

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 673.7

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2199>

Создание изоляционных материалов из ненасыщенного полиэфира и переработанной шинной резины

И.Р. Антибас , Т.П. Савостина 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ Imad.antypas@mail.ru

EDN: RAQDMY

Аннотация

Введение. Утилизация автомобильных шин обычно предполагает их складирование, захоронение или сжигание. Как следствие, загрязняются почва и атмосфера. Ученые давно и активно обсуждают переработку шинной резины как один из подходов к решению экологических проблем. Известно, что использование резиновой крошки в композитах позволяет снизить их массу и теплопроводность. Однако мало изучены материалы с резиноотходами на основе ненасыщенного полиэфира. Есть противоречия в оценке их механических и теплоизоляционных свойств. Кроме того, неизвестно оптимальное содержание резины в композите. Представленная работа восполняет эти пробелы. Цели исследования: создание и анализ новых материалов из ненасыщенного полиэфира с обоснованием необходимой доли резиноотходов.

Материалы и методы. При обработке шинной резины провели многоступенчатое измельчение, магнитную и воздушную сепарацию. Получили порошок плотностью 500 кг/м³. Минимальная фракция — 0,1 мм, максимальная — до 1 мм. База композита — ненасыщенный полиэфир плотностью 1160 кг/м³. Для изготовления образцов к нему добавляли 0, 10, 20, 30, 40 и 50 % резинового наполнителя. Стабильной геометрии добивались отверждением при комнатной температуре и механической обработкой. Для каждого состава изготовили по три образца площадью 0,021 м² и толщиной 0,01 м.

Результаты исследования. Показана зависимость плотности, водопоглощения и теплопроводности образцов от объема переработанной шинной резины. С увеличением ее доли фиксируется заметное снижение плотности: при 0 % — 1160 кг/м³; при 10 % — 1074,3; при 20 % — 1037,2; при 30 % — 1017,8; при 40 % — 963,7; при 50 % — 905. Динамику водопоглощения определяли по весу образцов после пребывания в воде. Для изменений (причем несущественных) потребовалось более 8 часов. Показатель в процентном отношении растет с 0,024 до 0,47 %, то есть абсолютный максимум <0,5 %. С увеличением доли резины снижается теплопроводность. Показатель для чистого полиэфира — 0,254854 Вт/(м · К); для композита с 10 % резины — 0,2510574; с 20 % — 0,245156; с 30 % — 0,238484; с 40 % — 0,223,062; с 50 % — 0,207039. Все образцы выдержали нагрузку 1300 кН.

Обсуждение. При добавлении в ненасыщенный полиэфир 50 % резины плотность образца снижается на 22 %, коэффициент теплопроводности — на 19 %, а водопоглощение не превышает 0,5 %. Значит, композит будет хорошим изолирующим материалом даже при повышенной влажности. Высокая прочность на сжатие (>61,83 МПа) позволяет использовать его в конструкциях, испытывающих серьезные нагрузки. Варьирование содержания резины даст оптимальный баланс механических свойств и влагостойкости.

Заключение. Предложено решение для экологичной утилизации шин и создания качественных изоляционных материалов. В перспективе можно изучить более крупные частицы резины (от 1 мм) в композите, звукоизоляционный потенциал таких материалов, их стойкость к огню и химическим веществам.

Ключевые слова: переработка автомобильных шин, ненасыщенный полиэфир, свойства композита из полиэфира и резины, материалы с низким водопоглощением

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории композиционных материалов механического факультета Университета Алеппо за техническую поддержку при проведении экспериментов.

Для цитирования. Антибас И.Р., Савостина Т.П. Создание изоляционных материалов из ненасыщенного полиэфира и переработанной шинной резины. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(1):2199. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2199>

Creating Insulation Materials from Unsaturated Polyester and Recycled Tire Rubber

Imad R. Antypas  , Tatyana P. Savostina 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 Imad.antypas@mail.ru

Abstract

Introduction. The disposal of automotive tires typically involves landfilling, stockpiling, or incineration. As a result, this causes soil and atmospheric pollution. Scientists have long and actively discussed the recycling of tire rubber as one of the approaches to solving environmental problems. It is known that the use of rubber crumb in composites can reduce their weight and thermal conductivity. However, materials based on unsaturated polyester containing rubber waste have been insufficiently studied. There are contradictions in the assessment of their mechanical and thermal insulation properties. Moreover, the optimal rubber content in the composite is unknown. The presented work addresses these gaps. The research objectives include the development and analysis of new materials based on unsaturated polyester with justification for the required proportion of rubber waste.

