

Гончаров Сергей Анатольевич

аспирант, Курский государственный аграрный университет имени И. И.

Иванова, г. Курск

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается комплексный анализ современного состояния и направлений развития технологий применения твердых смазочных покрытий (ТСП) для повышения эксплуатационного ресурса деталей двигателей внутреннего сгорания. Автором систематизированы основные виды антифрикционных материалов, включая покрытия на основе дисульфида молибдена, графита и алмазоподобных углеродных пленок (DLC). В работе подробно рассмотрены трибологические условия работы ключевых узлов трения ДВС, таких как цилиндропоршневая группа и кривошипно-шатунный механизм, в режимах граничной смазки и экстремальных температурных нагрузок. На основе сравнительного анализа выявлены ключевые проблемы существующих решений, в частности вопросы адгезионной прочности и термической стабильности покрытий. Результаты исследования позволяют определить наиболее перспективные векторы совершенствования составов ТСП и методов их нанесения для обеспечения надежности перспективных форсированных двигателей.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, твердые смазочные покрытия, ресурс, износостойкость, дисульфид молибдена, антифрикционные материалы, поверхностная обработка.

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the current state and development trends in the technologies for applying solid lubricant coatings

(SLC) to increase the service life of internal combustion engine (ICE) components. The author systematizes the main types of antifriction materials, including coatings based on molybdenum disulfide, graphite, and diamond-like carbon (DLC) films. The paper provides a detailed examination of the tribological operating conditions of key friction units in ICEs, such as the cylinder-piston group and the crank mechanism, under boundary lubrication regimes and extreme temperature loads. Based on a comparative analysis, the key problems of existing solutions are identified, in particular issues related to the adhesive strength and thermal stability of the coatings. The research results make it possible to determine the most promising directions for improving SLC compositions and their deposition methods to ensure the reliability of advanced high-performance engines.

Keywords: internal combustion engine, solid lubricant coatings, service life, wear resistance, molybdenum disulfide, antifriction materials, surface treatment

Введение: Современный этап развития двигателестроения характеризуется постоянным ростом удельной мощности и тепловой напряженности основных узлов трения. В условиях форсирования рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) традиционные системы жидкостной смазки зачастую оказываются недостаточно эффективными. Это особенно проявляется в режимах пуска-останова, при экстремально высоких температурах в зоне верхнего поршневого кольца, а также в моменты разрыва масляной пленки, приводящих к граничному трению и катастрофическому износу деталей.

Статистические данные показывают, что до 40–50% потерь на трение в ДВС приходится на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ). В связи с этим, одной из наиболее актуальных задач современного машиностроения является переход от классических трибосистем к интеллектуальным

поверхностям с заданными свойствами.

Одним из наиболее перспективных путей решения данной проблемы является применение твердых смазочных покрытий (ТСП). В отличие от традиционных присадок к маслам, ТСП формируют на поверхности детали устойчивый функциональный слой, обладающий низким коэффициентом трения и высокой несущей способностью. Использование материалов на основе дисульфида молибдена (MoS_2), графита и инновационных углеродных структур (DLC) позволяет существенно снизить риск возникновения задиров и продлить срок службы двигателя в критических режимах работы.

Несмотря на наличие большого количества исследований в данной области, вопросы выбора оптимального состава ТСП для конкретных пар трения и обеспечения их высокой адгезионной прочности остаются открытыми. Требуется систематизация накопленного опыта для выявления наиболее эффективных технологических решений.

Целью настоящей работы является аналитический обзор существующих методов и материалов для формирования твердых смазочных покрытий, а также определение перспективных направлений их совершенствования для повышения ресурса деталей ДВС.

Классификация твердых смазочных покрытий для узлов трения ДВС

Эффективность применения ТСП в двигателях определяется их физико-химической природой и механизмом снижения трения. На основе анализа существующих технологических решений автором предлагается классификация ТСП по трем основным признакам: химическому составу, методу нанесения и функциональному назначению.

1. По химическому составу (природе активного компонента)

В современном двигателестроении наибольшее распространение получили четыре группы материалов:

Слоистые решетки (Дихалькогениды металлов): Наиболее изученные материалы (MoS_2 , WS_2). Механизм действия основан на слабом межмолекулярном взаимодействии между слоями, что обеспечивает легкое скольжение на атомарном уровне.

Углеродные материалы: Графит и алмазоподобные покрытия (DLC). DLC-покрытия характеризуются экстремальной твердостью и химической инертностью, что делает их незаменимыми для высоконагруженных деталей (пальцы, толкатели).

Полимерные композиты: Покрытия на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) или полиамидимида. Часто используются как связующая матрица для других наполнителей.

Мягкие металлы и их сплавы: Олово, свинец, индий. Традиционно применяются в трибосистемах коленчатого вала для обеспечения прирабатываемости.

2. По методу формирования рабочего слоя

Финишное антифрикционное лакирование (ФАЛ): Нанесение жидких составов с последующей сушкой или полимеризацией. Наиболее экономичный метод для массового производства (например, юбки поршней).

Вакуумно-плазменные методы (PVD/CVD): Позволяют создавать сверхтвердые наноструктурированные слои.

