

Научная статья

УДК 67.05

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-388-401>

EDN: QBQCEG



ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ СМЕСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ РЕСАЙКЛЕРА

В.А. Зорин, Нгуен Куанг Хай ✉*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия*✉ ответственный автор
nguyenquanghai2796@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Технология холодного ресайклинга является эффективным решением для ремонта дорожного покрытия. Однако детали рабочего оборудования смесительной камеры ресайклера одновременно подвергаются значительному механическому износу, ударным нагрузкам от переработанного асфальтобетона и агрессивным химическим воздействиям, связанным с битумно-водными эмульсиями. Совокупное влияние этих факторов приводит к сложным механизмам разрушения, которые значительно сокращают срок службы рабочего оборудования.

Материалы и методы. Настоящее исследование сосредоточено на оценке и разработке оптимизированных систем полимерно-композитных покрытий для деталей смесительного оборудования ресайклеров. Предлагаемый подход основан на выборе матричных смол, включая эпоксидные и полиуретановые системы, и их сочетании с многофункциональными наполнителями, включая твердые смазочные добавки, армирующие наполнители, а также нано- и микрофазные компоненты.

Результаты. При проведении исследований применяется методика многокритериальной оптимизации для достижения сбалансированного сочетания механических, физико-химических и эксплуатационных свойств, включая адгезионную прочность, баланс твердость–упругость, сопротивление истиранию, снижение трения, ударную прочность, химическую и термическую стабильность, а также практическую применимость и технологичность.

Обсуждение и выводы. Результаты показывают, что эпоксидные матрицы, армированные гибридными нано- микронаполнителями и дополненные твердыми смазочными добавками, существенно повышают срок службы покрытия, улучшают трибологические характеристики и снижают отслаивание покрытия и адгезию битумной смеси, сохраняя при этом разумную стоимость и технологичность. Кроме того, предложенная стратегия проектирования обеспечивает новый прикладной подход к разработке защитных покрытий для рабочего оборудования других промышленных отраслей, где требуется устойчивость к сочетанным абразивным, ударным и химически агрессивным воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: холодный ресайклинг, полимерно-композитное покрытие, многофункциональные наполнители, трибологические характеристики, многокритериальная оптимизация

Статья поступила в редакцию 25.01.2026; одобрена после рецензирования 24.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Зорин В.А., Нгуен Куанг Хай. Оптимизация структуры композитных покрытий для защиты рабочего оборудования смесительной камеры ресайклера // *Вестник СиБАДИ*. 2026. Т. 23, № 3. С. 388-401. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3>

© Зорин В.А., Нгуен Куанг Хай, 2026

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3-388-401>

EDN: QBQCEG

OPTIMIZATION OF COMPOSITE COATINGS STRUCTURE TO PROTECT WORKING EQUIPMENT OF RECYCLER MIXING CHAMBER

Vladimir. A. Zorin, Quang Hai Nguyen ✉

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author

nguyenquanghai2796@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Cold-in-Place Recycling (CIR) technology is an effective solution for pavement maintenance and rehabilitation. However, the mixing chamber of CIR equipment is simultaneously exposed to severe mechanical abrasion, impact loading from reclaimed asphalt pavement (RAP), and aggressive chemical environments associated with bitumen–water emulsions. These combined effects result in complex degradation mechanisms that significantly reduce the equipment's service life.

Materials and methods. This study focuses on the evaluation and development of optimized polymer–composite coating systems for CIR mixing chambers. The approach is based on selecting matrix resins, including epoxy and polyurethane/polyurea systems, and combining them with multifunctional fillers, such as solid lubricants, reinforcing agents, and nano- and micro-phase components.

Results. A multicriteria optimization methodology was applied to achieve a balanced combination of mechanical, physico-chemical, and operational properties, including adhesion strength, hardness, elasticity balance, wear resistance, friction reduction, impact toughness, chemical and thermal stability, and practical applicability and manufacturability.

Discussion and conclusions. The results indicate that epoxy matrices reinforced with hybrid nano-micro fillers and supplemented with solid lubricants substantially enhance coating service life, improve tribological performance, and reduce both coating delamination and RAP bitumen adhesion, while maintaining reasonable cost and processability. Furthermore, the proposed design strategy provides a novel practical approach for developing protective coatings in other industrial sectors where resistance to abrasion, impacts, and chemically aggressive conditions is required.

KEYWORDS: cold-in-place recycling, polymer-composite coating, multifunctional fillers, tribological performance, multi-criteria optimization

The article was submitted: January 25, 2026; **approved after reviewing:** April 24, 2026; **accepted for publication:** June 15, 2026.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Zorin V. A., Nguyen Qu.H. Optimization of composite coatings structure to protect working equipment of recycler mixing chamber. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2026; 23 (3): 388-401. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2026-23-3>

© Zorin Vladimir. A., Nguyen Quang Hai, 2026



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Технология холодного ресайклинга получила широкое признание как эффективное решение при ремонте асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог благодаря способности снижать потребление первичных материалов, уменьшать выбросы и повышать экономическую и экологическую эффективность дорожных покрытий [1, 2, 3]. Многочисленные исследования показали, что **технология холодного ресайклинга** обеспечивает выполнение технических требований к покрытиям автомобильных дорог с низкой и средней интенсивностью движения, одновременно обладая значительными экономическими преимуществами и высоким уровнем устойчивости по сравнению с традиционными методами ремонта [2, 3].

В процессе эксплуатации смесительная камера оборудования ресайклера функционирует в сложных условиях, при которых одновременно реализуются механические и физико-химические воздействия. Асфальтобетонная смесь, содержащая крупнозернистые минеральные заполнители, хаотично перемещается внутри смесительной камеры, вызывая износ деталей смесительного оборудования ресайклеров в результате трения и ударного воздействия твердых частиц. Одновременно присутствие битумных эмульсий, воды и регенерирующих добавок формирует влажную среду, способствующую ускоренному разрушению поверхностных слоев материала деталей рабочего оборудования ресайклеров [4, 5]. Несмотря на то, что большинство соответствующих исследований выполнено на бетоносмесителях или аналогичном промышленном оборудовании, описанные механизмы изнашивания, ударного воздействия и адгезии являются физически аналогичными условиям работы смесительных камер ресайклеров, что позволяет рассматривать их в качестве обоснованной референтной основы.

