
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 531.43

**ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЙ ГТД****© 2025 г. А. Ю. Албагачиев¹, Л. В. Гаврилина¹, А. В. Кошелев²,
О. И. Кулаков¹, С. В. Морозов², Д. Л. Раков^{1,*}**¹*Институт машиноведения им. А. А. Благодярова РАН, Москва, Россия*²*АО “ОДК НИИД”, Москва, Россия***e-mail: rdl@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.12.2024 г.

После доработки 06.02.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

С учетом того, что актуальной задачей является снижение износа уплотнительных элементов, который приводит к потерям эффективности работы газотурбинных двигателей и увеличению затрат на его обслуживание, проведены исследования изотропного пирографита и объемного углеродного наноструктурированного материала по схеме трения диск–колодка. Предложены регрессионные модели расчета интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Проведенный анализ результатов экспериментальных исследований материалов подтвердил стабильность коэффициента трения и объемной температуры в установившемся режиме работы при длительной эксплуатации пары трения, а также показал: изнашивание образца контактной пары объемного углеродного наноструктурированного материала с азотированием значительно ниже, чем у контактной пары объемного углеродного наноструктурированного материала с диском из стали с покрытием ВК-25М.

Ключевые слова: углеродные материалы, трибологические исследования, уплотнения, износостойкость, наноструктурированные углеродные материалы, регрессионный анализ, газотурбинные двигатели

DOI: 10.31857/S0235711925030122, **EDN:** GNODPS

Углеродные материалы занимают особое место в машиностроении благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам: высокой прочности, износостойкости, низкому коэффициенту трения и устойчивости к агрессивным средам. Эти характеристики делают их незаменимыми для создания уплотнений, работающих в экстремальных условиях, например в газотурбинных двигателях (ГТД).

Современные ГТД, используемые в авиационной промышленности, должны обеспечивать высокую эффективность, малый расход топлива и максимальную надежность. Повышение характеристик ГТД является одной из наиболее важных задач современного машиностроения [1, 2]. Однако существенной проблемой является износ уплотнительных элементов, приводящий к потерям эффективности двигателя и увеличению затрат на его обслуживание.

Определение трибологических параметров углеродных материалов (УМ), применяемых для изготовления уплотнений в составе узлов авиационных двигателей, а также параметров износостойкости и интенсивности изнашивания рекомендуемых пар,

являются актуальной научной задачей. Уплотнения используются для предотвращения утечек жидкостей и газов, обеспечения герметичности и уменьшения потерь энергии. УМ обладают следующими основными свойствами: 1) низкий коэффициент трения, что снижает износ и потери на трение; 2) высокая термостойкость, позволяющая работать при высоких температурах; 3) устойчивость к химическим воздействиям, что важно для работы в агрессивных средах.

В ГТД уплотнения обеспечивают герметичность и минимизируют утечки, что важно для эффективной работы двигателя в целом [3, 4]. В условиях высоких температур, давления и скоростей, которые характерны для ГТД, материалы должны обладать высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения, термостойкостью и коррозионной устойчивостью. УМ сочетают высокую теплопроводность и устойчивость к температурным и механическим нагрузкам. Эти качества позволяют минимизировать износ и уменьшить потери на трение, что ведет к снижению эксплуатационных расходов и увеличению ресурса ГТД. Однако для их успешного использования необходимы исследования трибологических свойств, таких как влияние нагрузки, температуры и скорости на характеристики материала, а также их взаимодействие с различными рабочими средами. Изучение трибологических характеристик УМ в условиях, имитирующих работу ГТД, может обеспечить создание более устойчивых и долговечных уплотнительных материалов. Износостойкость УМ в основном определяется типом нагружения, трением и рабочей средой [5, 6]. Для улучшения трибологических характеристик ГТД также используют различные смазки, что позволяет уменьшить трение и износ и, следовательно, увеличить срок эксплуатации [7, 8]. Смазка в УМ выполняет следующие основные функции: 1) уменьшает коэффициент трения, создавая разделительный слой между контактирующими поверхностями; 2) снижает износ за счет уменьшения прямого контакта материалов; 3) способствует отводу тепла, возникающего при трении.

