

## Исследование комплекса функциональных свойств фенопластовых композитов с использованием дисперсно-волокнутого наполнителя

### Study of a complex of functional properties of phenolic composites using a dispersed fibrous filler

*Е.В. ГУСЕВ<sup>1</sup>, Н.А. НАБОЙЩИКОВА<sup>2</sup>, Т.А. АГЕЕВА<sup>2</sup>*

*E.V. GUSEV<sup>1</sup>, N.A. NABOYSHCHIKOVA<sup>2</sup>, T.A. AGEeva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», Иваново, Россия

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russia

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo State University of Chemical Technology", Ivanovo, Russia  
gusev\_pcm@mail.ru

В статье приведены результаты исследований основных физико-механических, трибологических и электротехнических свойств композиционных термореактивных полимерных материалов оптимального состава на основе твердых резольных фенолоформальдегидных смол и дисперсно-волокнутого наполнителя, полученного механической переработкой целлюлозных отходов фибрового производства целлюлозно-бумажной промышленности. Приведены физико-механические (плотность, пределы прочности при растяжении и изгибе, ударная вязкость, степень поглощения по влаге и минеральному маслу), трибологические показатели (интенсивность и стабильность изнашивания, и коэффициенты трения в зоне контакта пары трения при различных статически-динамических и тепловых нагрузках), электротехнические характеристики (удельное объемное сопротивление, электрическая прочность) и краткий анализ структурных изменений исследуемых фенопластовых композитов, а также рекомендации по их применению в качестве технических изделий машиностроительного и общего электротехнического назначения.

**Ключевые слова:** смола, наполнитель, композит, состав, фенопласт, физико-механические свойства, нагрузка, температура, трение, износостойкость, твердость, теплостойкость, удельное сопротивление, электрическая прочность

The article presents the results of studies of basic physical, mechanical, tribological and electrotechnical properties of composite thermosetting polymeric materials having optimal composition based on solid resin phenol formaldehyde resins and dispersed fibrous filler obtained by mechanical recycling of cellulose fibrous waste products of pulp and paper industry. Physical and mechanical properties (density, tensile and bending strengths, impact strength, degree of absorption for moisture and mineral oil), tribological indicators (wear intensity and stability, friction coefficients in the contact zone of a friction pair under various static-dynamic and thermal loads), electrical characteristics (volume resistivity, electrical strength) and a brief analysis of structural changes in the studied phenolic composites, as well as recommendations for their use as technical products for machine-building and general electrical purposes are presented.

**Keywords:** resin, filler, composite, composition, phenolic plastic, physical and mechanical properties, load, temperature, friction, wear resistance, hardness, heat resistance, resistivity, electrical strength

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-1-2-14-16

#### Введение

Широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) во многих отраслях промышленности обусловлено разнообразием их эксплуатационно-технических свойств, определяющих функциональное назначение изделий [1–3]. Одним из актуальных направлений целесообразности применения фенопластовых композиционных материалов (ФКМ) в машиностроительной и электротехнической областях является создание композитов с требуемым комплексом физико-механических, трибологических и электротехнических свойств, обеспечивающих необходимую работоспособность технологического оборудования при различных режимах эксплуатации [4–6].

Однако экспериментальные данные по физико-механическим свойствам полимерных композитов (ПК), полученные в результате статических испытаний в нормальных условиях, ограничивают спектр областей их целесообразного применения. Требуется находить возможные направления применения разработанных ФКМ путем их испытания в реальных условиях эксплуатации. В ряде

работ установлено, что для многих ПКМ характерна способность быть износостойкими и теплостойкими при воздействии статических и динамических нагрузок и иметь хорошие трибологические и электротехнические характеристики [4–13].

В связи с этим целью исследования являлась оценка теплостойкости, трибо- и электротехнических свойств разработанных композитов на основе твердых резольных фенолоформальдегидных смол и модифицированных волокнутистых органических отходов фибрового производства целлюлозно-бумажной промышленности.