Взаимодействие указанных механизмов приводит к повреждению металлических поверхностей деталей рабочего оборудования ресайклеров, включающих механический износ, адгезию материала и локальные физико-химические изменения. Многочисленные исследования показали, что интенсивная адгезия битумной смеси к рабочей поверхности не только увеличивает сопротивление процессу перемешивания и концентрацию напряжений, но и опосредованно ускоряет процессы изнашивания, что в конечном итоге приводит к снижению ресурса оборудования [4, 5].

Традиционные подходы к увеличению производительности и срока службы смесительных камер, такие как оптимизация процедур очистки, модификация геометрии рабочих элементов или выбор подложек с повышенной твердостью, обладают принципиальными ограничениями и нередко сопровождаются значительными затратами на техническое обслуживание. В этой связи функциональные покрытия, в частности полимерно-композиционные, рассматриваются как перспективное направление защиты металлических поверхностей деталей рабочего оборудования, эксплуатируемых в тяжелых условиях [6, 7].

С учетом характерных механизмов старения и повреждения деталей рабочего оборудования, наблюдаемых в смесительных камерах, а также результатов смежных исследований, полимерно-композиционные покрытия могут рассматриваться не только как технически обоснованное решение, но и как экономически и эксплуатационно-ремонтная целесообразная стратегия. Кроме того, данный подход открывает возможности для разработки устойчивых функциональных покрытий, способствующих повышению надежности, увеличению производительности и срока службы рабочего оборудования ресайклеров в условиях интенсивной эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проектирование полимерно-композитных покрытий деталей рабочего оборудования смесительной камеры ресайклера является сложной задачей инженерии материалов, требующей одновременного выполнения множества, часто противоречивых технических требований, возникающих из-за специфических условий переработки пенобитумной асфальтобетонной смеси в агрессивной механико-химической среде [1, 2, 3]. Покрытие должно не только обеспечивать высокую износостойкость рабочего оборудования против абразивных заполнителей, но и ограничивать адгезию переработанных асфальтовых смесей, обеспечивать прочное сцепление с металлической подложкой, сохранять вязкость при ударах и вибрациях и оставаться химически стабильным в эмульсиях и при длительном воздействии влаги [4, 5, 6, 7, 10].

Помимо функциональных характеристик, покрытие должно соответствовать критериям технологичности, эксплуатационной надежности и экономической эффективности, что имеет решающее значение для практического внедрения в промышленный дорожный ре-

сайклинг [2, 3]. Поэтому выбор системы «полимерная матрица–наполнитель» не может основываться на одном критерии, а должен рассматриваться в рамках системного многоцелевого оптимизационного подхода, позволяющего одновременно оценивать множество механохимических свойств композиционного материала [6, 23, 24, 25].

В настоящем исследовании общая оценка качества каждого варианта материала проводится с использованием целевой функции в виде линейной комбинации на основе нормализованных критериев. Для каждой комбинации материалов X , функция общего качества определяется следующим образом:

$$Q(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i F_i(X),$$

где $F_i(X)$ представляет значение i -го критерия, включая износостойкость, антиадгезионные свойства, вязкость, адгезию к металлической подложке, химическую стойкость, технологичность и стоимость; λ_i обозначает весовой коэффициент, отражающий относительную важность каждого критерия, удовлетворяющий условию $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Задача выбора материала формулируется как поиск комбинации X , максимизирующей $Q(X)$ в пределах допустимого проектного пространства в соответствии с современными принципами проектирования композиционных материалов [23, 24].

Для обеспечения сопоставимости критериев с разными единицами и физической природой значения $F_i(X)$ нормализуются относительно соответствующих технических порогов. Обязательные ограничения (например, максимально допустимый коэффициент трения или скорость изнашивания либо минимальная адгезия к металлу) применяются для исключения вариантов материалов, не соответствующих практическим эксплуатационным требованиям [4, 6, 8, 15]. Параллельно с подходом целевой функции используется метод «идеальной точки» для оценки общей пригодности каждой комбинации материалов путем расчета расстояния от вектора критериев варианта до идеальной точки в многокритериальном пространстве [24, 25].

На основе этой оптимизационной модели проектирование полимерно-композиционных покрытий осуществляется путем комбинирования многофункциональных наполнителей, включая твердые смазочные вещества, упрочняющие добавки и микро- наноармирующие фазы, для формирования иерархической

многомасштабной армированной структуры в полимерной матрице [6, 18, 23, 26, 27]. Этот подход позволяет одновременно оптимизировать износостойкость, снижение адгезии, повышение вязкости и механо-химическую долговечность, необходимую для тяжелых эксплуатационных условий смесительных камер ресайклеров [4, 5, 6, 7, 10, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критерии эффективности полимерных покрытий в условиях интенсивной эксплуатации

В условиях эксплуатации смесительных камер ресайклеров полимерные покрытия подвергаются вибрациям, многократным ударам и температурным колебаниям на протяжении всего срока службы. Поэтому адгезия покрытия к металлической подложке является первоочередным требованием для обеспечения долгосрочной защитной функции. Исследования полимерных покрытий показали, что химическая природа полимера одновременно влияет на адгезию, состояние поверхности подложки и способ нанесения покрытия [8, 9].

Помимо адгезии, покрытие должно обладать износостойкостью и ударной прочностью при постоянном контакте со смесями асфальтобетона, содержащими крупные заполнители. В этом контексте критически важно обеспечить баланс между твердостью и вязкостью материала. Полимеры с высокой твердостью часто являются хрупкими и склонны к растрескиванию под импульсными нагрузками, тогда как чрезмерно мягкие материалы подвержены быстрому износу. Способность покрытия к поглощению энергии и сопротивление повторяющимся ударам играют ключевую роль в ограничении механических повреждений и увеличении срока службы [9, 10].

Кроме механических требований, полимерные покрытия деталей в смесительных камерах должны обеспечивать химическую стойкость и термическую стабильность. Прямой контакт с битумными эмульсиями, водой и добавками для ресайклинга требует, чтобы покрытие сохраняло стабильные физико-химические свойства, предотвращая набухание, размягчение и утрату работоспособности в условиях повышенной влажности. Одновременно полимер должен оставаться стабильным при эксплуатационных термических нагрузках, без текучести, разложения или потери защитной функции, что подтверждается недавними исследованиями модифицированных эпоксидных и полимерно-композиционных покрытий [11].

