

УДК 621.891 + 06

## Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию

Н. В. Зиновьев<sup>1</sup>, П. В. Харламов<sup>2</sup>, Я. К. Склифус<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет, Россия, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

<sup>2</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2

**Для цитирования:** Зиновьев Н. В., Харламов П. В., Склифус Я. К. Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 196–207. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-196-207

### Аннотация

**Цель:** исследование образцов наноструктурированного материала. В работе представлены результаты лабораторных испытаний образцов смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию, а также результаты проведения испытаний по температурной стойкости. **Методы:** в ходе исследований выяснилось, что существующие методы оценки трибологических характеристик смазочных материалов изначально ориентированы исключительно на жидкие и пластичные составы. **Результаты:** предложен метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик материала, способный обеспечить высокую точность измерений с учетом приближения условий испытаний к эксплуатационным особенностям работы. **Практическая значимость:** положен задел для расширения номенклатуры и повышения качества смазочных материалов. Предложенный подход дает возможность существенно увеличить ресурс тяжело нагруженных узлов трения, снизить энергозатраты на функционирование механизмов, а также расширить температурный диапазон эффективной работы смазочных материалов, обеспечив при этом экологическую безопасность производственных процессов за счет использования доступных и безопасных компонентов.

**Ключевые слова:** смазочный материал, структура, концентрация компонента, поверхность трения, рецептура смазочного материала, лабораторные испытания, триботехническая пара

### Введение

Эффективность, надежность и долговечность транспортных систем во многом определяются соответствующими характеристиками ключевых узлов трения, таких как гасители колебаний, контакт «колесо-рельс», тормозные механизмы, муфты сцепления, опоры качения или скольжения, зубчатые зацепления и другие.

С учетом указанных особенностей в качестве модельной системы — открытого тяжело нагруженного узла трения — для оптимизации состава наноструктурированного смазочного материала был выбран контакт «колесо-рельс», то есть взаимодействие гребня железнодорожного колеса с боковой поверхностью головки рельса.

Свойства смазочных материалов в узлах трения формируются под влиянием множества разнородных факторов. На них воздействуют как внешние условия (нагрузка, скорость движения, состав и свойства окружающей среды, температура), так и характеристики самих деталей (физико-механические свойства материалов, технология обработки поверхностей, геометрия контактирующих поверхностей), а также конструктивные особенности узла в целом.

Работоспособность смазочного материала в трибосопряжении определяется уникальным сочетанием всех этих факторов. Их многочисленность и вероятностный характер влияния в реальных условиях существенно ограничивают возможности расчетного прогнозирования свойств смазочных материалов на этапах исследования и разработки. По этой причине наиболее достоверные данные о свойствах различных смазочных материалов по-прежнему получают экспериментальным путем — в ходе натурных испытаний.

В настоящее время наиболее широко применяемым и информативным способом оценки смазывающих свойств жидких и пластичных смазочных материалов считается метод определения трибологических характеристик с использованием четырехшариковой машины. Данная методика регламентирована стандартом ГОСТ 949075.

Предлагаемый способ соответствует международным стандартам DIN 51 350 и ASTM D 2266, что обеспечивает сопоставимость результатов, полученных по отечественному стандарту, с зарубежными данными [1].

Принцип работы четырехшариковой машины трения заключается в моделировании скольжения на контактных поверхностях шариков. В установке три нижних шарика зафиксированы в чаше неподвижно, тогда как верхний шарик движется с постоянной скоростью.

В процессе испытаний нагрузка постепенно увеличивается, при этом непрерывно регистрируются величина силы трения и степень износа контактирующих поверхностей.

Анализ кривой износа дает возможность определить ряд ключевых показателей. Так, по точкам перегиба на кривой выявляют критическую нагрузку ( $P_k$ ), нагрузку сваривания ( $P_c$ ) и нагрузочную (несущую) способность. Индекс задира ( $I_z$ ) вычисляют на основании предельного давления. Характер изнашивания и показатель износа оценивают по пятнам износа на шариках.