Для исследований характеристик УМ для ГТД были разработаны модели, выполнены экспериментальные исследования и проведен регрессионный анализ трибологических параметров (линейная и массовая интенсивность изнашивания и коэффициента трения).

Методика и результаты исследования. Для изучения трибологических свойств углеродных материалов при наличии смазки проводились экспериментальные исследования, и были проанализированы следующие основные характеристики – линейная и массовая интенсивность изнашивания и коэффициент трения в зависимости от нагрузки, скорости вращения и температуры. Данные характеристики зависят от множества факторов, включая:

1) свойства материалов, такие как твердость, прочность, микроструктура и теплопроводность, которые существенно влияют на коэффициенты трения. Металлы обладают высокой теплопроводностью и могут выделять значительное количество тепла при трении. УМ, в свою очередь, благодаря своим структурам обладают низким коэффициентом трения, что снижает общий коэффициент трения пары и уменьшает износ поверхности металла;

2) высокие скорости вращения, которые приводят к увеличению выделения тепла и, следовательно, изменению коэффициента трения. УМ при высоких скоростях, как правило, демонстрируют стабильные трибологические свойства;

3) высокие нагрузки: чем они больше, тем выше силы трения и, как следствие, интенсивность изнашивания. УМ часто способны выдерживать значительные нагрузки за счет своей структуры, что снижает интенсивность износа даже при высоких давлениях;

4) микроструктуру контактной поверхности, в том числе степень шероховатости, что может повлиять на некоторые этапы трения и износа.

Эти факторы необходимо учитывать при проектировании узлов с контактными парами “УМ–металл” для обеспечения их долговечности и надежности в работе. Для исследований были выбраны следующие материалы – пиррографит изотропный (ПГИ) [9] и объемный углеродный наноструктурированный материал [10]. Объемные углеродные наноструктурированные материалы (ОУНМ) получают при пиролизе углеводородов совместно с газообразными соединениями неметаллов или без них на графитовых подложках определенной формы. Наноматериал представляет собой однородный изотропный консолидированный материал с кристаллитами турбостратного углерода размерами до 15 нм. Основные характеристики ОУНМ и ПГИ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики ОУНМ и ПГИ [9]

Характеристика	ОУНМ	ПГИ
1. Прочность на изгиб, МПа	250–450	90–150
2. Прочность на сжатие, МПа	370–530	190–360
3. Прочность на растяжение, МПа	70–150	35–50
4. Ударная вязкость, кДж/м ²	11–15	11.9–14.7

Так как часто провести испытания при реальных параметрах работы ГТД достаточно сложно, целесообразно использование регрессионного анализа. Этот процесс в целом можно описать следующими этапами:

1. Сбор данных: необходимо собрать экспериментальные данные, включая коэффициент трения (или износ), давление, температуру, время эксплуатации.

2. Определение зависимых и независимых переменных: зависимая переменная – коэффициент трения (или износ), независимые переменные – такие параметры, как температура, давление, скорость скольжения.

3. Выбор типа регрессионного анализа: *линейная* регрессия, если предполагается линейная зависимость между переменными; *полиномиальная* регрессия, если зависимость более сложная; *множественная* регрессия для учета нескольких независимых переменных.

4. Построение модели: с помощью метода наименьших квадратов или других подходящих методов строится модель регрессии, которая минимизирует разницу между экспериментальными и предсказанными значениями.

5. Оценка качества модели.

6. Интерпретация результатов: например, можно сделать вывод, как изменение температуры влияет на коэффициент трения, при условии, что другие параметры остаются постоянными. Если регрессионный коэффициент для температуры положительный и значим, это может означать, что с повышением температуры трение увеличивается.

7. Прогнозирование: после того как модель построена и проверена, ее можно использовать для прогнозирования коэффициента трения или износа при новых условиях, которые не использовались в исходных экспериментах.