Materials and Methods. During the processing of tire rubber, a multistage grinding process was carried out, followed by magnetic and air separation. A powder with a density of 500 kg/m³ was obtained. The minimum particle size was 0.1 mm, and the maximum was up to 1 mm. The composite matrix was unsaturated polyester with a density of 1160 kg/m³. To fabricate the specimens, 0, 10, 20, 30, 40, and 50% rubber filler were added to it. Stable geometry was achieved through curing at room temperature and subsequent mechanical processing. For each composition, three specimens with an area of 0.021 m² and a thickness of 0.01 m were produced.

Results. The dependence of density, water absorption, and thermal conductivity of the samples on the volume of recycled tire rubber was shown. As its proportion increased, a noticeable decrease in density was recorded: at 0% — 1160 kg/m³; at 10% — 1074.3; at 20% — 1037.2; at 30% — 1017.8; at 40% — 963.7; at 50% — 905. Water absorption dynamics were determined by the weight of the samples after immersion in water. It took more than 8 hours for changes (even minor ones) to occur. The indicator in percentage terms increased from 0.024% to 0.47%, meaning the absolute maximum was <0.5%. As the rubber content increased, thermal conductivity decreased. The value for pure polyester was 0.254854 W/(m·K); for the composite with 10% rubber — 0.2510574; with 20% — 0.245156; with 30% — 0.238484; with 40% — 0.223062; with 50% — 0.207039. All samples withstood a load of 1300 kN.

Discussion. The incorporation of 50% rubber into unsaturated polyester results in a 22% reduction in sample density and a 19% decrease in thermal conductivity, with water absorption remaining under 0.5%. These properties suggest the suitability of the composite as an efficient insulation material, even in environments with elevated humidity. Its high compressive strength (>61.83 MPa) allows for its use in structures subjected to significant loads. Varying the rubber content will provide an optimal balance between mechanical properties and moisture resistance.

Conclusion. This work presents an approach for the sustainable recycling of tires to produce effective insulation materials. Promising directions for future study include investigating composites with larger rubber particles (>1 mm), evaluating their acoustic insulation properties, and assessing their fire resistance and chemical stability.

Keywords: tire recycling, unsaturated polyester, properties of polyester-rubber composites, low-absorption materials

Acknowledgements. The authors would like to thank the team of the Composite Materials Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Aleppo University, for their technical assistance in conducting the experiments.

For Citation. Antypas IR, Savostina TP. Creating Insulation Materials from Unsaturated Polyester and Recycled Tire Rubber. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(1):2199. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2199>

Введение. Накопление отходов автомобильных шин — глобальная экологическая проблема. Согласно [1], в мире ежегодно производится около 1,5 млрд шин, утилизируется более 17 млн тонн [1]. Ожидается, что к 2030 году количество отработанных шин достигнет 1,2 млрд штук. Сейчас значительную часть ненужных шин направляют на захоронение. Как следствие:

- повышаются риски пожаров и загрязнения окружающей среды;
- усугубляется дефицит дешевых изоляторов для строительства.

Известно, что около 40 % мирового энергопотребления приходится на строительство [2]. Отрасль остро нуждается в эффективных теплоизоляционных материалах для повышения энергоэффективности зданий. Таким образом, разработка инновационных композитов необходима и для совершенствования утилизации резиноотходов, и для создания востребованной теплоизоляции [2].

Использование ненасыщенного полиэфира в качестве базы композита обусловлено его терморезистивными свойствами. При смешении с отвердителем ненасыщенный полиэфир формирует жесткую полимерную структуру, т.е. составу можно задать требуемую форму и пористость. Резиновые отходы, в свою очередь, — эффективный дисперсный наполнитель. Измельченная резина в составе композита значительно снижает его общую теплопроводность. Это происходит, во-первых, из-за низкой теплопроводности самой резины — $\sim 0,1-0,2$ Вт/(м·К). Во-вторых, ее частицы, диспергированные в полимерной матрице, создают дополнительные воздушные полости и сложную сеть так называемых «тепловых мостиков» [3].

Известны публикации об использовании шинной резины и других промышленных отходов для создания материалов с высокими звукопоглощающими свойствами [4]. В [5] измерялись потери звукопередачи для трех композитных панелей: из резины отработанных шин, композитной деревянной доски и древесно-стружечной плиты. Определены условия, при которых применение шинной резины улучшает звукоизоляцию.

В Висконсинском университете Милуоки изучали использование резинобетона при строительстве железных дорог [6]. Кроме того, авторы [6] сравнили резиновую суспензию с обычным раствором и выявили ее более высокую прочность и пластичность. Исследовалось также применение отходов для засыпки траншей и заполнения пустот в опорах мостов.