Зависимость износа ( $D_{и}$ ) от нагрузки ( $P$ ) графически отображается в виде кривой износа (рис. 1). Интенсивность износа на участке от начала испытаний до момента сваривания определяется противозадирными свойствами смазочного материала — его способностью минимизировать износ. Именно эта характеристика отражается в индексе задира ( $I_z$ ).

На начальном этапе кривой (участок АВ) износ протекает в условиях граничного трения и находится в прямой пропорциональной зависимости от приложенной

нагрузки. В данном режиме соотношение между величиной нагрузки и степенью износа остается постоянным. Именно по этому фрагменту кривой оценивают антифрикционные и противоизносные свойства смазочного материала.

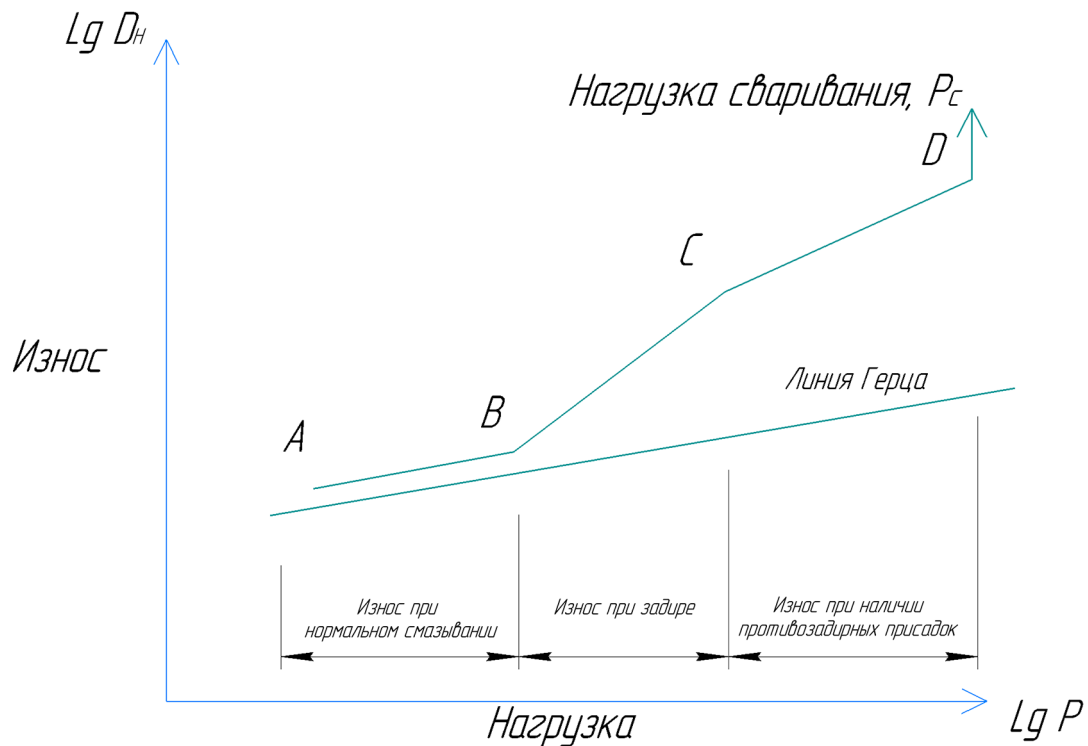


Рис. 1. Кривая износа, полученная на 4-шариковой машине трения

Критические точки износа выявляют по характерным точкам перегиба на кривой. Критическая нагрузка ( $P_k$ ) — это предельное значение нагрузки, при превышении которого начинается интенсивный износ вследствие схватывания поверхностей. Такое схватывание возникает из-за разрыва смазочной пленки. Величина  $P_k$  отражает максимальную нагрузку, которую смазочный материал способен выдержать без разрушения пленки; ее также называют несущей способностью.

Нагрузка сваривания ( $P_c$ ) представляет собой предельно допустимую нагрузку, при превышении которой происходит схватывание (сваривание) шаров — верхний шарик перестает вращаться и фиксируется в неподвижном положении.