#### Объект и методика исследований

Объектами исследования являются полимерные композиции с оптимальной 40–50%-й наполненностью волокнутистым дисперсным наполнителем (ВДН), полученные методом прямого термопрессования при технологических параметрах: температура 170°C, удельное давление 20 МПа, время выдержки 1 минута на 1 мм толщины изделия. Составы фенопластовых композиционных материалов (ФКМ) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составы (% , масс.) ФКМ на смолах СФ-342 и СФ-010.

| ВДН   | Смола СФ342 | Смола СФ010 | Уро-тропин | Као-лин | CaO | MgO | Стеарат кальция |
|-------|-------------|-------------|------------|---------|-----|-----|-----------------|
| 40–50 | 51–41       | –           | –          | 4,4     | –   | 0,9 | 1,2             |
| 40–50 | –           | 47–37       | 6,8        | 4,4     | 0,9 | –   | 0,9             |

Ранее проведенные статические исследования образцов ФКМ по определению физико-механических свойств (предел прочности при растяжении  $\sigma_p$  и изгибе  $\sigma_{из}$ , ударная вязкость  $a_n$ , степень поглощения по влаге  $\varepsilon_w$  и по минеральному маслу  $\varepsilon_m$ ) в зависимости от степени наполняемости и технологических параметров термического прессования позволили определить оптимальные составы композитов (табл. 1) и их физико-прочностные характеристики (табл. 2) [12].

Таблица 2. Физико-механические свойств композитов.

| Смола | ВДН, % | $\sigma_p$ , МПа | $\sigma_{из}$ , МПа | $a_n$ , кДж/м <sup>2</sup> | $\varepsilon_w$ , % | $\varepsilon_m$ , % |
|-------|--------|------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| СФ342 | 40–50  | 5,7–5,9          | 54,1                | 11,3                       | 0,4–0,6             | 0,17–0,21           |
| СФ010 | 40–50  | 6,0–6,2          | 48,5                | 13,1                       | 0,5–1,0             | 0,18–0,24           |

Полученные фенопластовые образцы на рекомендуемых составах (табл. 1) отличаются повышенными показаниями удельной ударной вязкости (табл. 2) по сравнению с техническими изделиями общего назначения в 2–3 раза, что позволяет их рекомендовать для производства изделий химического машиностроения, воспринимающих ударные динамические нагрузки [12]. В связи с этим были проведены триботехнические испытания образцов с 40 и 50% наполнением ВДН на изнашивание на машине трения 2070 СМТ-1 при следующих условиях: пара трения – диск-колотка, материал диска – чугун СЧ18-36, колотка – полимерный композиционный материал, линейная скорость скольжения 3 м/с, удельная нагрузка в интервале 2–6 МПа повышалась ступенчато до резкого повышения момента трения. Интенсивность изнашивания оценивалась по потере массы образцов в единицу времени в интервале температур 50–150°C в зоне контакта пары трения. Коэффициент трения рассчитывался по величине измеряемого момента трения в процессе испытания образцов. В качестве характеристики изнашивания применялась стабильность износа, которую следует понимать как отношение минимального коэффициента трения к его максимальному значению за время испытаний. Измерение твердости исследуемых образцов производилось по методам Бринелля и Роквелла.

Электротехнические свойства (удельное объемное сопротивление  $\rho_v$ , электрическая прочность  $E_{пр}$ ) определялись экспериментально с помощью приборов, предусмотренных нормативными документами (ГОСТ 6433.2-71 и ГОСТ 6433.3-71) на промышленном предприятии. Для проведения испытаний в качестве образцов использовались фенопластовые плиты размером 120×140 мм различной толщины из разработанных составов (табл. 1), полученные прямым термпрессованием при рассмотренных выше условиях.

Для установления характера взаимодействия структурообразующих компонентов ФКМ проводились микроскопические исследования структуры отвержденных полимерных фенопластовых композитов до и после механического обнажения их поверхности методом оптической микроскопии.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования средних трибологических свойств фенопластовых композитов средней плотностью около 1400 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от приложенной нагрузки и фиксированных предельных температур в узле трения приведены в табл. 3.

Интенсивность изнашивания в узле трения для приведенных составов с учетом наполняемости полимерного композита (табл. 1) в среднем составила: при 40% ВДН – 0,2 мм/ч (18,3 мкм/км); при 50% ВДН – 0,18 мм/ч (17,1 мкм/км).

Таблица 3. Трибологические свойства композитов.

| Параметр            | Удельная нагрузка, МПа |      |       | Температура, °C |      |       |
|---------------------|------------------------|------|-------|-----------------|------|-------|
|                     | 2                      | 4    | 6     | 50              | 100  | 150   |
| Коэффициент трения  | 0,39                   | 0,37 | 0,365 | 0,38            | 0,36 | 0,355 |
| Стабильность износа | 0,886                  | 0,95 | 0,96  | 0,87            | 0,89 | 0,91  |

Полученные стабильные данные триботехнических характеристик можно объяснить в основном образованием на поверхностях трения пленок фрикционного переноса, способствующего уменьшению удельного поверхностного сопротивления и, как следствие, снижению коэффициентов трения (табл. 3). Сравнительный анализ показал, что большинство полимерных композитов имеют оптимальные значения коэффициентов трения в интервале 0,33–0,45 [13–16]. Отклонения к меньшим значениям приводят к более резкому увеличению тормозного пути, а к большим величинам – способствуют повышению интенсивности изнашивания. Следует отметить, что стабильность коэффициента трения исследуемого ФКМ превышает данную характеристику (не более 0,75) в сравнении с традиционными фрикционными изделиями [17].