Наконец, практическая применимость и экономическая эффективность также являются важными критериями для внедрения в реальных условиях защитных полимерных покрытий деталей рабочего оборудования ресайклеров. Технологии нанесения покрытий должны быть адаптированы к условиям ремонтных мастерских и не требовать сложного оборудования.

Выбор полимерных матриц и наполнителей для покрытий смесительных камер ресайклеров

Выбор полимерной матрицы и наполнителей решающим образом влияет на общие эксплуатационные характеристики полимерно-композитных покрытий в смесительных камерах ресайклеров. Среди широко применяемых матриц эпоксидные смолы характеризуются отличной адгезией к металлическим поверхностям, высокой твёрдостью и прочностью при растяжении, коррозионной

стойкостью и термической стабильностью, что соответствует условиям эксплуатации ресайклеров [12, 13, 14]. Кроме того, эпоксидные материалы допускают гибкую интеграцию нано-, микро- или гибридных наполнителей, что позволяет оптимизировать твёрдость, вязкость и износостойкость покрытий.

Помимо эпоксидных смол, **полиуретановые (ПУ)** и **полимочевинные (ПМ)** системы известны высокой вязкостью, эффективным поглощением вибраций и ударных нагрузок, что делает их пригодными для эластичных покрытий или зон, подверженных интенсивным импульсным воздействиям [15, 16, 17]. Однако вследствие более низкой адгезии к металлическим подложкам по сравнению с эпоксидными смолами ПУ и ПМ преимущественно применяются в качестве вспомогательных фаз либо в комбинации с эпоксидными матрицами для улучшения сцепления и комплексных механических характеристик материала покрытия.

Сводная характеристика свойств и степени пригодности комбинаций «полимер–наполнитель» [13, 14, 16, 18]

Table 1
Summary of properties and applicability of polymer-filler combinations [13, 14, 16, 18]

Полимерная матрица	Тип наполнителя	Ключевые механико-физические свойства	Преимущества	Ограничения
Эпоксидная смола (ЭП)	Нано (10–100 нм)	Твёрдая, вязкая, коррозионноустойчивая, термически стабильная	Высокая жёсткость и коррозионная стойкость, широкая совместимость	Хрупкость без модификации, требуется хорошая дисперсия наночастиц
Эпоксидная смола (ЭП)	Микро (1–50 мкм)	Износостойкая, снижающая трение	Технологичность, низкая стоимость, оптимальна в сочетании нано–микро	Механическое упрочнение ниже, чем у нанонаполнителей
Эпоксидная смола (ЭП)	Гибрид нано–микро	Твёрдая–вязкая–износостойкая–антиадгезионная, устойчива к влаге	Многоцелевая оптимизация, эффективна в тонких покрытиях	Требуется сложная оптимизация соотношений компонентов
Полиуретан (ПУ, жёсткий)	Нано или микро	Вязкий, поглощающий вибрации, стойкий к разрыву	Ударопрочность, сохранение пластичности при низких температурах	Адгезия к стали ниже, чем у ЭП, требуется грунтование
Полимочевина (ПУ, гибридная)	Нано или микро	Эластичная, самозалечивание микротрещин, ударостойкая	Быстрое нанесение, высокая стойкость к импульсным нагрузкам	Механическая прочность ниже, чем у ЭП, размягчение при высоких температурах
Эластомерные композиты (ПУ – нано, ПУ – кремнезём)	Нано	Высокая вязкость и способность к поглощению ударов	Трещиностойкость, устойчивость к ударам	Износостойкость ниже, чем у ЭП
Волокнистые/микроволоконные наполнители	Стекланные, углеродные, арамидные	Чрезвычайно высокая прочность при растяжении, высокая жёсткость	Высокая несущая способность	Анизотропия, трудности применения в тонких покрытиях
НПС/ФФС/КОС/ПМ	–	В зависимости от типа: термо- и химически стойкие	Низкая стоимость/высокая термостойкость/огнестойкость	Хрупкость, низкие механические свойства, сложность переработки

Наполнители играют ключевую роль в формировании эксплуатационных свойств полимерных покрытий. Наночастицы размером 10–100 нм эффективно повышают твёрдость, прочность и коррозионную стойкость за счёт развитой удельной поверхности и сильного межфазного взаимодействия с полимерной матрицей. Вместе с тем их использование требует применения эффективных методов диспергирования для предотвращения агломерации [18]. В противоположность этому микрочастицы размером 1–50 мкм преимущественно способствуют повышению износостойкости и снижению коэффициента трения, отличаются технологичностью и экономической эффективностью, однако обеспечивают ограниченный уровень механического упрочнения [19, 20]. Совмещение нано- и микро размеров наполнителей в гибридных системах приводит к формированию эффекта двойного армирования, обеспечивающего баланс механических свойств и повышение стабильности покрытия в тяжёлых условиях эксплуатации [21, 22].

Механизмы нано- микрогибридного армирования, хотя и изучены преимущественно применительно к металлическим подложкам, могут быть экстраполированы на полимерно-композитные покрытия смесительных ка-

мер ресайклеров. Комбинации «полимер-наполнитель» могут быть систематически оценены по совокупности механических характеристик, износостойкости, адгезии и термо-влажностной стабильности с целью определения их пригодности для применения в покрытиях деталей рабочего оборудования ресайклеров (таблица 1).

На основе сочетания матричных материалов и наполнителей (таблица 1) выбор оптимальных материалов покрытий осуществляется следующим образом. Эпоксидные системы в сочетании с нанонаполнителями или гибридными нано- микронаполнителями используются в качестве основных матриц покрытий, обеспечивая благоприятный баланс твёрдости и вязкости, высокую износостойкость, а также термо- и влагостойкость. В то же время композиты на основе ПУ/ПМ/эластомеров применяются в качестве вспомогательных покрытий в зонах, подвергающихся интенсивным вибрационным и ударным нагрузкам, что позволяет оптимизировать механические характеристики и увеличить срок службы покрытий деталей рабочего оборудования смесительных камер ресайклеров. Диаграмма пригодности (рисунок 1) наглядно иллюстрирует приоритетную ранжировку каждой комбинации «полимер-наполнитель».