В [7] рассматриваются полиэфирные композиты с наполнителем из переработанных резиновых перчаток (5–40 %). Установлено, что добавка повышает ударную вязкость состава, однако снижается прочность при растяжении и изгибе. Это объясняется слабой адгезией резины и образованием пор при ее высоком содержании.

В [8] показано, как при добавлении резиноотходов в ненасыщенный полиэфир снижается прочность на изгиб базового полимерного материала. Причина — загрязняющие частицы, которые ухудшают механические свойства смеси. Выяснилось также, что предварительная обработка резиноотходов может повысить жесткость материала, а при его нагреве перед использованием увеличивается прочность на изгиб.

Исследование [9] показало, как с добавлением в ненасыщенный полиэфир частиц резиноотходов разного размера формируется изоляционный материал с пониженной плотностью, теплопроводностью и водопоглощением.

Механические свойства ненасыщенного полиэфира с различным содержанием резиноотходов описаны в [10]. Например, прочность на растяжение варьируется от 1,25 до 22,8 МПа, а прочность на сжатие — от 8,25 до 79,5 МПа. Таким образом, описанный материал пригоден для изоляции, если нет высоких требований к его механическим характеристикам.

В [11] показано влияние резиновой крошки с размером частиц 2–4 мм на такие механические свойства, как прочность на сжатие и эластичность. Оба эти показателя увеличились, особенно после предварительной обработки отходов синтетическими смолами. В этом случае фиксируется повышение прочности на сжатие на 12 %, а эластичности — на 40 %.

Добавление резины снижает прочность на растяжение и изгиб [10], что обусловлено образованием пор и слабой адгезией на фазовой границе «полимер — резина». Однако при этом повышаются ударная вязкость [7] и эластичность [11].

Негативное влияние на прочность можно сократить. С этой целью рекомендуется предварительно обрабатывать резину. Ученые предлагают такие методы, как очистка, нагрев или обработка смолами. Все это позволяет улучшить адгезию и частично восстановить механические характеристики состава [11].

При активном, разностороннем интересе исследователей к рассматриваемой теме все еще не решены некоторые ключевые вопросы. Неизвестно, например, как свойства композитов на базе ненасыщенного полиэфира зависят от концентрации и дисперсности резиноотходов. Речь идет о таких параметрах, как теплопроводность, плотность, водопоглощение, прочность на изгиб и сжатие.

Не разработаны критерии оптимизации состава для создания эффективного строительного теплоизоляционного материала. В этом случае важно сбалансировать технологичность, низкую теплопроводность, а также механические свойства, подходящие для монтажа и эксплуатации сооружения.

Целенаправленная разработка таких материалов требует более глубокого понимания процессов в системе «ненасыщенный полиэфир — резиновая крошка». Следует детально рассмотреть формирование пористой структуры и механизма снижения теплопроводности. Представленная научная работа призвана решить эту задачу. Цели исследования: создание и комплексное изучение новых композитов из ненасыщенного полиэфира с обоснованием необходимой доли резиноотходов.

Материалы и методы. Полимерные изоляционные материалы получали смешиванием резиноотходов с ненасыщенным полиэфиром в различных соотношениях. Исследования проводили в три этапа.

1. Подготовка сырья и оборудования

На этом этапе оценили пригодность и эффективность механического метода переработки изношенных автомобильных шин для получения резинового порошка с заданными параметрами. Провели анализ технологических операций, параметрический контроль на каждой стадии и выходной контроль характеристик конечного продукта.

При подготовке сырья с краев шин удалили стальную бортовую проволоку. Первичное измельчение выполнили в шредере (2 минуты при скорости 80 об/мин). В результате получили фракцию 50–300 мм. Вторичное измельчение на роторной дробилке длилось 5 минут при скорости 1500 об/мин. Фракция уменьшилась до 10–50 мм.

Ключевой этап подготовки — сепарация полученного материала. Остаточное железо удалили с помощью барабанных магнитов при скорости вращения 25 об/мин и магнитной индукции поля 500 мТл. Для отделения текстильных волокон задействовали вихревые воздушные сепараторы (скорость воздушного потока — 15 м/с, угол подачи материала — 30°).

Очищенный резиновый материал измельчили в валковом грануляторе до гранул размером 1–10 мм. Для получения однородного порошка материал в течение 60 минут перемалывали в шаровой мельнице со скоростью вращения 45 об/мин.

В результате многоступенчатого измельчения и сепарации получили однородный резиновый порошок с насыпной плотностью 500 кг/м³. Для подтверждения его гранулометрического состава провели ситовой анализ. Выяснилось, что частицы порошка имеют размер до 1 мм (таблица 1). Это соответствует целевому верхнему пределу фракции. Весь материал, использованный в экспериментах, проходит через ячейку 1 мм. В 85 % случаев размер частиц не превышает 0,37 мм.

