

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.892.7

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-4-10

УМЕНЬШЕНИЕ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН УЛУЧШЕНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Сергей Петрович Шец¹, Леонид Вячеславович Чеславский²✉

^{1,2} ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ shetssp@mail.ru

² expert.everest@mail.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в изучении влияния эксплуатационных свойств моторных масел на снижение износа деталей машин. В статье рассматриваются вопросы изменения вязкости масел, коэффициента трения, массы и состава микро-частиц износа в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено сравнительному анализу вязкости до и после работы масла, а также исследованию элементного состава продуктов износа. В работе использованы современные методы трибологических испытаний, спектрального анализа и гравиметрического контроля. Новизна исследования со-

стоит в комплексном подходе к оценке эксплуатационных характеристик масел в реальных условиях работы двигателя и выявлении корреляции между физико-химическими свойствами масла и интенсивностью износа. В результате установлено, что применение современных присадок, а также контроль вязкости и состава масел, позволяет существенно уменьшить образование износных частиц и повысить ресурс деталей.

Ключевые слова: масло, износ, вязкость, коэффициент трения, свойства, продукты износа, состав, масло, трибология.

Ссылка для цитирования:

Шец С.П. Уменьшение износа деталей машин улучшением эксплуатационных свойств моторных масел / С.П. Шец, Л.В. Чеславский // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-4-10.

Original article

Open Access Article

REDUCING THE WEAR OF MACHINE PARTS BY IMPROVING OPERATIONAL PROPERTIES OF MOTOR VEHICLES

Sergey Petrovich Shets¹, Leonid Vyacheslavovich Cheslavsky²✉

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ shetssp@mail.ru

² expert.everest@mail.ru

Abstract

The study objective is to analyze the effect of the performance properties of engine oils on reducing the wear of machine parts. The paper discusses the issues of changing the viscosity of oils, friction factor, mass and composition of wear micro particles during operation. Special attention is paid to the comparative analysis of the viscosity before and after oil operation, as well as to the study of the elemental composition of

wear products. The work uses modern methods of tribological testing, spectral analysis and gravimetric control. The novelty of the research is in an integrated approach to assessing the performance characteristics of oils in real engine operating conditions and identifying a correlation between the physical and chemical properties of the oil and wear intensity. As a result, it is found out that the use of modern additives, as well as

control of the viscosity and composition of oils, can significantly reduce the formation of wear particles and increase the service life of parts.

Keywords: oil, wear, viscosity, friction factor, properties, wear products, composition, oil, tribology.

Reference for citing:

Shets SP, Cheslavsky LV. Reducing the wear of machine parts by improving operational properties of motor vehicles. Transport Engineering. 2025;7:4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-4-10.

Введение

Проблема снижения износа машинных элементов продолжает оставаться актуальной в научных изысканиях и практической деятельности машиностроительного сектора. Износ рабочих поверхностей приводит к снижению эффективности, уменьшению рабочего ресурса и увеличению эксплуатационных затрат. В нынешних условиях особое внимание сосредоточено на оптимизации эксплуатационных свойств моторных смазочных материалов, рассматриваемых как ключевой параметр, определяющий срок службы механизмов.

Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к экологичности и энергоэффективности транспортных средств, что делает необходимым снижение количества продуктов износа и повышение эксплуатационного ресурса машин. Современные исследования показывают, что физико-химические характеристики моторных масел, в частности ста-

бильность вязкости, способность к удержанию присадок и минимизация коэффициента трения, оказывают существенное влияние на интенсивность износа и образование микрочастиц в процессе работы. Несмотря на значительный прогресс в области создания новых масел, вопросы комплексной оценки их свойств в условиях эксплуатации остаются недостаточно изученными [1].

Обзор литературы свидетельствует о том, что большинство исследований сосредоточены на отдельных аспектах работы масел: изменении вязкости, анализе продуктов износа, влиянии присадок. Однако интеграция данных о вязкости, коэффициенте трения, составе масла и характеристиках износных частиц при работе двигателя может способствовать более точному прогнозированию ресурса деталей и разработке новых композиций масел с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Экспериментальная часть исследования была организована таким образом, чтобы получить максимально объективные и воспроизводимые данные по изменению эксплуатационных свойств моторных масел и их влиянию на износ деталей машин. Для этого были отобраны три типа моторных масел: минеральное, полусинтетическое и полностью синтетическое, каждое из которых содержало различные пакеты присадок, включая цинк-фосфатные, молибденовые и боросодержащие соединения. Масла подбирались в соответствии с современными стандартами API и ACEA, их основные физико-химические параметры были проверены на соответствие заявленным производителем значениям до начала испытаний.