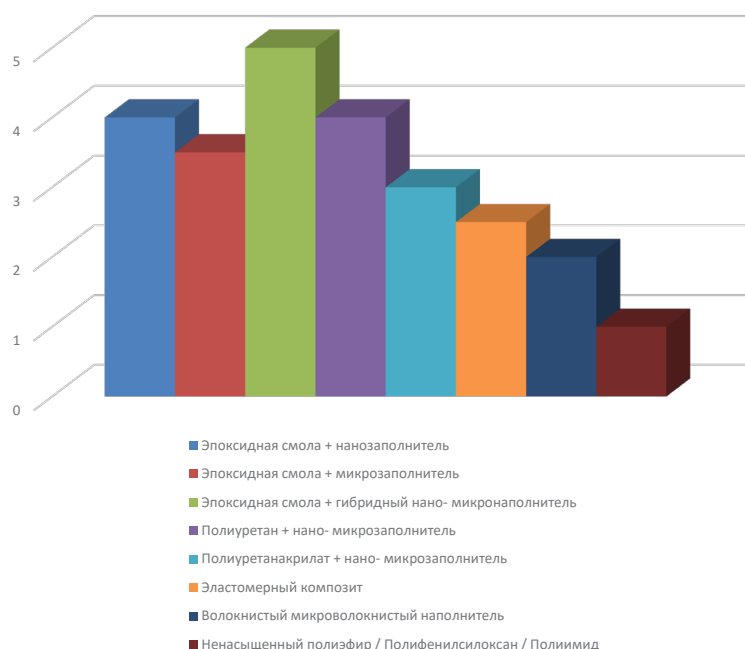


Рисунок 1 – Уровни пригодности покрытий для применения в смесительных камерах технологии CIR
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Coating applicability levels suitable for CIR mixing chamber
Source: compiled by the authors.

Роль и характеристики наполнителей в полимерных материалах для покрытий смесительных камер ресайклеров

В полимерных композиционных системах наполнители выступают в качестве дисперсных твёрдых фаз, формируя многофазную структуру с межфазными границами, которые способны напрямую модулировать механическое, химическое и трибологическое поведение материала [23, 24, 25]. В смесительных камерах ресайклеров поверхностные покрытия и наполнители выполняют функции, выходящие за рамки простого повышения твёрдости, характерного для традиционных применений. Они также определяют механизмы разрушения, повышают износ- и ударостойкость, снижают поверхностную энергию для ограничения адгезии пенобитумных асфальтобетонных смесей, улучшают размерную стабильность в условиях влажно-химической среды и обеспечивают эффект твёрдой смазки, способствуя снижению энергопотребления в процессе эксплуатации. Эти функции имеют особую значимость, поскольку поверхность смесительной камеры в течение всего процесса ресайклинга постоянно подвергается интенсивным ударам со стороны заполнителей асфальтобетонной смеси, тяжёлым условиям скольжения и абразивного изнашивания.

В отличие от классических классификаций, основанных на происхождении (природные, синтетические) или геометрии (порошки, волокна), в настоящем исследовании наполнители рассматриваются с позиции их промышленной функциональности, с акцентом на эффективность по пяти ключевым критериям: износостойкость, снижение коэффициента трения и антибитумная адгезия, химическая инертность по отношению к битумно-цементно-водным эмульсиям, устойчивость к импульсным нагрузкам и вибрациям, а также доступность и технологичность введения в условиях промышленного производства.

Твёрдосмазочные наполнители играют ключевую роль в снижении трения и улучшении трибологических характеристик, при этом к числу типичных материалов относятся графит, MoS_2 , WS_2 , h-BN и ПТФЭ [27, 28]. Графит обладает слоистой структурой, обеспечивающей межслоевое скольжение, и широко применяется для снижения трения деталей из полимерных материалов [27]; MoS_2 характеризуется низким коэффициентом трения и хорошей стабильностью при высоких нагрузках или в условиях повышенной влажности [27, 28]; WS_2 сохраняет низкое трение в широком

диапазоне трибологических условий, включая высокие температуры и нагрузки [27]; h-BN является химически инертным и термически стабильным, что делает его пригодным для полимеров, эксплуатируемых в химически или термически агрессивных средах [27]; ПТФЭ обладает исключительно низким коэффициентом трения и выраженными антиадгезионными свойствами, однако имеет ограниченную механическую прочность и поэтому чаще используется как смазочная добавка, а не как основной наполнитель [27, 28]. Rao и соавторы [26] показали, что введение MoS_2 и h-BN в углерод-эпоксидные композиты приводит к одновременному улучшению механических и трибологических свойств, что подчёркивает ключевую роль твёрдых наполнителей в оптимизации трения и износа полимерных материалов.

Нанонаполнители, используемые в эпоксидных композитах (таблица 2), дополнительно подчёркивают их влияние на коэффициент трения, износостойкость, механические свойства, термическую стабильность и степень диспергирования в полимерной матрице. Такое представление позволяет наглядно продемонстрировать роль и эффективность каждого наполнителя по совокупности эксплуатационных параметров, что согласуется с результатами ранее опубликованных исследований.

Анализы показывают, что оптимальные системы наполнителей для покрытий смесительных камер ресайклеров не должны основываться на одном материале, а требуют многофункциональной разработки. Твёрдосмазочные наполнители, такие как MoS_2 , WS_2 , h-BN и графит в количестве 5–15 мас.% эффективно снижают трение и ограничивают адгезию пенобитумной смеси [26, 27]. В то же время упрочняющие и износостойкие наполнители, включая Al_2O_3 , SiC и небольшие количества нано- SiO_2 (10–25 мас.%), защищают поверхность от интенсивных механических воздействий [28]. Наночастицы SiO_2 при низкой нагрузке (0,5–3 мас.%) дополнительно повышают вязкость и снижают хрупкость, вызванную микрочастицами, формируя иерархическую армированную структуру с многомасштабными твёрдыми фазами, что позволяет оптимизировать механические свойства и износостойкость покрытия [28, 29].

В работе [28] проанализированы и обобщены материалы наполнителей для улучшения механических характеристик наноэпоксидных композитов; подробные результаты представлены в таблице 3.

Таблица 2
Сравнительный анализ различных нанонаполнителей [29]
Источник: составлено авторами.

Table 2
Comparative analysis of various nanofillers [29]
Source: compiled by the authors.