Таблица 1

Результаты ситового анализа резинового порошка

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Прохождение порошка сквозь сито, % | 100,0 | 99,5 | 99,0 | 98,0 | 97,0 | 95,0 | 92,0 | 85,0 | 30,0 | 15,0 | 5,0 |
| Ячейка сита, мм | 1,00 | 0,91 | 0,82 | 0,73 | 0,64 | 0,55 | 0,46 | 0,37 | 0,28 | 0,19 | 0,10 |

В качестве полимерной матрицы использовался ненасыщенный полиэфир производства компании SABIC (Саудовская Аравия). Эта розоватая прозрачная жидкость с резким запахом затвердевает при комнатной температуре после добавления инициатора. Плотность смолы, измеренная при стандартной температуре 25±2 °С, составляла 1160 кг/м³.

В качестве инициатора полимеризации применялся метилэтилкетона пероксид (МЭКП) производства Haihang Industry (Китай).

2. Изготовление образцов

Для изготовления образцов использовались силиконовые формы, обеспечивающие удобное извлечение после отверждения. Геометрические размеры форм (145×145×10 мм) были выбраны в соответствии с требованиями международных стандартов ASTM D695 и техническими возможностями имеющейся измерительной аппаратуры.

Объемы резиновых отходов в образцах — 0, 10, 20, 30, 40 и 50 %.

После извлечения из форм образцы подвергались механической обработке на шлифовальном станке, чтобы добиться стабильности геометрических параметров и исключить дефекты поверхности.

Для обеспечения статистической значимости результатов изготовили и протестировали по три образца каждого состава с объемными долями резиновых отходов 0, 10, 20, 30, 40 и 50%.

3. Испытания

В соответствии с международными стандартами в лаборатории композиционных материалов механического факультета Университета Алеппо провели серию физических, термических и механических испытаний.

3.1. Физические испытания

Плотность образцов определили по ISO 1183-1:2019. Стандартная физико-механическая методика включала четыре основных этапа. На подготовительном выбрали оборудование и подготовили образцы к измерениям. На экспериментальном выполнили прямые измерения. Массу каждого образца показали весы с точностью до 0,01 г.

Линейные размеры (длину, ширину и высоту) измерили цифровым штангенциркулем из закаленной нержавеющей стали с точностью 0,01 мм.

Объем образцов рассчитали по геометрическим данным. Плотность вычислили по формуле: $\rho = m/V$, где m — масса образца; V — его объем.

3.2. Тест на водопоглощение (ISO 62:2008)

Образцы погружали в воду на 24 часа, их вес измеряли каждые два часа.

Значение водопоглощения рассчитывалось по формуле:

$$WR\% = \frac{W - W_1}{W_1} \cdot 100,$$

где W — масса влажного образца после погружения, г; W_1 — масса сухого образца до погружения, г.

3.3. Испытание теплопроводности (ISO 8301:1991)

Для испытания теплопроводности образцов использовался анализатор теплопроводности типа DRX (Китай). Диапазон измерений прибора: 0,01–2 Вт/(м·К), погрешность $\pm 3\%$. Испытания проводились при 15–100 °С в соответствии с действующим в Китае стандартом GB/T 10295-2008 (аналог ISO 8301:1991).

В ходе испытания на источник тепла подавалось постоянное напряжение 8 В. При этом поддерживалась сила тока 1,18 А и температура источника 15 °С. Температура фиксировалась через одинаковые интервалы времени. Коэффициент теплопроводности рассчитывался согласно закону Фурье:

$$Q = P = \frac{dH}{dt} = V \cdot I = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{d} \Rightarrow k = \frac{V \cdot I \cdot d}{A \cdot \Delta T},$$

где Q — тепловой поток; P — мощность тепловой энергии, Вт; d — толщина образца, м; H — энтальпия, Дж; t — время; V — напряжение питания нагревателя, В; I — ток, создаваемый источником напряжения, А; k — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); A — площадь поверхности образца, м²; ΔT — разность температур между поверхностями образца, измеряемая в кельвинах (К).

Перед экспериментом устройство для измерения теплопроводности откалибровало по стандартным образцам, поставляемым с прибором. Затем установили зависимость между теоретическими и фактическими значениями коэффициента теплопроводности для каждого стандартного образца с целью определения уравнения коррекции и значения коэффициента теплопроводности после корректировки (рис. 1).