На основе анализа предварительной информации и с учетом специфики эксплуатации открытых тяжело нагруженных узлов трения было установлено, что для подобных трибосистем оптимальным решением является применение наноструктурированного смазочного материала в форме твердопластичного смазочного материала покрытия (ТПСМП).

Стоит подчеркнуть, что методика оценки трибологических характеристик с использованием четырехшариковой машины разработана исключительно для

анализа смазочных свойств жидких и пластичных материалов. Данный метод не принимает во внимание специфические особенности твердых и твердопластичных смазочных покрытий, включая разрабатываемый наноструктурированный смазочный материал для открытых тяжело нагруженных узлов трения (в том числе ТПСМП) [2].

Вследствие этого до настоящего момента не существовало возможности объективно и с высокой точностью оценить эксплуатационные и трибологические характеристики такого материала, а также определить, как эти параметры влияют на эффективность его работы.

### **Метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик**

Для решения задачи оценки триботехнических характеристик твердых и твердопластичных смазочных материалов, а также для анализа стойкости колесных пар при их применении потребовалось разработать новые подходы и методики.

В результате был создан метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик, основанный на современных способах неразрушающего контроля, динамического мониторинга и компьютерных технологий. Суть метода заключается в определении и оценке ключевых трибологических параметров смазочных материалов при смазывании рабочих поверхностей открытых узлов трения в конкретных механических системах.

### **Аппаратура и материалы**

Для оценки эффективности Т и ТПСМП применялся метод анализа трибологических и трибоспектральных характеристик с использованием специализированного оборудования.

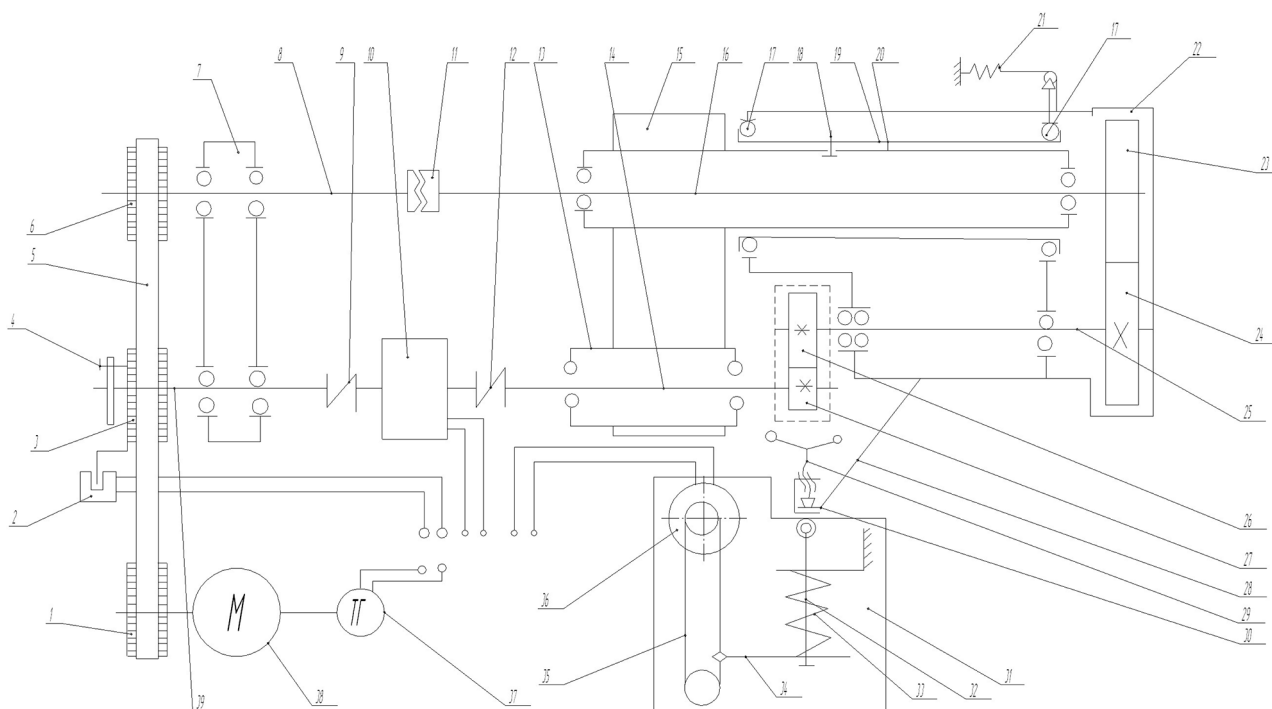
Основным инструментом для моделирования контакта гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса служит роликовая аналогия, принцип работы которой основан на эффекте проскальзывания. Главное преимущество такого инструмента — программная имитация скольжения, позволяющая приблизить эксперимент к реальным условиям. На текущий момент реализовать такой вид управляемого взаимодействия возможно на машине трения Amsler. При этом становится возможным создавать условия от чистого качения до полного скольжения роликов, что позволяет воспроизводить различные виды узлов трения. Оборудование универсально: оно совместимо со всеми типами смазочных материалов (от жидких до твердых) и поддерживает разные способы их нанесения, включая ротационный, аккумулятивно-ротационный, капельный и разовый.