Нанонаполнитель	Снижение трения	Износостойкость	Механическая прочность	Термическая стабильность	Качество диспергирования	Уникальные преимущества	Ограничения
Графен	выс.	выс.	выс.	выс.	умер.	Высокое отношение сторон, электропроводность	Склонность к агломерации
Углеродные нанотрубки (УНТ)	выс.	умер.	выс.	умер.	низ.	Исключительно высокая прочность при растяжении, малый удельный вес	Трудности диспергирования в полимерной матрице
Дисульфид молибдена (MoS ₂)	умер.	выс.	умер.	умер.	выс.	Эффект твёрдой смазки, эффективное снижение трения	Деградация при повышенных температурах
Максены	выс.	выс.	выс.	выс.	умер.	Высокая электропроводность, структурная гибкость	Ограниченная долговременная стабильность
Чёрный фосфор	умер.	умер.	выс.	низ.	низ.	Отличные механические характеристики	Высокая химическая активность, деградация на воздухе
Нитрид бора (BN)	умер.	умер.	низ.	выс.	выс.	Термическая стабильность, электроизоляционные свойства	Ограниченное механическое упрочнение
Диоксид кремния (SiO ₂)	низ.	выс.	умер.	умер.	выс.	Экономичность, повышение долговечности покрытия	Ограниченное снижение коэффициента трения

Таблица 3

Механические свойства эпоксидного нанокompозита, армированного нанонаполнителем [28]
 Источник: составлено авторами.

Table 3

Mechanical properties of epoxy nanocomposite reinforced with nanofiller material [28]
 Source: compiled by the authors.

Наполнитель	Содержание	Модуль Юнга (ГПа / Δ%)	Прочность при растяжении (МПа / Δ%)	Основные наблюдения
GNP / CNT	0,5 мас. %	2,2 / 40	50 / 36	Умеренное повышение за счёт волнистости УНТ и укладки GNP; комбинация GNP + УНТ дала ~14 % увеличение модуля
rGO	0,2–0,3 мас. %	1,8–12 / 12–47	46,5 / 47	Оптимальная дисперсия улучшает передачу напряжений и механические свойства; при больших нагрузках упрочнение снижается
f-GO / GO	0,1–0,5 мас. %	3 / 12	50–65 / 13–121	Функционализация улучшает передачу нагрузки и прочностные характеристики; избыточное содержание может снизить прочность
f-GNP / GNP	0,5–5 мас. %	2,1–3,6 / 15–71	48–95 / 1–99	Функционализированные GNP повышают модуль и прочность за счёт межфазного связывания; при высоких концентрациях эффективность снижается
f-BN / BN	0,3–10 мас. %	2,7–4,8 / 21–68	25–66 / 54–100	Функционализированный BN улучшает модуль и прочность; избыточное содержание (>10 мас. %) может снизить механические свойства
Ti ₃ C ₂ Tx / Ti ₃ CN	0,2–90 мас. %	2,6–4,5 / 35–182	53–70 / 25–51	Наноллисты максены повышают модуль и прочность за счёт передачи напряжений и адгезии на границе фаз; критична оптимальная нагрузка.
MoS ₂ / MoS ₂ -CF / MoS ₂ -SiO ₂ / MoS ₂ -МНОУНТ	0,2–3 wt%	0,9–3,4 / 9–47	31–68 / 23–77	MoS ₂ и гибридные наполнители повышают жёсткость и вязкость; агломерация или чрезмерная нагрузка снижает свойства
f-WS ₂	0,1–0,25 wt%	–	–	Функционализированные наноллисты WS ₂ повышают термомеханические свойства за счёт прочности самих листов
f-BP	3 wt%	–	70 / 21	Агломерация BP немного снижает прочность по сравнению с чистой эпоксидной матрицей
BN/МНОУНТ	0,5/0,3 wt%	3,2 / 38	60 / 25	Оптимальное содержание BN + MWCNT повышает прочность; избыточный наполнитель снижает прочность из-за плохой дисперсии

Многофакторный сравнительный анализ и оптимизация систем «полимер–наполнитель» для покрытий смесительных камер ресайклеров

Многофакторная радиальная диаграмма (рисунок 2) позволяет количественно и наглядно оценить общие эксплуатационные характеристики систем покрытий «полимер–наполнитель» в условиях интенсивной эксплуатации смесительных камер ресайклеров, где одновременно проявляются износ, удары, вибра-

ции, а также комбинированные химико-термические воздействия [1, 2, 3, 4, 5]. Результаты показывают, что на характеристики покрытия нельзя влиять с опорой на один критерий; их определяет баланс между механическими свойствами, трибологическим поведением и адгезионными характеристиками. Это наблюдение полностью соответствует современным подходам к проектированию композитных покрытий для экстремальных условий эксплуатации [6, 10].



Рисунок 2 – Многокритериальный радиальный анализ систем покрытий для смесительных камер CIR
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Multi-criteria radar analysis of coating systems for CIR mixing chambers
Source: compiled by the authors.

Материалы на основе эпоксидных смол демонстрируют наивысший общий индекс качества $Q(X)$, что обусловлено прежде всего их превосходной адгезией к металлическим подложкам, высокой твёрдостью и отличной химико-термической стабильностью – ключевыми факторами для поддержания целостности покрытия при комбинированных абразивно-ударных нагрузках [8, 11, 12, 13, 14]. На радиальной диаграмме это преимущество проявляется в виде выраженного удлинения полигона вдоль осей адгезии, износостойкости и химической стойкости. Напротив, системы на основе ПУ/ПМ, хотя и демонстрируют высокую вязкость и способность поглощать ударную энергию [16, 17], ограничены слабой адгезией к металлу и низкой термостойкостью [15], что приводит к меньшей площади полигона в многофакторной оценке.

Влияние типа наполнителя наглядно отражается в геометрии полигонов радиальной диаграммы. Системы, армированные исключительно микронаполнителями, показывают хорошую износостойкость и технологичность, но недостаточно сбалансированную вязкость. Напротив, системы с нанонаполнителями значительно усиливают межфазное сцепление и сопротивление инициации и распространению микротрещин; однако они сталкиваются с проблемами диспергирования наночастиц и повышенной стоимостью материала [18, 21, 22, 23, 24, 25, 29]. Гибридные нано-микронаполнители эффективно преодолевают эти ограничения за счёт многоуровневого армирующего механизма, обеспечивая одновременное улучшение механических и трибологических показателей и достигая минимального расстояния до идеальной точки в пространстве многофакторной оценки [21, 23, 28].