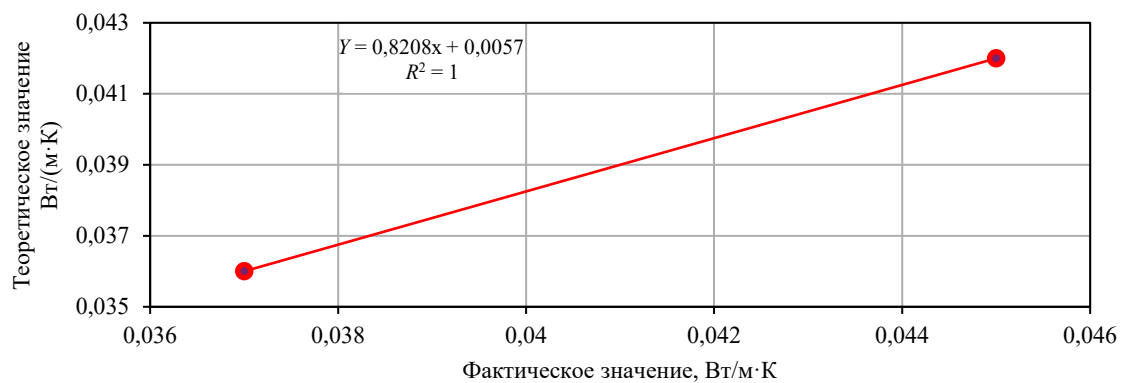


Рис. 1. Калибровочная кривая устройства для измерения теплопроводности:

R — коэффициент детерминации; Y — теоретическая теплопроводность; x — фактическое значение

3.4. Испытание на сжатие (ISO 604:2002)

Кратко опишем работу устройства для испытаний на сжатие. Верхняя подвижная плита давит на квадратные образцы толщиной 2,5 см, размещенные на нижней плите. Осевая нагрузка постепенно увеличивается.

Результаты исследования. Плотность образцов рассчитали по их массам и объемам (таблица 2). Полученные данные позволяют проанализировать изменение плотности в зависимости от состава и физико-механических характеристик материала.

Таблица 2

Результаты расчета плотности образцов

| Объем резиновых отходов, % | Параметры образца | | | Плотность, кг/м ³ |
|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------|------------------------------|
| | Сухая масса, кг·10 ⁻³ | Площадь, м ² | Толщина, м | |
| 0 | 232,00 | 0,021 | 0,01 | 1160,000 |
| 10 | 225,60 | | | 1074,333 |
| 20 | 217,52 | | | 1037,238 |
| 30 | 213,73 | | | 1017,761 |
| 40 | 202,59 | | | 963,714 |
| 50 | 190,06 | | | 905,047 |

Рис. 2 показывает, как плотность образца зависит от объема резины.

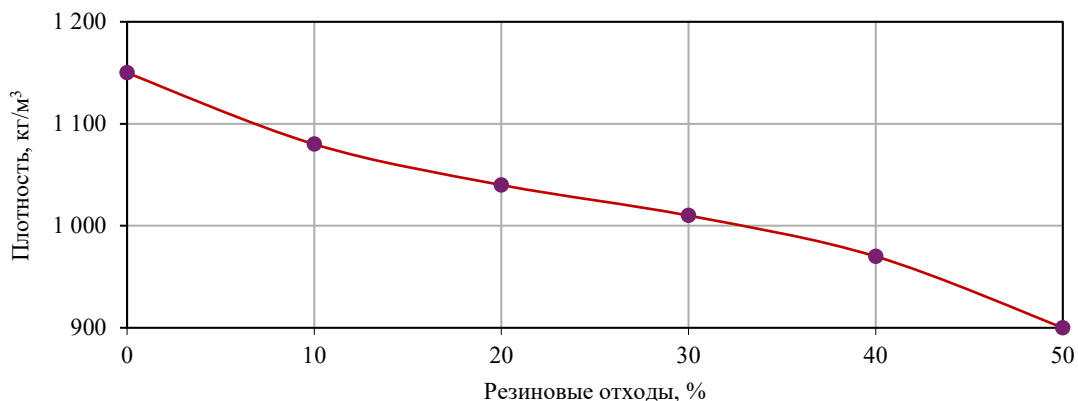


Рис. 2. Изменение плотности в зависимости от объема добавленной резины

О результатах испытаний на водопоглощение можно судить по изменению веса образцов после погружения в воду на 2–24 часа (таблица 3).