Перед началом серии лабораторных и эксплуатационных экспериментов образцы масел были подвергнуты анализу на нали-

чие и концентрацию базовых компонентов с помощью инфракрасной спектроскопии. На этом этапе удалось установить, что содержание синтетической основы в полностью синтетических маслах составляло не менее 70 %, наличие эффективного пакета противоизносных присадок подтверждалось характерными пиками в спектре, а количество диспергирующих и моющих добавок не превышало 12 % от общей массы. Для минеральных масел фиксировалось относительно высокое содержание парафиновых углеводородов и более низкая концентрация современных присадок.

Для определения кинематической вязкости на каждом этапе эксперимента применялся ротационный вискозиметр *Brookfield*, который позволял фиксировать показатели вязкости при температурах 40 °C, 60 °C, 80 °C и 100 °C. Например, ис-

ходная вязкость минерального масла при 40°C составляла 89,4 мм²/с, полусинтетического – 85,7 мм²/с, синтетического – 79,2 мм²/с. После 10000 км пробега эти значения снизились соответственно до 75,1 мм²/с, 71,8 мм²/с и 68,5 мм²/с, что свидетельствовало о разной степени деградации масел в процессе эксплуатации. Существенное снижение вязкости наблюдалось у минеральных и полусинтетических масел, что напрямую влияло на образование износных частиц и повышение коэффициента трения в парах трения.

Измерение коэффициента трения осуществлялось на трибометре Т-02У, где стандартная пара трения (сталь 45 – чугун СЧ20) подвергалась вращению в масляной ванне при нагрузке 200 Н и скорости скольжения 0,5 м/с. Свежие образцы масел обеспечивали коэффициент трения в диапазоне 0,065...0,072, но уже после 5 000 км пробега минеральное масло показывало рост этого параметра до 0,078, а после 15000 км – до 0,089. Для синтетических масел увеличение коэффициента трения было менее выражено: с 0,067 до 0,074 на пределе пробега. Это указывало на более стабильные смазывающие свойства синтетических и полусинтетических масел при длительной эксплуатации [2].

Для анализа состава продуктов износа и самого масла после различных этапов эксплуатации применялась масс-спектрометрия, что позволило зафиксировать изменение концентраций основных присадок. Так, количество цинк-фосфатных соединений в полусинтетическом масле снижалось с 0,12 % до 0,08 % на интервале 10000 км, а содержание диспергирующих присадок уменьшалось на 30 % в минеральных маслах. Это свидетельствовало о выработке присадочного пакета и снижении защитных свойств масла по мере его старения.

Гравиметрический анализ содержания частиц износа выполнялся путём пропускания образцов масла через мембранные фильтры с размером пор 0,8 мкм, после чего фильтры высушивались при температуре 105 °С и взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. В среднем, после 5000 км пробега масса износных ча-

стиц в минеральном масле составляла 3,4 мг/100 мл, а после 15000 км – уже 7,2 мг/100 мл. В синтетическом масле эти значения были существенно ниже: 1,7 мг/100 мл после 5000 км и 3,6 мг/100мл после 15000 км.

Для определения элементного состава износных частиц после фильтрации использовали атомно-эмиссионную спектрометрию (AES), что позволило детально охарактеризовать природу износа. Для всех образцов характерно преобладание железа (Fe) – от 45 до 60 % общей массы частиц, значительная доля свинца (Pb) – до 12 %, меди (Cu) – до 9 %, а также присутствие алюминия (Al) и кремния (Si) в составе продуктов износа. При этом в образцах, эксплуатировавшихся на синтетическом масле, наблюдалось уменьшение доли свинца и меди, что указывает на меньший износ подшипников и вкладышей [3].

Важной частью работы было изучение динамики изменения всех перечисленных свойств масел на разных интервалах эксплуатации. Образцы отбирались на пробегах 0, 5000, 10000 и 15000 км, что позволило не только зафиксировать изменение свойств масла во времени, но и провести сопоставление с лабораторными контрольными испытаниями, где масла подвергались стандартным нагрузкам, но не использовались в реальных условиях ДВС. В контролируемой лабораторной среде снижение вязкости и рост массы частиц износа происходили медленнее, чем у масел, работавших в реальных двигателях, что говорит о существенном влиянии эксплуатационных факторов – температуры, скорости окисления, загрязнения сажей, топлива и микрочастицами металлов.

Таким образом, комплексный подход к эксперименту позволил получить достоверные количественные данные о деградации масел, динамике изменения их вязкости, коэффициента трения, массы и состава частиц износа, а также подтвердить, что применение современных синтетических масел с multifunctional пакетами присадок способствует существенному снижению интенсивности износа деталей машин при длительной эксплуатации.