Кроме того, введение твёрдосмазочных наполнителей, таких как MoS_2 , WS_2 , h-BN или графит, значительно снижает трение и адгезию битума, улучшая трибологические характеристики без существенного ухудшения механической прочности покрытий [6, 26, 27, 28]. В совокупности аналитические результаты показывают, что эпоксидные покрытия, армированные гибридными нано-микронаполнителями и дополненные твёрдосмазочными добавками, представляют собой оптимальное и сбалансированное решение для применения в смесительных камерах ресайклеров. Этот подход соответствует целям повышения как технической эффективности, так и устойчивости технологии холодного ресайклинга в современной эксплуатации дорожной инфраструктуры [1, 2, 10].

Радиальная диаграмма многофакторной оценки служит не только иллюстративным инструментом, но и количественным подтверждением того, что стратегия проектирования на основе эпоксидных покрытий с гибридными нано-микронаполнителями и твёрдосмазочными добавками является наиболее оптимальной при одновременном учёте механических, трибологических, химико-термических, технологических и экономических требований смесительных камер ресайклеров. Этот подход к многофакторной оптимизации соответствует современным тенденциям разработки устойчивых покрытий для экстремальных условий эксплуатации, повышая общую эффективность и устойчивость технологии холодного ресайклинга в современных практиках технического обслуживания и ремонта дорожных покрытий [1, 2, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа демонстрирует, что эпоксидные полимерно-композиционные покрытия с многофункциональными наполнителями, такими как твёрдосмазочные добавки, армирующие агенты и нано-микрокомпоненты, обеспечивают эффективную защиту деталей рабочего оборудования смесительных камер ресайклеров от износа, ударных воздействий и химических нагрузок. Применяя многофакторную оптимизацию системы «смола-наполнитель», достигается сбалансированная комбинация твёрдости, вязкости, износостойкости, снижения трения, адгезии и химико-термической стабильности. Иерархическое расположение наполнителей способствует равномерному рассеянию ударной энергии, улучшает поглощение ударов и сохраняет

как трибологические, так и химические свойства покрытия, минимизируя расслоение, износ, повреждения и разрушения, вызванные эмульсиями. Путём регулирования типа, содержания и состава наполнителей покрытия могут быть адаптированы для зон с высокими нагрузками, продлевая срок службы деталей рабочего оборудования смесительных камер ресайклеров при сохранении экономической эффективности и технологичности. Полученные результаты создают надёжную научную основу для применения покрытий в технологиях холодного ресайклинга и подчеркивают более широкий потенциал таких защитных покрытий для промышленного оборудования, работающего в условиях комбинированных абразивных, ударных и химически агрессивных воздействий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pakes A., Edil T., Sanger M., Olley R., Klink T. Environmental benefits of cold-in-place recycling // *Transportation Research Record*: 2672(24), 2018; P. 11–19. <https://doi.org/10.1177/0361198118758691>
2. Cao R., Li H., Yao L., Jiang J., Leng Z., Ni F., Zhao Z. Comparative analysis of cold in-place recycling for roadway maintenance and rehabilitation from the perspectives of technical-cost-environmental nexus // *Journal of Cleaner Production*: 439, 2024; P. 140768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140768>. EDN EUDJXU
3. Jin D., Yin L., Malburg L., You Z. Laboratory evaluation and field demonstration of cold in-place recycling asphalt mixture in Michigan low-volume road // *Case Studies in Construction Materials*: 20, 2024; P. e02923. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02923>. EDN DEKCHW.
4. Niță A., Petrescu M.G., Dumitru T., Burlacu A., Tănase M., Laudacescu E., Ramadan I. Experimental research on the wear behavior of materials used in the manufacture of components for cement concrete mixers // *Materials*: 16(6), 2023; P. 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>
5. Burlacu A., Petrescu M. G., Răzvan G. R., Dumitru T., Laudacescu E. V., Ramadana I. N., Niță A. Experimental Investigations on Wear Phenomena Specific to Rotary Dryer Flights (Blades) // *Tribology in Industry*: 46(1), 2024; P. 56. <https://doi.org/10.24874/ti.1549.08.23.10>. EDN GBUCUO.
6. Ren Y., Zhang L., Xie G., Li Z., Chen H., Gong H., Luo J. A review on tribology of polymer composite coatings // *Friction*: 9(3), 2021; P. 429–470. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0446-4>. EDN VYQUSV.
7. Seenath A.A., Baig M.M.A., Katiyar J.K., Mohammed A.S.A Comprehensive Review on the Tribological Evaluation of Polyether Ether Ketone Pristine and Composite Coatings // *Polymers*: 16(21), 2024; P. 2994. <https://doi.org/10.3390/polym16212994>. EDN VJHKIU.