Таблица 3

Результаты испытаний образцов на водопоглощение

| Объем резиновых отходов, % | Вес до погружения, кг · 10 ⁻³ | Вес после погружения, кг · 10 ⁻³ | | | | |
|----------------------------|--|---|--------------|---------------|---------------|---------------|
| | | через 2 часа | через 4 часа | через 6 часов | через 8 часов | через 24 часа |
| 0 | 201,47 | 201,47 | 201,47 | 201,47 | 201,50 | 201,52 |
| 10 | 271,39 | 271,39 | 271,4 | 271,47 | 271,49 | 271,66 |
| 20 | 289,14 | 289,18 | 289,19 | 289,26 | 289,34 | 289,76 |
| 30 | 287,81 | 287,86 | 287,99 | 288,03 | 288,06 | 288,60 |
| 40 | 304,66 | 304,71 | 304,83 | 304,94 | 304,97 | 305,56 |
| 50 | 271,78 | 271,18 | 272,18 | 272,28 | 272,39 | 273,08 |

Рис. 3 показывает зависимость значения водопоглощения от объема резины.

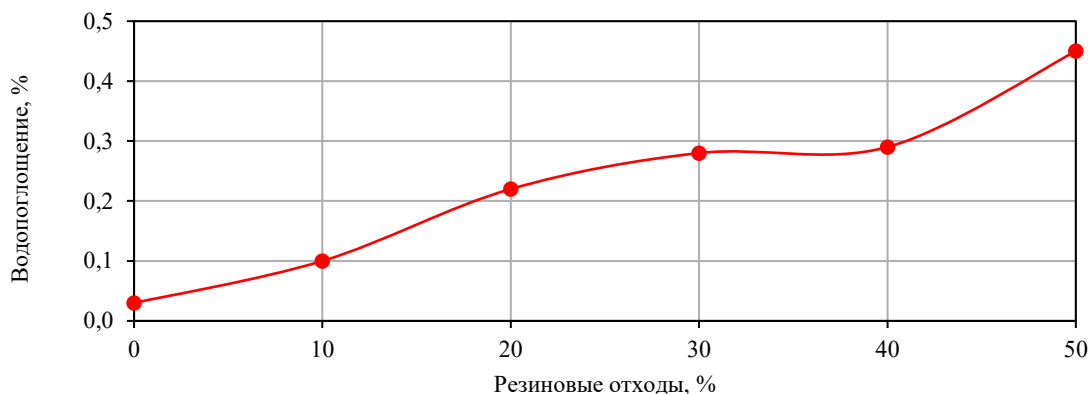


Рис. 3. Изменение водопоглощения в зависимости от объема добавленной резины

В таблице 4 представлены результаты измерения коэффициента теплопроводности образцов.

Таблица 4

Результаты измерения коэффициента теплопроводности образцов

| Объем резиновых отходов, % | Тепловой поток, $V \cdot I$, Вт | Температура, °C | Площадь образца, м ² | Толщина образца, м | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------------|--|
| 0 | 8·1,15 | 17,90 | 0,021 | 0,01 | 0,2548540 |
| 10 | | 17,45 | | | 0,2510574 |
| 20 | | 17,78 | | | 0,2451560 |
| 30 | | 18,37 | | | 0,2384840 |
| 40 | | 19,64 | | | 0,2230620 |
| 50 | | 21,16 | | | 0,2070390 |

Рис. 4 демонстрирует зависимость коэффициента теплопроводности от доли резиновых отходов.

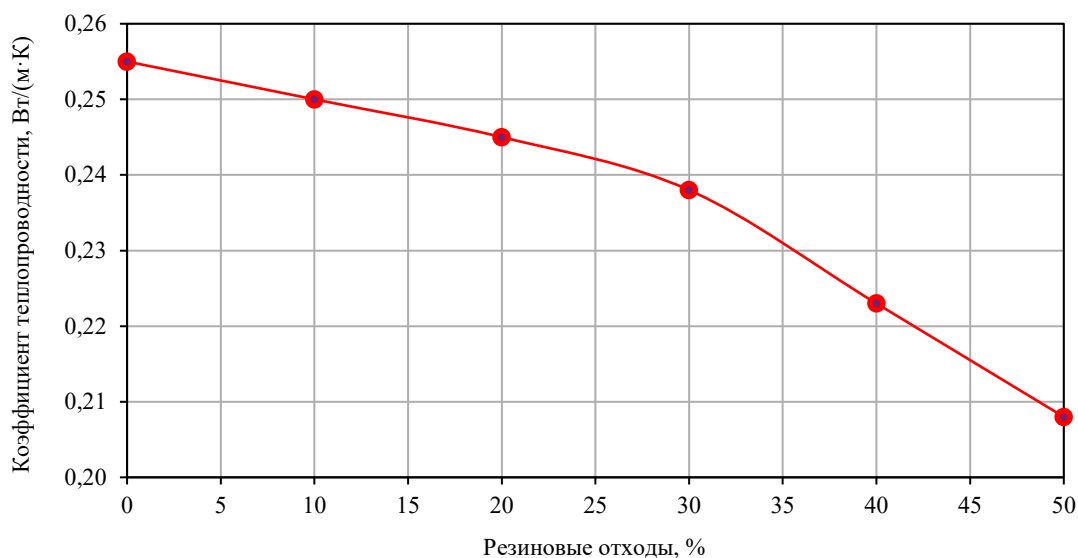


Рис. 4. Изменение теплопроводности в зависимости от объема добавленной резины

В таблице 5 приводятся результаты испытания на сжатие.