Комплекс измерительной аппаратуры обеспечивает непрерывный мониторинг ключевых параметров процесса: отслеживает изменения момента трения

и температуры в зоне контакта, фиксирует линейный износ образцов и переходное сопротивление контакта.

В ходе лабораторных исследований наноструктурированного смазочного материала для оценки трибологических характеристик и ресурса к истиранию использовалась установка 2070 СМТ-1. Ее кинематическая схема представлена на рис. 2 и содержит все ключевые узлы машины, вовлеченные в процесс имитации трибологического контакта. Из схемы видно, что данный механизм способен прикладывать регулируемое усилие, задающееся осью-винтом, при этом диапазон усилия варьируется в 10 раз.

Из контрольно-измерительной аппаратуры машина содержит в себе датчик усилия крутящего момента, линейный датчик силы для регистрации прилагаемой нагрузки и непосредственно датчик угловой скорости. Данные устройства минимизируют погрешность измерений, позволяя достаточно точно оценить комплексные параметры.



**Рис. 2.** Кинематическая схема машины 2070 СМТ-1

В процессе испытаний измеритель момента трения в режиме статического нагружения обеспечивает высокую точность: допустимое среднеквадратическое отклонение случайной составляющей приведенной погрешности не превышает 1%. Фиксация числа циклов вращения нижнего образца выполняется с помощью бесконтактного выключателя — датчика числа циклов 2.

Величина проскальзывания между роликами при условии, что радиус роликов идентичен, выполняется путем изменения диаметра приводного шкива (6).

Регулировка угловой скорости вращения нижнего образца достигается заменой шкива (1), а точная настройка в заданных пределах реализуется посредством электродвигателя (38).

Система поддерживает два диапазона измерения частоты вращения вала нижнего образца. При этом предельно допустимая погрешность измерителя частоты вращения сохраняется в пределах  $\pm 3\%$ .

Для сбора и обработки экспериментальных данных применяется автоматизированная система. Она объединяет персональный компьютер типа IBM/PC с усиливающим устройством датчика уровня вибрации, имеющим синхронизацию. Функционирование комплекса обеспечивается соединительными кабелями, источником питания и специализированным программным обеспечением.

Для оценки эффективности твердых (Т) и твердопластичных смазочных материалов покрытий (ТПСМП) согласно методу анализа трибологических и трибоспектральных характеристик рекомендуются испытания по схемам «ролик-ролик» и «ролик-звездочка».

В рамках лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала из колесной и рельсовой стали были изготовлены роликовые образцы трения. Эти образцы моделируют колесо и рельс соответственно и созданы с учетом геометрических параметров, полученных в ходе физико-математического моделирования (рис. 3).