8. Zvonkina I.J. Adhesion of polymer coatings: Principles and evaluation // *Industrial Applications for Intelligent Polymers and Coatings*. Cham: Springer International Publishing, 2016; P. 605–617. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26893-4_28
9. Jeandin M., Koivuluoto H., Vezzu S. Coating properties // *Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2015; P. 107–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5_4. EDN WTLYMB.
10. Antony Jose S., Lapierre Z., Williams T., Hope C., Jardin T., Rodriguez R., Menezes P.L. Wear-and corrosion-resistant coatings for extreme environments: advances, challenges, and future perspectives // *Coatings*: 15(8), 2025; P. 878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>. EDN XZCXXL.
11. Wu M., Cao G., Xiao Z. Polyimide-modified epoxy coatings reinforced with functional fillers for enhanced thermal stability and corrosion resistance // *Advanced Composites and Hybrid Materials*: 8(2), 2025; P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01265-6>. EDN GLWYTP.
12. Bhavith K., Prashanth Pai M., Sudheer M., Ramachandra C.G., Maruthi Prashanth B.H., Kiran Kumar B. The effect of metal filler on the mechanical performance of epoxy resin composites // *Engineering Proceedings* : 59(1), 2023; P. 200.
13. Zhao X., Lu S., Li W., Zhang S., Li K., Nawaz K., Webb E. Epoxy as filler or matrix for polymer composites // *Epoxy-Based Composites*: 1, 2022; <https://doi.org/10.5772/intechopen.102448>
14. Abdellaoui H., Raji M., Bouhfid R. Kacem Qaiss A. Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials // *Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing, 2019; P. 29–49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>. EDN ZFOVMO.
15. Chen Y., Hu J., Wu X., Duan S., Wang H., Ma T. Synthesis and Evaluation of Polyurethane as Waterproof Adhesion Layer for Steel Bridge Deck // *Polymers*: 16(22), 2024; P. 3140. <https://doi.org/10.3390/polym16223140> EDN SIMVEE.
16. Zhang R., Huang W., Lyu P., Yan S., Wang X., Ju J. Polyurea for blast and impact protection: A review // *Polymers*: 14(13), 2022; P. 2670. <https://doi.org/10.3390/polym14132670>. EDN AQMRBA.
17. Chu D., Li Z., Yao K., Wang Y., Tian R., Zhuang Z., Liu Z. Studying the strengthening mechanism and thickness effect of elastomer coating on the ballistic-resistance of the polyurea-coated steel plate // *International Journal of Impact Engineering*: 163, 2022; P. 104181. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104181>. EDN FGQFRQ.
18. Fuseini M., Zaghoul M. M. Y., Abakar D., Zaghoul M. M. Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications // *FlatChem*: 49, 2025; P. 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.
19. Singhal V., Shelly D., Saxena A., Gupta R., Verma V. K., Jain A. Study of the influence of nanoparticle reinforcement on the mechanical and tribological performance of aluminum matrix composites-a review // *Lubricants*: 13(2), 2025; P. 93. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020093>. EDN DSSTLO.
20. Khan S.A., Amjad H., Ahmad F., Khan H.A.A. Scientometric Review Summarizing the Impact of Nanomaterials on the Fresh, Hardened, and Durability Properties of Cement-Based Materials // *Advances in Civil Engineering*: 2024(1), 2024; P. 8639483. <https://doi.org/10.1155/adce/8639483>
21. Akbarpour M.R., Mirabad H.M., Alipour S. Microstructural and mechanical characteristics of hybrid SiC/Cu composites with nano-and micro-sized SiC particles // *Ceramics International*: 45(3), 2019; P. 3276–3283. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.235>
22. Adhithya K. Investigation of mechanical properties, wear behaviour, and hole quality analysis of Al2014-ZrO2-Sn composites // *Advances in Materials and Processing Technologies*: 11(3), 2025; P. 1644–1687. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2397182>
23. Rethon R., DeArmitt C. Fillers (including fiber reinforcements) // *Brydson's Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann, 2017; P. 169–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00008-6>
24. Schmid F. Understanding and modeling polymers: The challenge of multiple scales // *ACS Polymers Au*: 3(1), 2022; P. 28–58. <https://doi.org/10.1021/acspolymersau.2c00049>. EDN UHRZMJ.
25. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Arcentales-Vera B., Pardo S., Bucio E. Interaction between filler and polymeric matrix in nanocomposites: Magnetic approach and applications // *Polymers*: 13(17), 2021; P. 2998. <https://doi.org/10.3390/polym13172998>. EDN FGNUBF.
26. Rao Y.S., Mohan N.S., Shetty N., Shivamurthy B. Effects of solid lubricant fillers on the flexural and shear strength response of carbon fabric-epoxy composites // *Polymer Testing*: 96, 2021; P. 107085. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107085>. EDN MRNPJG.
27. Sarkar M., Mandal N. Solid lubricant materials for high temperature application: A review // *Materials Today: Proceedings*: 66, 2022; P. 3762–3768. DOI 10.1016/j.matpr.2022.06.030. EDN LVQWCT.
28. Fuseini M., Zaghoul M.M.Y., Abakar D., Zaghoul M.M.Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications // *FlatChem*: 49, 2025; P. 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.
29. Tüfekci M., Baytak T., Bulut O., Pir İ., Acarer Arat S., Özkal B., Salles L. Nonlinear behaviour of epoxy and epoxy-based nanocomposites: an integrated experimental and computational analysis // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*: 52(9), 2024; P. 6858–6888. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2293763>. EDN CKTOQV.

REFERENCES

1. Pakes A., Edil T., Sanger M., Olley R., Klink T. Environmental benefits of cold-in-place recycling. *Transportation Research Record*. 2018; 2672(24): 11–19. <https://doi.org/10.1177/0361198118758691>