Таблица 5

Результаты испытания образцов на сжатие

| Объем резиновых отходов, % | Площадь образца, м ² | Максимальная нагрузка, кН | Максимальное сжимающее напряжение, МПа |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|
| 0 | 0,145·0,145 | 1300 | 61,83 |
| 10 | | | |
| 20 | | | |
| 30 | | | |
| 40 | | | |
| 50 | | | |

Обсуждение. Как видно из таблицы 2 и рис. 2, плотность образцов снижается с увеличением содержания добавленных резиновых отходов. Это объясняется тем, что у резины плотность меньше (500 кг/м³), чем у ненасыщенного полиэфира (1160 кг/м³). Образец с 50 % резиновых отходов демонстрирует минимальную плотность — 905,047 кг/м³, т. е. показатель сократился почти на 22 % по сравнению с чистым полимером.

Снижение плотности сопровождается уменьшением массы образцов с 232 г до 190 г при сохранении постоянных геометрических параметров (толщина 0,01 м, площадь 0,021 м²).

Отличия представленного исследования от эталонных [10] незначительны и обусловлены вариациями характеристик полимеров и шинной резины [12]. Это значит, что резиновые отходы — эффективный наполнитель. Он позволяет снизить вес композита и целенаправленно регулировать плотность конечного продукта в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик.

Согласно таблице 3, масса образцов практически не менялась в первые часы после погружения в воду. Для заметных изменений потребовалось 8–24 часа. Судя по рис. 3, при введении резиновых отходов в ненасыщенный полиэфирный полимер водопоглощение существенно не меняется, если говорить об абсолютном показателе. Значения возросли с 0,024 % для чистого полиэфира до максимума в 0,47 % при добавлении 50 % резиновых отходов. Итак, показатель менее 0,5 % следует признать незначительным. В данном случае низкое водопоглощение можно объясняется двумя причинами:

- гидрофобным характером резины по сравнению с ненасыщенным полиэфиром;
- микроскопическими порами, образующимися в процессе смешивания.

Материалы с таким низким водопоглощением целесообразно использовать там, где важна влагостойкость. Примеры: защитные покрытия, утеплители и элементы машин, эксплуатируемых при повышенной влажности. Для дальнейшего улучшения характеристик можно предложить химическую обработку поверхности резины или снижение ее содержания до 20–30 % для достижения оптимального баланса между механическими свойствами и влагостойкостью.

По данным таблицы 4 и рис. 4, с увеличением доли резиновых отходов до 50 % примерно на 19 % уменьшается коэффициент теплопроводности, что положительно сказывается на теплоизоляционных свойствах исследуемых образцов. Отмеченная закономерность объясняется низким коэффициентом теплопроводности резины. При содержании резиновых отходов 50 % коэффициент теплопроводности — 0,2070 Вт/(м·К). Показатель находится в пределах значений коэффициента теплопроводности, приведенных в сравнительных исследованиях [10]. Некоторые выявленные отличия можно объяснить разницей в методах измерения и свойствах используемых материалов [13, 14].

Испытания на сжатие (таблица 5) не позволили определить точное значение прочности на сжатие для разработанных композитов, так как ни один из образцов не разрушился в пределах максимальной нагрузки испытательной машины (1300 кН). Полагаем, что расчетное напряжение при этой нагрузке (61,83 МПа) находится в диапазоне прочности, необходимой для изоляционных материалов.

Заключение. Исследование показало, что включение резиновых отходов в ненасыщенный полиэфир позволяет получить композиты с улучшенными свойствами для применения в строительстве.

Оптимальным оказался образец с 50-процентным содержанием резины. В этом случае уменьшились плотность и теплопроводность, что важно для теплоизоляционных материалов. Водопоглощение незначительно возросло с увеличением доли резины, но оставалось на очень низком уровне (максимум 0,47 %). Это позволяет использовать композит в условиях повышенной влажности.

Испытания подтвердили высокую прочность образцов. Они без разрушений выдержали сжимающую нагрузку до 1300 кН. Значит, композиты пригодны для элементов конструкций, подверженных механическим воздействиям.

Таким образом, предложенные материалы могут способствовать решению двух задач:

- экологичной утилизации значительных объемов резиновых отходов;
- созданию эффективных теплоизоляционных материалов с высокой конструкционной прочностью.