Проведенные трибологические испытания показали стабильную выносливость и теплостойкость образцов по нагрузочно-скоростной способности и температуру в зоне контакта пары трения (табл. 3). Для большинства фенопластовых композитов технического назначения предельная теплостойкость не превышает 130–140°C [18].

Измерения твердости исследуемого материала показали следующие результаты: по Бринеллю 116 НВ (диаметр отпечатка 5,5 мм), по Роквеллу 65–68 HRB, которые превышают твердость фенопластов (плотностью свыше 1400 кг/м<sup>3</sup>), имеющих показания твердости по Бринеллю не более 60 НВ, и соизмеримы с данными для относительно мягких материалов (бронза, алюминиевые сплавы по Роквеллу HRB 70–75).

Результаты трибологических испытаний и испытаний на твердость предложенных составов ФКМ дают основание предположить возможность использования полученных полимерных композитов в качестве фрикционных материалов.

Полученные образцы ФКМ приведенного состава (табл. 1) были протестированы на основные эксплуатационные электротехнические свойства: электрическую прочность и удельное объемное сопротивление.

Результаты исследований на электрическую прочность (отношение пробивного напряжения к толщине образца) полученных фенопластовых образцов приведены на рис. 1.

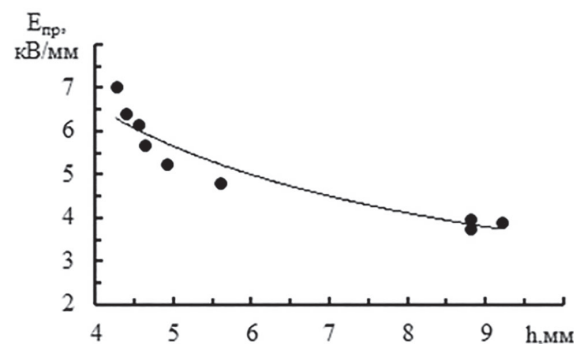


Рис. 1. Изменение электрической прочности по толщине образца композита.

Из приведенной закономерности видно, что с увеличением толщины образца электрическая прочность уменьшается, т.е. снижается пробивное напряжение исследуемого материала.

Проведенные испытания по определению среднего значения удельного объемного сопротивления ( $\rho_v$ ) фенопластовых образцов в интервале изменения их толщины  $h = 0,46–0,56$  см показали, что его значение составило  $\rho_v = 1,6 \cdot 10^{11} – 4,2 \cdot 10^{11}$  Ом·см, что даёт возможность отнести исследуемый композит к диэлектрическим материалам [19–20].

Сравнительный анализ полученных электротехнических свойств фенопластовых образцов показал их соответствие для композиционных материалов на основе фенолоформальдегидных смол и волокнистых органо-минеральных наполнителей (асбест, древесная мука), для которых электрическая прочность находится в интервале 2–10 кВ/мм, а удельное объемное сопротивление составляет  $1 \cdot 10^{10}–5 \cdot 10^{12}$  Ом·см [20–21].

Микроскопические исследования структуры отвержденных ФКМ позволили оценить по микроскопическому изображению (рис. 2) характер взаимодействия структурообразующих компонентов в объеме композита до и после механического обнажения (изнашивания).

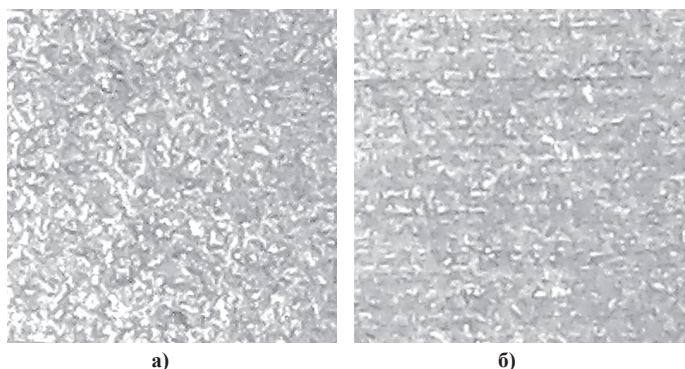


Рис. 2. Структурное изображение поверхности образцов ФКМ до (а) и после (б) механического обнажения (изнашивания).