Применение регрессионного анализа подробно изложено в статье [11]. В качестве критерия взаимодействия контактных пар были выбраны коэффициент трения и износостойкость. В качестве референтных значений интенсивности изнашивания I и коэффициента трения f используются аналитические зависимости [12]

$$I = 1.72 \cdot 10^{-11} P^{1.2} Q^{1.2} V_{\text{cp}}^{0.2}, \quad (1)$$

$$f = 1.9 \cdot 10^7 P^{-0.35} Q^{-3.1} V_{\text{cp}}^{0.0625}, \quad (2)$$

где Q – температура, К; V_{cp} – средняя скорость, м/с; P – сила давления, Н.

Испытания проводились в соответствии с утвержденной методикой, разработанной в лаборатории узлов трения для экстремальных условий ИМАШ РАН. Материалы испытывались по стандартной схеме “диск–колодка” при утвержденных режимах на аттестованной установке трения ИМАШ 5018 (рис. 1, 2).



Рис 1. Установка ИМАШ 5018.

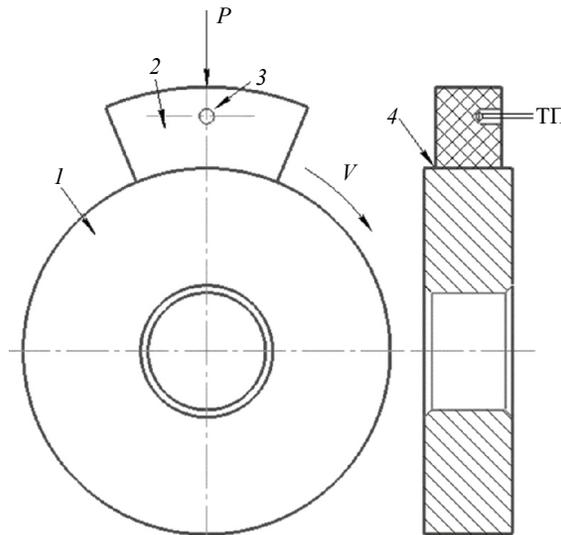


Рис. 2. Контактная пара “диск–колодка”: 1 – диск; 2 – колодка; 3 – отверстие под термопару; 4 – зона трения; ТП – термопара; P – приложенная нагрузка; V – направление вращения диска.

Обработка первичных данных выполнялась с использованием табличного процессора. Расчет линейной и массовой интенсивности изнашивания для образца “колодка” выполнялся по следующей модели.

Расчет номинальной площади трения:

$$S_{\text{тр}} = \frac{\pi b R_{\text{тр}} \alpha}{18000}, \quad (3)$$

где $S_{\text{тр}}$ – номинальная площадь трения, см²; b – ширина рабочей части колодки, мм; $R_{\text{тр}}$ – радиус трения, мм; α – угол сектора колодки, град.

Расчет общего пути трения:

$$L_{\text{тр}} = \frac{2\pi NR_{\text{тр}}}{1000}, \tag{4}$$

где $L_{\text{тр}}$ – общий путь трения, м; N – общее число оборотов образца “диск” за время испытания.

Расчет линейного износа образца:

$$\Delta h = \frac{\Delta G}{\rho S_{\text{тр}}} 10000, \tag{5}$$

где Δh – линейный износ, мкм; ΔG – изменение массы образца за время испытания, мг; ρ – плотность материала образца, г/см³.

Расчет интенсивности изнашивания линейной:

$$I_1 = \frac{\Delta h}{L_{\text{тр}}}, \tag{6}$$

где I_1 – линейная интенсивность изнашивания, мкм/м.

Расчет массовой интенсивности изнашивания:

$$I_2 = \frac{\Delta G}{L_{\text{тр}}}, \tag{7}$$

где I_2 – массовая интенсивность изнашивания, мг/м.

Получено подтверждение стабильности коэффициента трения и объемной температуры в установившемся режиме работы при длительной эксплуатации пары трения. Графики зависимости коэффициента трения и объемной температуры образца–колотки от времени приведены на рис. 3, 4.