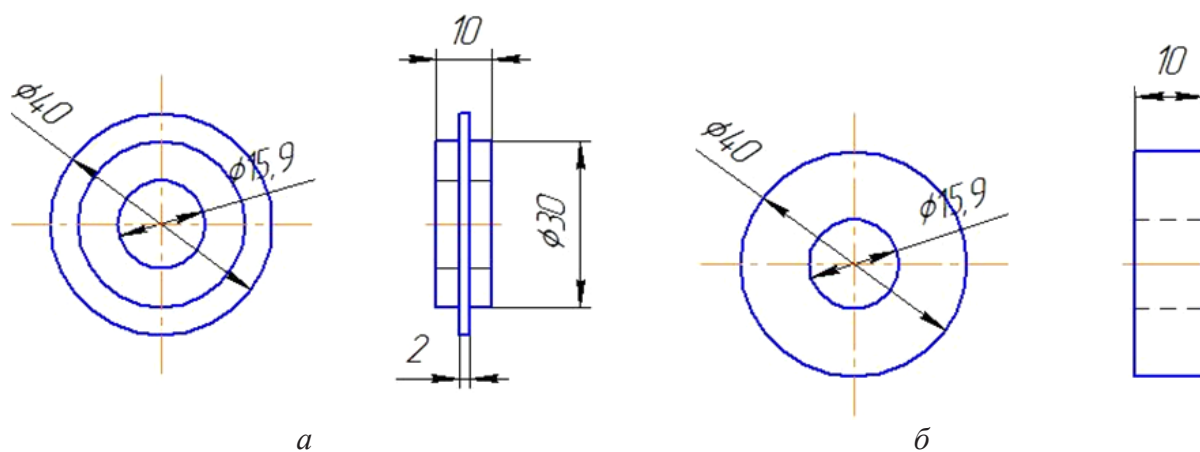


Рис. 3. Роликовые образцы трения, *a* — модель колеса, *б* — модель рельса

Для проведения взвешивания применялись электронные весы моделей WA35 и ВЛК500 г.

Для удаления избыточного объема твердого (Т) и твердопластичного смазочного материалопокрытия (ТПСМП), выдавленного в процессе испытаний с поверхностей верхнего и нижнего роликовых образцов, используются шпатели под номерами 1 и 2 соответственно.

Для удаления загрязнений и остатков смазочного материала с роликовых образцов использовали растворитель Нефрас марки СЗ 80/120 (БР1 «Галоша»), после применения которого на образцах отсутствует проявление характерной масляной пленки.

Опытные образцы наноструктурированного смазочного материала, предназначенные для открытых тяжело нагруженных узлов трения, были изготовлены в виде цилиндров (стержней) с геометрическими параметрами: длина — 110 мм, диаметр — 20 мм. Всего изготовлено 27 образцов с варьируемым содержанием компонентов.

### *Подготовительный этап*

Перед началом испытаний твердых (Т) и твердопластичных смазочных материалов покрытий (ТПСМП) все детали, контактирующие с ними, подлежат тщательной очистке. Процедура осуществляется следующим образом:

1. Детали промывают несколькими (3–5) порциями растворителя или иного аналогичного средства, обладающего высокой растворяющей способностью по отношению к Т и ТПСМП. Растворитель эффективно удаляет как поверхностные загрязнения, так и остаточные слои смазочных материалов.

2. Промывку продолжают до полного осветления растворителя, что свидетельствует об удалении всех загрязнений. Каждую последующую порцию растворителя используют только после того, как предыдущая стала визуально прозрачной.

3. После завершения промывки детали размещают в хорошо проветриваемом месте и оставляют для естественной просушки на открытом воздухе. Сушку проводят до полного испарения растворителя и достижения комнатной температуры поверхности деталей.

4. Контроль качества очистки осуществляют визуально: на поверхностях не должно оставаться следов загрязнений, разводов или масляных пятен.

### *Проведение испытаний*

В процессе испытаний наноструктурированный смазочный материал (Т и ТПСМП) распределяют по контуру, имитирующему гребень колеса (верхний ролик). Нанесение выполняют методом натирания.

При этом нагрузочные и скоростные параметры (PV) устанавливают в строгом соответствии с разделами а–г специально разработанного метода оценки трибологических и трибоспектральных характеристик. При задании параметров учитывают константы подобия, которые были получены в ходе физико-математического моделирования.