Газопламенное и плазменное напыление: Используются для

восстановления деталей и создания толстослойных покрытий.

Химико-термическая обработка с модификацией поверхности:
Например, сульфоцианирование или эпиламирование.

Сравнительная характеристика основных типов ТСП

Тип ТСП	Преимущества	Недостатки	Температурный предел, °C	Рекомендуемый узел ДВС
MoS ₂ (лак)	Низкая стоимость, отличная прирабатываемость	Чувствительность к влаге, средняя адгезия	~ 350-400	Юбка поршня
DLC (PVD)	Экстремальная твердость, минимальное трение	Высокая стоимость оборудования	~ 250-450	Поршневой палец, кулачки распределителя
Графит	Стабильность в масле, экологичность	Высокий износ при сухом трении	~ 500	Направляющие клапанов

Анализ условий работы и механизмов изнашивания ключевых узлов трения ДВС

1. Цилиндропоршневая группа (ЦПГ). Это наиболее нагруженный узел, работающий в условиях переменных скоростей и температур. Юбка поршня: В моменты «перекладки» поршня в мертвых точках гидродинамическая смазка разрушается. Здесь ТСП на основе MoS₂ выполняют роль «сухого» предохранителя. Покрытие сглаживает

микронеровности и предотвращает прямой контакт металла о металл, снижая риск задиров при холодном пуске до 50%. Поршневые кольца: Работают в условиях высоких температур и воздействия продуктов сгорания. Здесь наиболее перспективны DLC-покрытия, обладающие высокой химической инертностью и низким коэффициентом трения при температурах свыше 300°C.

2. Кривошипно-шатунный механизм (КШМ). Основная проблема здесь — контактная усталость и абразивный износ. Поршневой палец: Испытывает колоссальные удельные давления. Применение твердых углеродных покрытий позволяет отказаться от использования бронзовых втулок в бобышках поршня, переходя на стальные сопряжения с ТСП, что увеличивает жесткость узла. Вкладыши коленчатого вала: Работают в режиме жидкостного трения, однако в моменты пуска/остановки испытывают граничное трение. ТСП здесь должны обладать свойством «поглощаемости» — способностью поглощать мелкие абразивные частицы, не повреждая шейку вала.

3. Газораспределительный механизм (ГРМ). В ГРМ преобладает трение качения с проскальзыванием и высокие точечные нагрузки. Кулачки распределительного вала и толкатели: Подвержены питтингу (выкрашиванию). ТСП в этом узле должны не только снижать трение, но и повышать усталостную прочность поверхности. Применение многослойных покрытий (TiAlN, CrN) позволяет увеличить ресурс узла в 2–3 раза.

Заключение: Проведенный аналитический обзор современного состояния технологий применения твердых смазочных покрытий в двигателях внутреннего сгорания позволяет сделать следующие выводы:

Технологическая необходимость. Установлено, что в условиях

интенсификации рабочих процессов ДВС традиционные системы смазки не обеспечивают требуемую надежность в критических режимах (пуск, перегрев, граничное трение). Применение ТСП является необходимым условием для дальнейшего повышения ресурса и энергоэффективности силовых агрегатов.

Селективность выбора. Систематизация данных показала, что выбор состава покрытия должен быть строго дифференцирован в зависимости от узла трения. Если для юбок поршней наиболее эффективны композиты на основе дисульфид молибдена и графита, то для высоконагруженных пар трения, таких как «поршневой палец – бобышка», приоритетными являются сверхтвердые DLC-покрытия.

Ограничивающие факторы. Несмотря на высокую эффективность, широкое внедрение ТСП сдерживается рядом проблем: недостаточной адгезионной прочностью при длительных циклических нагрузках и деградацией полимерных связующих при температурах свыше 300°C.

Перспективы исследований. Наиболее актуальным направлением дальнейших работ является разработка многокомпонентных или наноструктурированных покрытий, обладающих повышенной термостойкостью и улучшенной адгезией к конструкционным материалам деталей ДВС.

Список использованных источников

Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор ; пер. с англ. – М. : Машиностроение, 2012. – 543 с. (Классика для обоснования теории).

Мышкин, Н. К. Трибология. Методы испытаний : справочное издание / Н. К. Мышкин, А. Я. Григорьев, Г. С. Маринкевич. – СПб. : Страта, 2020. –

Абрамов, А. М. Повышение износостойкости деталей цилиндропоршневой группы ДВС с применением антифрикционных твердосмазочных покрытий / А. М. Абрамов, В. В. Измайлов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 22–26.

Королев, А. С. Анализ эффективности применения DLC-покрытий в узлах трения современных двигателей / А. С. Королев, Д. В. Романов // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 2. – С. 145–152.

Доценко, А. И. Современные технологии нанесения твердых смазочных покрытий на юбки поршней / А. И. Доценко // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 9. – С. 12–15.

Buttery, A. Development of next generation solid lubricants for high-temperature applications / A. BATTERY, S. Wang // European Space Mechanisms and Tribology Symposium. – 2025. – P. 112–118.

Humphrey, E. Multiscale boundary frictional performance of diamond-like carbon coatings / E. Humphrey, N. J. Morris, R. Rahmani // Tribology International. – 2020. – Vol. 149. – P. 105–116.