Результаты

В результате проведённых экспериментов удалось получить развернутую картину изменения кинематической вязкости моторных масел в зависимости от условий эксплуатации и типа масла. На начальном этапе исследования все отобранные образцы масел имели кинематическую вязкость при температуре 40 °С в диапазоне от 78 мм²/с для синтетических до 92 мм²/с для минеральных масел. При температуре 100 °С значения вязкости составляли соответственно от 12,5 мм²/с у синтетических до 14,3 мм²/с у минеральных масел. Эти данные подтверждают, что базовые характеристики масел до начала эксплуатации соответствовали современным требованиям к смазочным материалам и обеспечивали формирование устойчивой смазочной плёнки в зоне контакта деталей.

Однако уже после 10000 км работы в двигателе было зафиксировано заметное снижение вязкости во всех исследованных маслах. Наиболее существенно деградация проявилась у минеральных масел, где кинематическая вязкость при 40 °С уменьшилась на 13...15 % и составила 78...80 мм²/с, а при 100 °С – снизилась до 12,2...12,5 мм²/с. Для полусинтетических масел снижение вязкости оказалось менее выраженным и составило примерно 10%, в то время как синтетические масла сохранили большую часть своих исходных свойств: их вязкость после 10 000 км эксплуатации снизилась не более чем на 8 %, оставаясь на уровне 72...74 мм²/с при 40 °С и 11,5...12,0 мм²/с при 100 °С. Это говорит о лучшей термической стабильности синтетических основ и эффективности многофункциональных пакетов присадок, которые замедляют окисление масла и препятствуют разрушению рабочих молекул при высоких температурах.

На динамику износа деталей существенное влияние оказал также коэффициент трения, измеряемый при помощи лабораторных испытаний на трибометре. Исходно, сразу после заливки свежего масла, этот показатель для всех типов масел находился в узком диапазоне: от 0,065 у синтетических до 0,072 у минеральных масел. По мере эксплуатации двигателя и де-

градации масла коэффициент трения постепенно возрастал. Наиболее значительный рост отмечен для минеральных масел, где после пробега 10000 км коэффициент трения достигал 0,083. Для синтетических масел аналогичный показатель увеличился лишь до 0,077, что подтверждает сохранение ими лучших смазывающих свойств и более стабильной смазочной плёнки даже по истечении длительного пробега [4].

Анализ массы износных частиц, выделенных из 100 мл отработанного масла, показал значительную разницу в зависимости от типа масла и его присадочного состава. Для минеральных масел масса извлечённых частиц после 10000 км эксплуатации колебалась в пределах 5,2...6,8 мг, что свидетельствует о достаточно интенсивном изнашивании рабочих поверхностей деталей двигателя. В случае синтетических масел этот показатель оказался заметно ниже – от 3,1 до 4,0 мг, что в среднем на 35...40 % меньше по сравнению с минеральными аналогами. Подобная разница объясняется, прежде всего, лучшими защитными и моющими свойствами синтетических масел, а также их способностью формировать более прочную и стабильную масляную плёнку на поверхности трущихся пар.

Детальный элементный анализ износных частиц, проведённый с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии, позволил установить, что основную долю в их составе занимают соединения железа, доля которых составляет 45...57 % в зависимости от типа масла и режима эксплуатации двигателя. Существенное присутствие свинца (8...12 %) связано с износом подшипников и вкладышей, а доля алюминия (до 6 %) указывает на износ поршней и поршневых колец. Примеси меди (5...9 %), обнаруженные в частицах износа, свидетельствуют о выработке коренных и шатунных подшипников двигателя. При этом в синтетических маслах отмечено уменьшение доли цветных металлов по сравнению с минеральными, что дополнительно подтверждает их превосходство в защите деталей от износа и продлении срока службы двигателя [5].

Таким образом, совокупность полученных экспериментальных данных демонстрирует, что эксплуатационные характеристики моторных масел – прежде всего показатели вязкости, коэффициента трения и масса изношенных частиц – тесно взаимосвязаны и определяют уровень износа деталей двигателя в процессе эксплуатации. Синтетические масла с современ-

ными присадками обеспечивают наиболее стабильные параметры на протяжении всего межсервисного интервала, существенно снижая интенсивность износа по сравнению с минеральными маслами, что подтверждается как лабораторными, так и эксплуатационными измерениями.

Распределение массы и состава частиц износа представлено в таблице.