Для лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения предвари-

тельно определены ключевые параметры: нагрузка составляет 1000 Н, контактное давление — 1,32 ГПа, средняя частота оборотов — 300 об/мин.

Испытания выполняются серией отдельных определений — для каждого задействуют свежую пробу исследуемого Т и ТПСМП и новые роликовые образцы. В ходе исследования идет постоянная регистрация крутящего момента, производится регистрация коэффициента трения расчетным методом, а также ведется регистрация скорости вращения образцов.

При приближении к значениям коэффициента сухого трения принимают момент полного истирания смазочного покрытия. Здесь характерны проявления первичных признаков износа. Показатель стойкости к истиранию вычисляют как среднее арифметическое значение по результатам не менее трех экспериментов.

Важнейшим аспектом испытаний на истираемость является определение оптимального объема смазочного материала, наносимого на образец, поскольку эта величина напрямую влияет на оценку его расхода в реальных условиях эксплуатации. Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии четко определенных физических условий, формирующих толщину невыдавливаемого слоя смазочного материала. Именно эта толщина определяет работоспособность материала после однократного нанесения. В рамках применяемого метода предусмотрен контроль количества смазочного материала как при его нанесении, так и в процессе проведения испытаний.

Метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик реализуется посредством последовательности следующих действий:

1. Исследуемые роликовые образцы подвергают взвешиванию с использованием электронных весов. Затем подготовленные образцы монтируют на машину трения типа Amsler.

2. На вращающийся верхний роликовый цилиндрический образец, который имитирует гребень колеса, наносят Т и ТПСМП методом натирания. После этого проводят повторное взвешивание роликовых образцов — это позволяет точно установить массу нанесенного смазочного материала.

3. Обработанные образцы вновь устанавливают на машину трения Amsler. На следующем этапе к ним прикладывают нагрузку и в течение 10 секунд выполняют приработку Т и ТПСМП.

4. В завершение из зоны фрикционного взаимодействия удаляют излишки смазочного материала.

5. Исследуемые образцы взвешивают на электронных весах. Это позволяет определить массу невыдавленного объема Т и ТПСМП после его однократного нанесения на роликовые образцы.

6. Образцы вновь устанавливают на машину трения. На этом этапе проводят испытания, в ходе которых определяют триботехнические и трибоспектральные характеристики материала, а также оценивают ресурс невыдавленного объема смазочного материала при его разовом нанесении.

Для проведения испытаний с регулированием температуры окружающей среды активируют криокамеру. После того как внутри камеры установится требуемая температура, запускают привод машины трения. При этом выбирают режим, который обеспечивает заданные параметры — либо скорость качения, либо скорость скольжения, либо их комбинацию. Лишь после этого к образцам прикладывают необходимую нагрузку [4].

### *Результаты лабораторных исследований опытных образцов*

В рамках разработанной методики были выполнены лабораторные исследования 27 опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения. Основанием для проведения экспериментов послужили численные значения нагрузочно-скоростных параметров, полученные при физико-математическом моделировании как натурального, так и модельного объектов. В ходе исследований осуществлялось сопоставление трибологических характеристик материалов и оценивался их ресурс к истиранию.

### **Выводы**

В процессе исследований установлено, что современные методы оценки трибологических характеристик смазочных материалов имеют ограниченную область применения. Их разрабатывали исключительно для жидких и пластичных составов, поэтому они не учитывают особенности твердых и твердопластичных смазочных покрытий.

В частности, существующие методики оказались неприменимы для достоверной оценки эффективности наноструктурированного материала, предназначенного для открытых тяжело нагруженных узлов трения. Это создает существенные ограничения при исследовании и внедрении смазочных материалов нового класса.

Для устранения этого пробела был создан метод оценки трибологических и трибоспектральных характеристик. Он дает возможность объективно оценивать эффективность смазочных материалов в любом агрегатном состоянии — жидком, пластичном, твердопластичном, твердом или в форме покрытий. Метод обеспечивает высокую точность измерений и позволяет максимально приблизить условия испытаний к реальным эксплуатационным режимам.