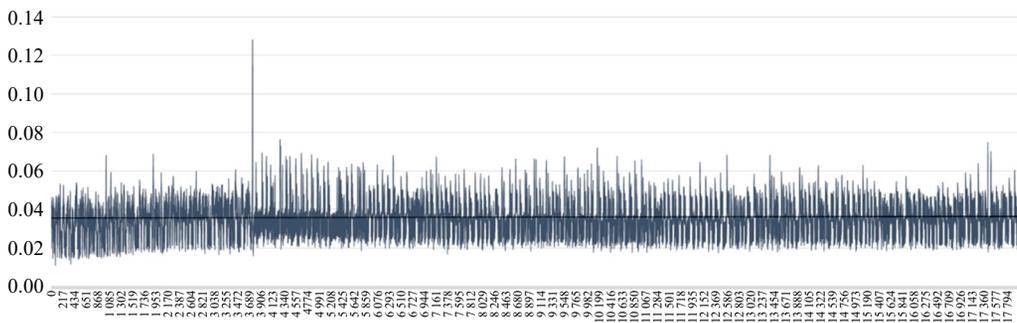


Рис. 3. Изменение коэффициента трения по времени (экранная форма).

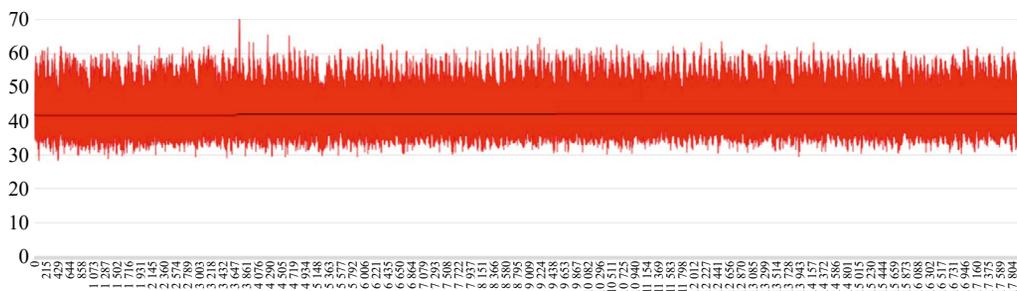


Рис 4. Изменение объемной температуры по времени (экранная форма).

На рис. 5 показаны виды поверхностей колодок ОУНМ и ПГИ при взаимодействии с азотированным стальным диском. Четко видна более мелкозернистая структура у материала ПГИ.

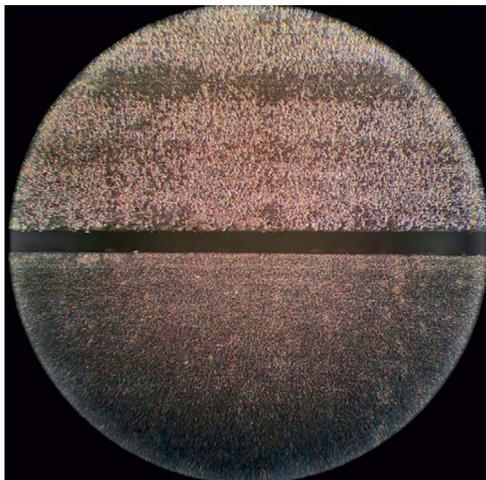


Рис. 5. Структура поверхности материалов ОУНМ и ПГИ на диске с азотированным покрытием (ОУНМ – сверху, ПГИ – внизу).

Регрессионные трибологические модели. В соответствии с результатами испытаний получены следующие аналитические зависимости в кодированных переменных для материала ОУНМ:

$$y(f) = 0.049 - 0.00125X_1 - 0.021X_2 - 0.00125X_1X_2; \quad (8)$$

$$y(\theta) = 30.5 + 3.5X_1 - X_2; \quad (9)$$

$$y(G) = 2.6125 - 0.4125X_1 + 1.0625X_2 - 0.6625X_1X_2; \quad (10)$$

$$y(I_1) = 17.159 - 8.268X_1 + 7.965X_2 - 6.74X_1X_2; \quad (11)$$

$$y(I_2) = 5.919 - 2.792X_1 + 2.686X_2 - 2.255X_1X_2. \quad (12)$$

Для декодирования диапазона (перехода от кодированных переменных к натуральным) с учетом границ диапазона модели в формулы (8)–(12) подставляем:

$$X_1 = \frac{n - 1525}{475}; \quad (13)$$

$$X_2 = \frac{p - 350}{150}. \quad (14)$$

Получаем модель системы с натуральными факторами

$$f = 0.09264909 + 0.035088 \cdot 10^{-4} n - 1.132454 \cdot 10^{-4} p - 0.17544 \cdot 10^{-6} np; \quad (15)$$

$$\theta = 21.59649 + 0.0073684n - 0.006667 p, [^{\circ}\text{C}]; \quad (16)$$

$$G = -3.505264 + 0.00238598n + 0.0212635 p - 9.29825 \cdot 10^{-6} np, [\text{мг}]; \quad (17)$$

$$I_1 = -25.379472 + 0.0156989n + 0.197363 p - 0.94597 \cdot 10^{-4} np, [\text{мкм/м}]; \quad (18)$$

$$I_2 = -8.27726 + 0.0051991n + 0.0661727p - 0.3164910^{-4}np, \text{ [мг/м]}. \quad (19)$$

Модель (15)–(19) применима только к материалу ОУНМ в диапазоне значений нагрузок и частот вращения, при которых были проведены испытания. Для сравнительной оценки и прогноза трибологических параметров УМ при более широком диапазоне величин усилия нагрузки p , частоты вращения n были использованы зависимости из литературных источников [12, 13] с подстановкой значений коэффициента трения и износа, полученных в проведенных экспериментах.

В соответствии с формулами (1), (2), методом математического моделирования и полученными при испытаниях экспериментальными данными применительно к материалу ОУНМ в нашей статье предложены уточненные модели уравнений для прогноза фрикционно-износных характеристик узла трения

$$f = 2.33 \cdot 10^6 p^{-0.35} T^{-3.1} V^{0.06}; \quad (20)$$

$$I_1 = 6.621 \cdot 10^{-7} p^{1.2} T^{1.2} V^{0.2}; \quad (21)$$

$$I_2 = 1.2 \cdot 10^{-7} p^{1.2} T^{1.2} V^{0.2}, \quad (22)$$

где f – коэффициент трения; I_1 – линейная интенсивность изнашивания, мкм/м; I_2 – массовая интенсивность изнашивания, мг/м; p – давление на образец, МПа; T – температура окружающей среды, К; V – средняя скорость скольжения, м/с.

Заключение. Исследование трибологических характеристик углеродных материалов в присутствии смазки открывает новые перспективы для повышения эффективности и долговечности уплотнений в машиностроении. Углеродные материалы благодаря своим уникальным свойствам в сочетании с правильно подобранными смазками способны обеспечить работу систем в самых экстремальных условиях. Будущие исследования в этой области позволят разработать более надежные и экологичные решения для промышленности.

Проведенные исследования характеристик рассматриваемых материалов, в частности, показали, что: **1)** показатели износа I_1 и I_2 для контактных пар ОУНМ с диском ВТ6 и покрытием ВК-25М значительно ниже, чем для ПГИ; **2)** при одном и том же режиме (2000 об/мин; 500 Н) ПГИ с диском с покрытием ВК-25М имеют износостойкость значительно ниже (в 10 раз) по сравнению с образцом ОУНМ. Так, для ПГИ – $I_1 = 436.01 \cdot 10^{-4}$ мкм/м и $I_2 = 148.32 \cdot 10^{-4}$ мг/м, а для ОУНМ – $I_1 = 10.116 \cdot 10^{-4}$ мкм/м и $I_2 = 3.558 \cdot 10^{-4}$ мг/м.

Исследовались также изменения параметров износостойкости контактной пары материала ОУНМ с диском покрытием ВК-25М и с диском из стали с азотированием.

При одинаковом режиме ($n = 1525$ об/мин, $p = 350$ Н) образец ОУНМ–ВК-25М имеет следующие показатели износостойкости: $I_1 = 9.9 \cdot 10^{-4}$ мкм/м; $I_2 = 3.37 \cdot 10^{-4}$ мг/м; а образец ОУНМ-азотирование – $I_1 = 4.81 \cdot 10^{-4}$ мкм/м; $I_2 = 1.7 \cdot 10^{-4}$ мг/м.