Таблица

Масса и элементный состав частиц износа в моторных маслах после эксплуатации

Table

Mass and elemental composition of wear particles in engine oils after use

Тип масла	Масса частиц, мг/100 мл	Fe (%)	Pb (%)	Al (%)	Cu (%)
Минеральное	6,8	57	12	6	8
Полусинтетика	5,1	50	10	5	7
Синтетическое	3,1	45	8	4	5

Обсуждение/Заключение

Проведённые исследования убедительно продемонстрировали тесную связь между эксплуатационными свойствами моторных масел и интенсивностью износа рабочих поверхностей деталей машин, работающих в условиях высоких скоростей, температур и динамических нагрузок. Детальный анализ динамики вязкости моторных масел различных типов показал, что масла на синтетической основе демонстрируют существенно более высокую стабильность этого показателя в течение всего срока эксплуатации. Так, если для минеральных масел после 10000 км пробега было зафиксировано среднее снижение кинематической вязкости при 100 °C на 13,5 % (с 13,2 мм²/с до 11,4 мм²/с), а для полусинтетических масел – на 11 % (с 13,8 мм²/с до 12,3 мм²/с), то синтетические масла потеряли в вязкости не более 7,9 % (с 14,1 мм²/с до 13,0 мм²/с). Такое поведение свидетельствует о лучшей стабильности молекулярной структуры базового масла при длительном воздействии высоких температур и окислительных процессов, а также о способности синтетических масел сохранять оптимальную толщину смазочной плёнки в зоне контакта.

Рост коэффициента трения, неизбежно сопутствующий снижению вязкости и выработке присадочного пакета, также оказался существенно ниже у синтетиче-

ских масел. Так, для минеральных масел средний коэффициент трения увеличился с 0,072 до 0,089 после 10000 км пробега, что сопровождалось возрастанием температуры зоны контакта на 9...12 °C. Для синтетических масел этот показатель вырос лишь с 0,067 до 0,074, а локальное повышение температуры зоны трения не превышало 3...4 °C. Это означает, что синтетические масла не только обеспечивают меньший трениевый нагрев, но и способствуют существенному снижению энергетических потерь в двигателе.

Особое значение для прогноза ресурса двигателя имел сравнительный анализ массы и состава частиц износа, отфильтрованных из отработанных масел. Масса частиц износа, выделенных из 100 мл минерального масла после 10000 км эксплуатации, достигала 6,8 мг, а в случае полусинтетического масла – 5,1 мг. Для синтетических масел средняя масса частиц износа составила лишь 3,1 мг, что более чем в два раза ниже, чем у минеральных аналогов. Данные по массовой доле железа в частицах износа также оказались показательными: если для минеральных масел она доходила до 57 % от общей массы, то для синтетических – не превышала 45 %. Присутствие свинца, меди и алюминия в продуктах износа указывало на интенсивность изнашивания подшипников, вкладышей и

поршневых колец. В частности, в минеральных маслах содержание свинца доходило до 12 %, меди – до 8%, тогда как в синтетических маслах эти значения были на уровне 8 % и 5 % соответственно. Такой состав частиц износа свидетельствует о более мягком режиме работы трущихся пар при использовании синтетических масел, а также о лучшей защите антифрикционных покрытий за счёт эффективных присадок.

Комплексный анализ эксплуатационных свойств масел и продуктов их деградации не только позволяет объективно прогнозировать ресурс двигателя, но и обеспечивает возможность индивидуального подбора рецептуры масла под конкретные условия эксплуатации: климат, стиль вождения, тип двигателя. В процессе работы было зафиксировано, что снижение вязкости масла на 8...15 % после 10000 км пробега приводит к росту коэффициента трения на 10...22 % и одновременному увеличению массы частиц износа, особенно в случае масел с низкой концентрацией противоизносных и антиокислительных присадок.

Особое внимание в ходе анализа уделялось влиянию типа присадочного пакета на процесс износа. Масла, содержащие цинк-фосфатные, молибденовые и борсодержащие присадки, демонстрировали на 25...30 % меньшую массу износных частиц по сравнению с аналогичными маслами без подобных добавок. Это подтверждает, что современные многофункциональные присадки не только формируют прочную защитную плёнку на поверхности металла, но и способствуют стабилизации вязкости, снижая скорость окисления и термического разложения базового масла. Масс-спектрометрический анализ показал уменьшение концентрации цинк-фосфатных соединений на 30 % за 10 000 км, однако даже остаточного количества

присадок хватало для поддержания низкого уровня износа в синтетических маслах [6, 7].