Внедрение данного метода открывает перспективы для расширения номенклатуры смазочных материалов и повышения их качественных показателей.

В рамках исследования были проведены лабораторные испытания опытных образцов смазочных материалов. В ходе экспериментов осуществлялось сравнение трибологических характеристик, ресурса стойкости к истиранию и температурной стойкости. Полученные данные послужат основой для оптимизации состава разрабатываемого наноструктурированного смазочного материала.

**Список источников**

1. Повышение эффективности фрикционной системы «колесо — рельс» / В. В. Шаповалов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2019. Т. 78, № 3. С. 177–182. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182.
2. Майба И. А., Глазунов Д. В. Особенности механизма взаимодействия системы «гребень колеса — боковая грань рельса» в кривой пути // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 6. С. 14–18.
3. Харламов П. В. Мониторинг изменений упруго-диссипативных характеристик для решения задач по исследованию трибологических процессов в системе «железнодорожный путь — подвижной состав» // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 1 (81). С. 122–129. DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_122.
4. Способ модифицирования систем термоплакирования стальных поверхностей трения: патент РФ № RU 2750585 С1. В61К 3/02, № 2020134704 / В. В. Шаповалов [и др.]; заявл. 21.10.2020; опубл. 29.06.2021.
5. Kolesnikov V. I., Ozyabkin A. L., Novikov E. S. Friction wear, and monitoring of heavily loaded tribosystems: an innovative approach to studying the processes // Journal of Friction and Wear. 2019. P. 292–302. DOI: 10.3103/S1068366619040056.
6. Майба И. А., Никитин Е. И., Никитина М. И. Моделирование поведения смазочных материалов при граничном трении методом молекулярной динамики // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 2 (74). С. 29–36.
7. Хуссеин Хайдар А. Твердые композиционные присадки на основе металлизированного графита для пластичных смазочных материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Институт проблем машиноведения РАН. Иваново, 2009. 156 с.
8. Dumitriu M. Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspective // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 371. P. 647–651. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.647.
9. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
10. Программа и методики исследования свойств модифицированного покрытия поверхности трибоконтакта ПП.0203.001-ПМ, ФГБОУ ВО РГУПС, утверждено 24.12.2018. Ростов-на-Дону, 2018. 20 с.
11. Wolter K. U., Zacher M., Slovak B. Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process // 9th World Congress on Railway Research. 2011. May 22–26.

Дата поступления: 27.01.2026

Решение о публикации: 01.03.2026

**Контактная информация:**

ЗИНОВЬЕВ Никита Владимирович — инженер 1-й категории Донского инжинирингового центра; [inbox@n-zinovev.ru](mailto:inbox@n-zinovev.ru)

ХАРЛАМОВ Павел Викторович — д-р техн. наук, доцент; [kcharlamov@yandex.ru](mailto:kcharlamov@yandex.ru)

СКЛИФУС Ярослав Константинович — канд. техн. наук, доцент; [icnps@rgups.ru](mailto:icnps@rgups.ru)

## Laboratory studies of prototype nanostructured lubricants for comparison of tribological properties and abrasion resistance

**N. V. Zinoviev<sup>1</sup>, P. V. Kharlamov<sup>2</sup>, Ya. K. Sklifus<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Don State Technical University, 1 Gagarina sq., 344000, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup> Rostov State University of Communications, 2 Rostov Infantry Regiment sq., 344038, Rostov-on-Don, Russia

**For citation:** *Zinoviev N. V., Kharlamov P. V., Sklifus Ya. K. Laboratory studies of prototype nanostructured lubricants for comparison of tribological properties and abrasion resistance // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 196–207. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-196-207. (In Russian)*

### Abstract

**Objective:** to investigate samples of nanostructured material. This paper presents the results of laboratory tests of lubricant samples designed for open, heavy-duty friction units, aiming to compare tribological properties and abrasion resistance, as well as the results of thermal stability tests. **Methods:** in the course of research, it was established that the existing methods for assessing the tribological characteristics of lubricants are primarily oriented exclusively toward liquid and plastic compositions. **Results:** a method has been proposed for evaluating the fundamental tribotechnical and tribospectral characteristics of the material, capable of ensuring high measurement accuracy while approximating test conditions to the operational specificities of performance. **Practical significance:** a foundation has been laid for expanding the nomenclature and enhancing the quality of lubricants. The proposed approach offers the possibility of significantly increasing the service life of heavy-duty friction units, reducing energy consumption for mechanism operation, and extending the temperature range for the efficient performance of lubricants, while simultaneously ensuring the environmental safety of production processes through the use of accessible and safe components.