Научные изыскания можно развивать в трех направлениях.

1. Исследовать влияние более крупных частиц резины (от 1 мм) на свойства композитов.
2. Оценить звукоизоляционный потенциал материалов. Для этого необходимо изучить микроструктуру, уточнить долю воздушных пустот и их влияние на акустику и механические свойства.
3. Провести эксперименты для изучения стойкости образцов к огню и химическим веществам.

Список литературы / References

1. Hashamfirooz M, Dehghani MH, Khanizadeh M, Aghaei M, Bashardoost P, Hassanvand MS, et al. A Systematic Review of the Environmental and Health Effects of Waste Tires Recycling. *Heliyon*. 2025;11(2):e41909. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41909>
2. Antipas IR. Effect of Glass Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Polyester Composites. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):387–397. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-387-397>
3. Van de Lindt JW, Carraro JAH, Heyliger PR, Choi C. Application and Feasibility of Coal Fly Ash and Scrap Tire Fiber as Wood Wall Insulation Supplements in Residential Buildings. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008;52(10):1235–1240. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.004>
4. Федосеев И.В., Баркан М.Ш., Прохоцкий Ю.М., Ласкина Н.Е., Логинова А.Ю. Технология утилизации отработанных резинотехнических изделий. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2013;56(2):117–120.
5. Fedoseev IV, Barkan MSh, Prokhotsky YuM, Laskina NE, Loginova AYU. Technology for Recycling Waste Rubber Products. *ChemChemTech*. 2013;56(2):117–120. (In Russ.)
6. Zhao J, Wang X-M, Chang JM, Yao Y, Cui Q. Sound Insulation Property of Wood-Waste Tire Rubber Composite. *Composites Science and Technology*. 2010;70(14):2033–2038. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.03.015>
7. Siddique R, Naik TR. Properties of Concrete Containing Scrap-Tire Rubber — An Overview. *Waste Management*. 2004;24(6):563–569. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.006>
8. Nuzaimah M, Saruan SM, Nadlene N, Jawaid M. Microstructure and Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Composites Filled with Waste Rubber Glove Crumbs. *Fibers and Polymers*. 2019;20(6):1290–1300.
9. Paulo JRO Nóvoa, Antonio Ferreira, António Torres Marques. Mechanical Performance of Unsaturated Polyester Resins. *Materials Science Forum*. 2006;514–516:662–665. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.514-516.662>
10. Abu-Jdayil B, Mourad A-H, Hussain A. Thermal and Physical Characteristics of Polyester-Scrap Tire Composites. *Construction and Building Materials*. 2016;105:472–479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.180>
11. Abu-Jdayil B, Mourad A-H, Hussain A. Investigation on the Mechanical Behavior of Polyester-Scrap Tire Composites. *Construction and Building Materials*. 2016;127:896–903. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.138>

11. Hanbing Liu, Xianqiang Wang, Yubo Jiao, Tao Sha. Experimental Investigation of the Mechanical and Durability Properties of Crumb Rubber Concrete. *Materials*. 2016;9(3):172. <https://doi.org/10.3390/ma9030172>
12. Abo Elenien KF, Azab NA, Bassioni G, Abdellatif MH. The Effect of Tire Rubber Particles on the Mechanical and Physical Properties of Polyester. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;973:012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/973/1/012019>
13. Fedroff D, Ahmad S, Savas BZ. Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*. 1996;1532(1):66–72. <https://doi.org/10.1177/0361198196153200110>
14. Rybak AT, Teplyakova SV, Olshevskaya AV, Prutskov AS. A Method for Monitoring the Reliability of Technical Systems by Identifying the Entropy of the Causes of Their Failures. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(2):112–119. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-112-119>

Об авторах:

Имад Ризакалла Антипас, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchID](#), imad.antypas@mail.ru

Татьяна Петровна Савостина, старший преподаватель кафедры «Основы конструирования машин» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kovtanya@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

И.Р. Антипас: разработка концепции, курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, предоставление ресурсов, научное руководство, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Т.П. Савостина: административное руководство исследовательским проектом, визуализация, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Imad Rizakalla Antipas, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fundamentals of Machinery Design Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchID](#), imad.antypas@mail.ru

Tatyana P. Savostina, Senior Lecturer of the Fundamentals of Machinery Design Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kovtanya@yandex.ru

Claimed Contributorship:

IR Antipas: conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, methodology, resources, supervision, validation, visualization, writing – original draft preparation, writing – review & editing.

TP Savostina: project administration, visualization, writing – original draft preparation,

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 25.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 20.01.2026

Принята к публикации / Accepted 27.01.2026