2. Cao R., Li H., Yao L., Jiang J., Leng Z., Ni F., Zhao Z. Comparative analysis of cold in-place recycling for roadway maintenance and rehabilitation from the perspectives of technical-cost-environmental nexus. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 439: 140768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140768>. EDN EUDJXU.
3. Jin D., Yin L., Malburg L., You Z. Laboratory evaluation and field demonstration of cold in-place recycling asphalt mixture in Michigan low-volume road. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20: e02923. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02923>. EDN DEKCHW.
4. Niță A., Petrescu M.G., Dumitru T., Burlacu A., Tănase M., Laudacescu E., Ramadan I. Experimental research on the wear behavior of materials used in the manufacture of components for cement concrete mixers. *Materials*. 2023; 16(6): 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>
5. Burlacu A., Petrescu M.G., Răzvan G.R., Dumitru T., Laudacescu E.V., Ramadana I.N., Niță A. Experimental Investigations on Wear Phenomena Specific to Rotary Dryer Flights (Blades). *Tribology in Industry*. 2024; 46(1): 56. <https://doi.org/10.24874/ti.1549.08.23.10>. EDN GBUCUO.
6. Ren Y., Zhang L., Xie G., Li Z., Chen H., Gong H., Luo J. A review on tribology of polymer composite coatings. *Friction*. 2021; 9(3): 429-470. DOI 10.1007/s40544-020-0446-4. EDN VYQUSV.
7. Seenath A.A., Baig M.M.A., Katiyar J.K., Mohammed A.S. A Comprehensive Review on the Tribological Evaluation of Polyether Ether Ketone Pristine and Composite Coatings. *Polymers*. 2024; 16(21): 2994. <https://doi.org/10.3390/polym16212994>. EDN VJHKIU.
8. Zvonkina I.J. Adhesion of polymer coatings: Principles and evaluation. In: *Industrial Applications for Intelligent Polymers and Coatings*. Cham: Springer International Publishing; 2016; p. 605-617. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26893-4_28.
9. Jeandin M., Koivuluoto H., Vezzu S. Coating properties. In: *Modern Cold Spray: Materials, Process, and Applications*. Cham: Springer International Publishing; 2015; p. 107-224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5_4. EDN WTLYMB.
10. Antony Jose S., Lapierre Z., Williams T., Hope C., Jardin T., Rodriguez R., Menezes P.L. Wear and corrosion-resistant coatings for extreme environments: advances, challenges, and future perspectives. *Coatings*. 2025; 15(8): 878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>. EDN XZCXXL.
11. Wu M., Cao G., Xiao Z. Polyimide-modified epoxy coatings reinforced with functional fillers for enhanced thermal stability and corrosion resistance. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2025; 8(2): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01265-6>. EDN GLWYTP.
12. Bhavith K., Prashanth Pai M., Sudheer M., Ramachandra C.G., Maruthi Prashanth B.H., Kiran Kumar B. The effect of metal filler on the mechanical performance of epoxy resin composites. *Engineering Proceedings* : 59(1), 2023; P. 200. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059200>
13. Zhao X., Lu S., Li W., Zhang S., Li K., Nawaz K., Webb E. Epoxy as filler or matrix for polymer composites. *Epoxy-Based Composites*. 2022; 1. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102448>
14. Abdellaoui H., Raji M., Bouhfid R., el kacem Quiss A. Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. In: *Failure analysis in biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing; 2019; p. 29-49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>. EDN ZFOVMO.
15. Chen Y., Hu J., Wu X., Duan S., Wang H., Ma T. Synthesis and Evaluation of Polyurethane as Waterproof Adhesion Layer for Steel Bridge Deck. *Polymers*. 2024; 16(22): 3140. <https://doi.org/10.3390/polym16223140>. EDN SIMVEE.
16. Zhang R., Huang W., Lyu P., Yan S., Wang X., Ju J. Polyurea for blast and impact protection: A review. *Polymers*. 2022; 14(13): 2670. <https://doi.org/10.3390/polym14132670>. EDN AQMRBA.
17. Chu D., Li Z., Yao K., Wang Y., Tian R., Zhuang Z., Liu Z. Studying the strengthening mechanism and thickness effect of elastomer coating on the ballistic-resistance of the polyurea-coated steel plate. *International Journal of Impact Engineering*. 2022; 163: 104181. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104181>. EDN FGQFRQ.
18. Fuseini M., Zaghloul M.M.Y., Abakar D., Zaghloul M.M.Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications. *FlatChem*. 2025; 49: 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.
19. Singhal V., Shelly D., Saxena A., Gupta R., Verma V.K., Jain A. Study of the influence of nanoparticle reinforcement on the mechanical and tribological performance of aluminum matrix composites-a review. *Lubricants*. 2025; 13(2): 93. <https://doi.org/10.3390/lubricants13020093>. EDN DSSTLO.
20. Khan S.A., Amjad H., Ahmad F., Khan H.A. A Scientometric Review Summarizing the Impact of Nanomaterials on the Fresh, Hardened, and Durability Properties of Cement-Based Materials. *Advances in Civil Engineering*. 2024; 2024(1): 8639483. <https://doi.org/10.1155/adce/8639483>
21. Akbarpour M.R., Mirabad H.M., Alipour S. Microstructural and mechanical characteristics of hybrid SiC/Cu composites with nano- and micro-sized SiC particles. *Ceramics International*. 2019; 45(3): 3276-3283. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.235>
22. Adhithya K. Investigation of mechanical properties, wear behaviour, and hole quality analysis of Al2014-ZrO2-Sn composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2025; 11(3): 1644-1687. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2024.2397182>
23. Rothon R., DeArmitt C. Fillers (including fiber reinforcements). In: *Brydson's Plastics Materials*. Butterworth-Heinemann; 2017; p. 169-204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00008-6>
24. Schmid F. Understanding and modeling polymers: The challenge of multiple scales. *ACS Polymers Au*. 2022; 3(1): 28-58. <https://doi.org/10.1021/acspolymersau.2c00049>. EDN UHRZMJ.

25. Bustamante-Torres M., Romero-Fierro D., Arcentales-Vera B., Pardo S., Bucio E. Interaction between filler and polymeric matrix in nanocomposites: Magnetic approach and applications. *Polymers*. 2021; 13(17): 2998. <https://doi.org/10.3390/polym13172998>. EDN FGNUBF.

26. Rao Y.S., Mohan N.S., Shetty N., Shivamurthy B. Effects of solid lubricant fillers on the flexural and shear strength response of carbon fabric-epoxy composites. *Polymer Testing*. 2021; 96: 107085. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107085>. EDN MRNPJG.

27. Sarkar M., Mandal N. Solid lubricant materials for high temperature application: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 66: 3762-3768. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.030>. EDN LVQWCT.

28. Fuseini M., Zaghloul M.M.Y., Abakar D., Zaghloul M.M.Y. Review of epoxy nano-filled hybrid nanocomposite coatings for tribological applications. *FlatChem*. 2025; 49: 100768. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2024.100768>. EDN AYQWAO.

29. Tüfekci M., Baytak T., Bulut O., Pir İ., Acarer Arat S., Özkal B., Salles L. Nonlinear behaviour of epoxy and epoxy-based nanocomposites: an integrated experimental and computational analysis. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2024; 52(9): 6858-6888. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2293763>. EDN CKTOQV.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Зорин В.А. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, редактирование материала статьи.

Нгуен Куанг Хай. Постановка задач и методик проведения исследования, обзор предшествующих исследований, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zorin V.A. Organization of the authorship team, designing the research concept, the research problem identification, setting research objectives and methodology, editing the manuscript.

Nguyen Q.H. Setting research objectives and methodology, state-of-the-art analysis, conducting experiments, processing the data obtained, writing the manuscript.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Куанг Хай – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7713-915X>,

e-mail: nguyenquanghai2796@gmail.com

Зорин Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожно-строительных машин» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7392-8318>,

SPIN-код: 5612-1652,

e-mail: madi-dm@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nguyen Quang Hai – postgraduate student, Department of Automobile and Road Machinery Manufacturing and Maintenance, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Prospect, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7713-915X>,

e-mail: nguyenquanghai2796@gmail.com

Zorin Vladimir Alexandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobile and Road Machinery Manufacturing and Maintenance, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradsky Prospect, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7392-8318>,

SPIN-code: 5612-1652,

e-mail: madi-dm@list.ru