobyov A. Epoxy resins. *Componenty i technologii = Components and technologies*, 2003, no. 8, pp. 170–173 (in Russian).
3. Ed. Korolkov N. V. Binders for fiberglass. Moscow, Khimiya Publ., 1975. 59 p. (in Russian).
4. Chernin I. Z., Smekhov F. M., Zherdev Yu. V. Epoxy polymers and compositions. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 230 p. (in Russian).
5. Kudina E. F. Protection of gas and oil pipelines from external damage. Part 1. *Neftyanik poles'ya*, 2013, vol. 2, no. 24, pp. 88–93 (in Russian).
6. Kudina H. F., Bukharov S. N., Sergienko V. P. Composite materials intended to repair mechanochemical defects in pipelines. *Advances in Engineering Research*, 2019, vol. 26, chap. 3, pp. 107–172.
7. State Standard 31149–2014 (ISO 2409:2013). *Paint and varnish materials. Determination of adhesion by the lattice notch method*. Minsk, Gosudarstvennyi komitet po standartizatsii Respubliki Belarus' Publ., 2016. 16 p. (in Russian).
8. State Standard 6433.2–71. *Materials of electrically insulating solid. Methods of determination of electrical resistance at constant voltage*. Minsk, Gosudarstvennyi komitet po standartizatsii Respubliki Belarus' Publ., 2023. 24 p. (in Russian).
9. State Standard 57948–2017. *Polymer composites. Method for determination of impact toughness of uncut specimens*. Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2018. 28 p. (in Russian).

Поступила 23.05.2024