Результаты анализа элементного состава частиц износа позволили выявить прямую корреляцию между ростом содержания железа и свинца и увеличением механического износа цилиндропоршневой группы. Так, при увеличении доли железа в частицах износа свыше 55 % наблюдалось ускоренное появление износных царапин на стенках цилиндра, что было подтверждено микроскопией поверхности. Это позволяет использовать спектральный анализ масла для ранней диагностики технического состояния двигателя и своевременного планирования замены масла или проведения ремонтных мероприятий.

В целом, полученные экспериментальные данные убедительно доказывают, что применение масел с высокой стабильностью вязкости, низким коэффициентом трения и эффективным пакетом современных присадок способствует существенно сокращению темпов изнашивания рабочих поверхностей, снижает вероятность аварийных отказов, уменьшает расходы на обслуживание и повышает надёжность работы машин. Предложенная методика комплексной оценки эксплуатационных свойств масел, включающая анализ вязкости, коэффициента трения, массы и состава частиц износа, а также мониторинг содержания ключевых элементов в продуктах износа, может быть рекомендована к внедрению в систему технического обслуживания автотранспортных и промышленных предприятий. Такой подход не только повышает технологическую культуру эксплуатации техники, но и открывает новые возможности для разработки масел с заданными эксплуатационными характеристиками, отвечающими требованиям конкретных потребителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шалыгин М.Г., Ващишина А.П. Повышение износостойкости бандажа колеса локомотива улучшением антифрикционных свойств смазочного материала. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. №: 3 (83). Стр.45-53
2. Smith J.D., Jones R.B. Tribological performance of engine oils: A review. // Lubrication Science. 2020. Vol. 32(1). P. 50-62.

3. ASTM D445-19. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids. ASTM International, 2019.
4. Dwyer-Joyce R.S., Drinkwater B.W., Donohoe C. The detection of debris in lubricating oil using acoustic emission // *Wear*. 2003. Vol. 256(12). P. 1236–1245.
5. Шалыгин М.Г., Ващишин С.П., Ващишина А.П. Исследование физико-химических и противоизносных свойств моторных масел по завершении процесса эксплуатации // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 3 (27). С. 12-19.

6. Шалыгин М.Г., Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Ващишина А.П. Трибологические свойства полужидкого смазочного материала с присадками поверхностно-активных веществ // *Трение и износ*. Том 44. № 5. 2023. С.418-426.
7. Шец С.П., Горленко А.О., Шалыгин М.Г. Повышение эффективности образования гидродинамической смазки в подшипниках скольжения применением магнитной жидкости // *Строительные и дорожные машины*. 2023. № 5. С. 27-31.

REFERENCES

1. Shalygin MG, Vashchishina AP. Increasing the wear resistance of the locomotive wheel tire by improving the antifriction properties of the lubricant. *The Bulletin of the RSTU*. 2021;3(83):45-53.
2. Smith JD, Jones RB. Tribological performance of engine oils: review. *Lubrication Science*. 2020;32(1):50-62.
3. ASTM D445-19. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids. ASTM International; 2019.
4. Dwyer-Joyce RS, Drinkwater BW, Donohoe C. The detection of debris in lubricating oil using acoustic emission. *Wear*. 2003;256(12):1236–1245.

5. Shalygin MG, Vashchinin SP, Vashchinina AP. Study of physico-chemical and anti-wear properties of motor oils at the end of operation. *Transport Engineering*. 2024;3(27):12-19.
6. Shalygin M.G., Buyanovskiy I.A., Samusenko V.D., Vashchishina A.P. Tribological properties of semi-fluid lubricant with surfactant additives. *Fric-tion and Wear*. 2023;44(5):418-426.
7. Shets SP, Gorlenko AO, Shalygin MG. Increasing the efficiency of hydrodynamic lubrication formation in bearings using magnetic fluid. *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*. 2023;5:27-31.

Информация об авторах:

Шец Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, тел. +7 (4832) 56-09-95.

Shets Sergey Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering at Bryansk State Technical University, phone: +7 (4832) 56-09-95.

Чеславский Леонид Вячеславович – аспирант кафедры «ТиТТС» Брянского государственного технического университета, тел. +7 (4832) 56-09-95.

Cheslavsky Leonid Vyacheslavovich – Postgraduate student at Bryansk State Technical University, phone: +7 (4832) 56-09-95.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Погonyшев В.А., доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, физика и математика» «Брянского государственного аграрного университета».

The article was submitted to the editorial office on 05.05.2025; approved after review on 16.05.2025; accepted for publication on 26.05.2025. The reviewer is Pogonyshchev V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation, Physics and Mathematics at Bryansk State Agrarian University.