Результаты испытаний подтверждают, что изнашивание образца контактной пары ОУНМ с азотированием значительно ниже, чем у контактной пары ОУНМ с диском из стали с покрытием ВК-25М.

Исследование характеристик перспективных материалов, прогнозирование их поведения в реальных условиях работы двигателя может стать основой для разработки новых поколений ГТД с более продолжительным сроком службы и меньшими затратами на обслуживание. Постоянное развитие технологий УМ и усиление требований к их эффективности, совершенствование исследований, разработка методик моделирования их характеристик, а также прогнозирование в условиях эксплуатации имеют важное значение для авиации, энергетики и других высокотехнологичных отраслей.

Финансирование. Работа проводилась в рамках договора с Научно-исследовательским институтом технологии и организации производства двигателей АО “Объединенной двигателестроительной корпорации” “Разработка методик и определение трибологических параметров графитовых материалов для изготовления уплотнений авиационных двигателей”, договор ОДК/1535/05/2024/643 от 19.07.2024.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кофман В. М.* Определение коэффициента полезного действия турбины ГТД по параметрам неравномерных газовых потоков // Авиационная и ракетно-космическая техника. 2012. № 5 (50). С. 28–40.
2. *Sporer D., Wilson S., Dorfman M.* Ceramics for Abradable Shroud Seal Applications // Ceramic Engineering and Science Proceedings. 2010. P. 39–54.
<https://doi.org/10.1002/9780470584293.ch5>
3. *Greshta V., Tkach D., Sotnikov E., Pavlenko D., Klymov O.* Studying and designing improved coatings for labyrinth seals of gasturbine engine turbines // Eastern-European J. of Enterprise Technol. 2018. V. 4/12 (94). P. 56–63.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140912>
4. *Chupp R. E., Hendricks R. C., Lattime S. B., Steinetz B. M.* Sealing in turbomachinery // NASA/TM-2006-214341, 2006. 62 p.
5. *Mokhtara S., Mosbah Z., Mebarki L., Aissani L.* The effect of quenching and tempering on the tribological behavior of AISI 4340 steel // The 6th Int. Conf. on Welding, Non-Destructive Testing and Materials Industry IC-WNDT-M I'18 Skikda, Algeria, 2018, Conference Paper.
6. *Panda A., Bag R., Sahoo A. K., Kumar R.* A comprehensive review on AISI 4340 hardened steel: Emphasis on industry implemented machining settings, implications, and statistical analysis // Int. J. of Integrated Engineering. 2020. V. 12 (8). P. 61.
7. *Keropyan A. M., Albagachiev A. Y.* Study of the Main Factors Affecting the Increase in the Friction Coefficient of Interacting Surfaces of Rail Vehicles // J. Mach. Manuf. Reliab. 2024. V. 53. P. 208–211.
<https://doi.org/10.1134/S1052618824700055>
8. *Albagachiev A. Y., Tokhmetova A.* Temperature Fluctuations of the Lubricant Layer under Friction // J. Mach. Manuf. Reliab. 2024. V. 53. P. 22–24.
<https://doi.org/10.1134/S1052618824010023>
9. Пирографит изотропный (ПГИ). Технические условия. ТУ1915-099-04806898-2003ТУ1915-099-04806898-2003.
10. ГОСТ Р 58850-2020 Материал объемный углеродный наноструктурированный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020.
11. *Кошелев А. В., Кулаков О. И., Мендохов А. В., Морозов С. В., Раков Д. Л.* Моделирование параметров трения и изнашивания углеродных материалов с использованием регрессионного анализа (на примере контактных пар “металл–углеродный материал” // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 4. С. 103–110.
12. *Дроздов Ю. Н., Юдин Е. Г., Белов А. И.* Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / под ред. Ю. Н. Дроздова. М.: ЭкоПресс, 2010. 604 с.
13. *Албагачиев А. Ю., Карцев И. С.* Математическое моделирование разрушения зерна в мельнице // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 4. С. 100–104.