Представленные изображения (рис. 2) микрогеометрической поверхности композитов до и после обнажения показывают, что их структура характеризуется тесным взаимодействием матрицы и наполнителя, кристаллизацией полимера на поверхности волокон, формированием развитой плотной рельефной поверхности, отсутствием воздушных включений. Данные микроскопического анализа дают основание предположить хорошую смачиваемость дисперсно-волоконистых наполнителей полимерным связующим и тесное их взаимодействие при механическом изнашивании.

#### Выводы

Технические преимущества разработанных составов фенопластового материала, по сравнению с аналогами, характеризуются стабильными оптимальными значениями коэффициента трения и низкой интенсивностью изнашивания при более высокой твердости, теплостойкости и стабильности при воздействии статических, динамических и тепловых нагрузок, которые в сочетании с представленными физико-механическими свойствами позволяют полимерному композиту как фрикционному материалу повысить надежность и ресурс работоспособности в узлах трения машин.

Полученные данные по электротехническим свойствам разработанных фенопластовых композиционных материалов свидетельствуют о целесообразности и перспективности их применения в производстве электротехнических изделий общетехнического назначения.

#### Литература

- Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение. – Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. №5–1. С. 245–256. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12252>.
- Ершова О.В., Ивановский С.К., Чупрова Л.В., Бахаева А.Н. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы. – Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. №4-1. С. 14–18. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6573>.
- Алиева А.П. Композиционные материалы на основе фенолформальдегидных смол. – Промышленное производство и использование эластомеров. 2021. №1. с. 34–43. DOI: 10.24412/2071-8268-2021-1-34-43.
- Назаров Г.И., Сушкин В.В. Теплостойкие пластмассы: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 208 с.
- Альшиц И.Я., Благов Б.Н. Проектирование деталей из пластмасс: Справочник. М.: Машиностроение, 1977. 215 с.
- Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г., Иванова З.С. Разработка антифрикционных материалов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами. – Вестник СВФУ, № 3(59), 2017. Технические науки. С. 39–47.
- Воробьев А.А., Кулик В.И., Нилов А.С., Жуков Д.А. Анализ фрикционных материалов тормозных колодок в парах трения с тормозными дисками из керамического композита SiC-матрицей для высоконагруженного железнодорожного транспорта. – Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 378–386. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-378-386
- Застрогина О.Б., Синяков С.Д., Серкова Е.А. Материалы на основе фенолформальдегидных олигомеров резольного и новолачного типов. – ТРУДЫ ВИАМ 2021, № 11 (105) С. 55–65. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-55-65.
- Кадыкова Ю.А. Полимерный композиционный материал конструкционного назначения, армированный базальтовым волокном. – Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85, №9. С. 1523–1527.
- Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб: Научные основы и технологии. 2013. 752 с.
- Крыжановский В.К. Пластмассовые детали технических устройств. СПб: Научные основы и технологии. 2013. 456 с.
- Гусев Е.В., Набойщикова Н.А., Агеева Т.А. Технологические предпосылки получения композиционного материала на основе твердых синтетических смол и волокнистого наполнителя. – Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т.65. Вып. 6. С. 58–63. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6553.
- Охлопкова А.А., Васильев С.В., Гоголева О.В. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и базальтового волокна. Электронный научный журнал. Нефтегазовое дело. 2011. № 6. С. 404–410.
- Кахраманов Н.Т., Касумова Г.Ш., Осипчик В.С., Гаджиева Р.Ш. Износостойкие полимерные материалы. Структура и свойства. – Пластические массы. 2017. №11–12. с. 8–15. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-11-12-8-15.
- Клабукова Л.Ф., Панова М.О., Краснов А.П., Рахимова Н.А., Соловьева В.А., Буяев Д.И., Колыбанов К.Ю. Исследование трибологических свойств фенолформальдегидных текстолитов, модифицированных минеральными дисперсными добавками. – Пластические массы. 2020. №11–12. с. 20–22. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-20-22
- Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и техника, 1976. 432 с.
- Скутнев В.М. Тормозные системы легковых автомобилей. Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1983. С. 81.
- Сабадаха Е.Н., Прохончук Н.Р., Шутова А.Л., Гроба А.И. Термостабильные композиционные материалы. – Труды Белорусского государственного технологического университета. 2017. №2. Серия 2. С. 108–115.
- Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. Пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
- Рагушина М.Д., Евсеева К.А., Калугина Е.В., Ушакова О.Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами. – Пластические массы. 2021. №3–4. с. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9.
- Кальнесон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы: свойства и применение: Справочник. СПб.: Химия. 1978. 384 с.