**Keywords:** lubricant, structure, component concentration, friction surface, lubricant formulation, laboratory tests, tribotechnical pair

### References

1. Povyshenie effektivnosti friktsionnoj sistemy “koleso — rel’s” / V. V. Shapovalov [i dr.] // Vestnik Nauchno-issledovatel’skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2019. T. 78, no. 3. S. 177–182. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-3-177-182. (In Russian)

2. Majba I. A., Glazunov D. V. Osobennosti mekhanizma vzaimodejstviya sistemy “greben’ kolesa — bokovaya gran’ rel’sa” v krivoj puti // Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh. 2015. No. 6. S. 14–18. (In Russian)

3. Kharlamov P. V. Monitoring izmenenij uprugo-dissipativnykh kharakteristik dlya resheniya zadach po issledovaniyu tribologicheskikh protsessov v sisteme “zheleznodorozhnyj put’ —

podvizhnoj sostav” // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2021. No. 1 (81). S. 122–129. DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_122. (In Russian)

4. Sposob modifitsirovaniya sistem termoplakirovaniya stal’nykh poverkhnostej treniya: patent RF № RU 2750585 C1. B61K 3/02, № 2020134704 / V.V. Shapovalov [i dr.]; zayavl. 21.10.2020; opubl. 29.06.2021. (In Russian)

5. Kolesnikov V.I., Ozyabkin A.L., Novikov E.S. Friction, Wear and monitoring of heavily loaded tribosystems: an innovative approach to studying the processes // Journal of Friction and Wear. 2019. P. 292–302. DOI: 10.3103/S1068366619040056.

6. Majba I.A., Nikitin E.I., Nikitina M.I. Modelirovanie povedeniya smazochnykh materialov pri granichnom trenii metodom molekulyarnoj dinamiki // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2019. No. 2 (74). S. 29–36. (In Russian)

7. Khussein Khajdar A. Tverdye kompozitsionnye prisadki na osnove metallizirovannogo grafita dlya plastichnykh smazochnykh materialov: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.04 / Institut problem mashinovedeniya RAN. Ivanovo, 2009. 156 s. (In Russian)

8. Dumitriu M. Modeling of railway vehicles for virtual homologation from dynamic behavior perspective // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 371. P. 647–651. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.647.

9. Evdokimov Yu.A., Kolesnikov V.I., Teterin A.I. Planirovanie i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa. M.: Nauka, 1980. 228 s. (In Russian)

10. Programma i metodiki issledovaniya svoystv modifitsirovannogo pokrytiya poverkhnosti tribokontakta PP.0203.001-PM, FGBOU VO RGUPS, utverzhdeno 24.12.2018. Rostov-na-Donu, 2018. 20 s. (In Russian)

11. Wolter K.U., Zacher M., Slovak B. Correlation between track geometry quality and vehicle reactions in the virtual rolling stock homologation process // 9th World Congress on Railway Research. 2011. May 22–26.

Received: 27.01.2026

Accepted: 01.03.2026

#### Author’s information:

Nikita V. ZINOVEV — Category 1 Engineer of the Don Engineering Center; [inbox@n-zinovev.ru](mailto:inbox@n-zinovev.ru)

Pavel V. KHARLAMOV — Dr. Sci. of Engineering, Associate Professor; [kcharlamov@yandex.ru](mailto:kcharlamov@yandex.ru)

Yaroslav K. SKLIFUS — PhD in Engineering, Associate Professor; [icnps@rgups.ru](mailto:icnps@rgups.ru)