

В. А. Хорев^{1,2} (✉), к. т. н. **В. И. Румянцев¹**, **Г. А. Пономаренко¹**,
к. т. н. **А. С. Осмаков¹**, к. т. н. **В. Н. Фищев²**

¹ ООО «Вириал», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.3:546.26]:532.526.75

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИРОЛИТИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Узлы трения современных силовых турбоагрегатов требуют применения специальных материалов, обладающих стабильным и низким коэффициентом трения в экстремальных условиях. Наиболее успешно в настоящее время для этих целей применяются антифрикционные углеграфитовые материалы, в частности изотропный пиролитический углерод. Установлено, что изотропный пиролитический углерод имеет более низкие коэффициент трения и скорость изнашивания, чем антифрикционный графит АТГ-С. На основе анализа микроструктуры и фрактограмм следов износа высказано предположение, что разница в трибологическом поведении материалов вызвана различными механизмами разрушения материалов. Показано также, что изотропный пиролитический углерод имеет тенденцию к снижению скорости изнашивания и коэффициента трения с увеличением плотности.

Ключевые слова: изотропный пиролитический углерод (ИПУ), антифрикционный графит, трибологические испытания, коэффициент трения, скорость изнашивания.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность узлов трения силовых турбоагрегатов определяется их ресурсными характеристиками, экономичностью, технологичностью и функциональными возможностями. При этом обычно высокий уровень нагруженности узлов трения (pV-фактор) задается высокой линейной скоростью вращения ротора агрегата [1].

Среди требований к материалам, работающим в экстремальных высокоскоростных режимах трения, можно выделить низкий и стабильный коэффициент трения и повышенную износостойкость [2]. Согласно ГОСТ 27674–88 изнашивание — процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. Различают скорость и интенсивность изнашивания — отношение величины износа (массы, длины, объема и т. д.) соответственно к времени или к пути, на котором этот износ возник [3].

Предложено множество полуэмпирических моделей изнашивания материалов [4], однако

они не учитывают скорость взаимодействия исследуемого образца с контртелом, оперируя только длиной пути трения. Такой подход не позволяет корректно оценить процессы, происходящие при высокоскоростном трении, и их последствия. В последнем случае на работу узла трения существенно влияют температура в пятне контакта, вибрация системы, разница температур окружающей среды и испытываемых материалов и т. д., что не всегда существенно при малых скоростях. Поэтому для лучшего понимания процессов, происходящих в узле трения при его работе, необходимо проводить модельные испытания, приближенные к условиям эксплуатации.

Нередко работоспособность узлов трения в режиме сухого трения обеспечивают уплотнения из антифрикционных углеродных материалов (АУМ). Их применение обусловлено невозможностью схватывания графита со сталью и низким значением модуля упругости АУМ, что исключает задиры поверхности стальных контртел [5]. Для успешной эксплуатации антифрикционных материалов при высоких скоростях вращения трущихся поверхностей необходимо соблюдение ряда условий: минимальные размерные характеристики на разных уровнях структурной иерархии (мелкозернистая микроструктура и минимальный размер «кристаллитов»); высокая плотность; повышенное сопротивление окисляемости; минимальная га-



В. А. Хорев
E-mail: HorevVA@virial.ru

зопроницаемость. Для обеспечения газонепроницаемости узлов трения их изготавливают из пропитанных графитовых заготовок. Например, антифрикционный графит марки АТГ-С пропитывают водным раствором калиймарганцевого ультрафосфата состава $K_2O \cdot 2MnO \cdot 6P_2O_5$ [2].

В наибольшей степени вышеуказанным требованиям отвечает изотропный пиролитический углерод (ИПУ) — класс турбостратных однофазных материалов, получаемых методом химического газофазного осаждения (ХГО) при высокотемпературном термическом разложении углеродсодержащих газов. ИПУ — высокотемпературный, газонепроницаемый, коррозионно-стойкий конструкционный материал, прочностные характеристики которого монотонно улучшаются по мере повышения температуры испытания до 2500 °С [6].

Специфика микроструктуры консолидированного ИПУ заключается в ее квазиизотропности, обусловленной объемными реакциями в газовой фазе, протекающими в ходе реализации процесса ХГО. Из рис. 1, а видно, что структура ИПУ состоит из множества сфероидальных образований размерами 1–3 мкм, выполняющих роль зерна. Каждое из таких зерен (рис. 1, б) образовано закрученными гофрированными углеродными нанослоями, фрагменты которых можно рассматривать как кристаллиты [6]. Морфология углеродных нанослоев в сочетании с большим количеством углеродных глобул обеспечивает достаточно высокую вероятность появления любой пространственной ориентации элементарных фрагментов нанослоев, что обуславливает изотропность микроструктуры ИПУ.

Трибологические свойства ИПУ были исследованы во многих работах [6–8]. Однако в

большинстве работ испытания проводили при линейных скоростях 0,04–2,3 м/с, что не соответствует рабочим скоростям роторов современных силовых установок. Максимальная линейная скорость для образцов ИПУ была достигнута в работе [8] и составила 74 м/с, при этом полученный коэффициент трения изменялся от 0,1 до 0,3.

Цель настоящей работы — показать, как особенности микроструктуры, обусловленные механизмом генезиса материала, обеспечивают возможности его применения при режимах высокоскоростного трения в его экстремальном «сухом» варианте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Из заготовок ИПУ разной плотности и антифрикционного графита АТГ-С выпиливали образцы кубической формы с ребром 10 мм. Образцы предварительно обрабатывали на плоскошлифовальном станке до отклонения от параллельности противоположащих граней не более 0,3 %, затем вручную полировали до шероховатости $Ra = 0,1 \div 0,2$ мкм.

Высокоскоростные трибологические испытания проводили на разработанном и модернизированном на предприятии «Вириал» стенде (рис. 2) по схеме диск – колодка при скорости вращения контртела $V = 126$ м/с и радиальной удельной нагрузке 0,9 МПа. В качестве контртела использовали диск из стали ХВГ (HRC 60) диаметром 100 и толщиной 20 мм.

Коэффициент трения $f_{тр}$ рассчитывали по формуле

$$f_{тр} = \frac{M_{тр}}{NR_{ср}}, \quad (1)$$

где $M_{тр}$ — момент трения, Н·м; N — нагрузка на образец, Н; $R_{ср}$ — средний радиус вращения, м.

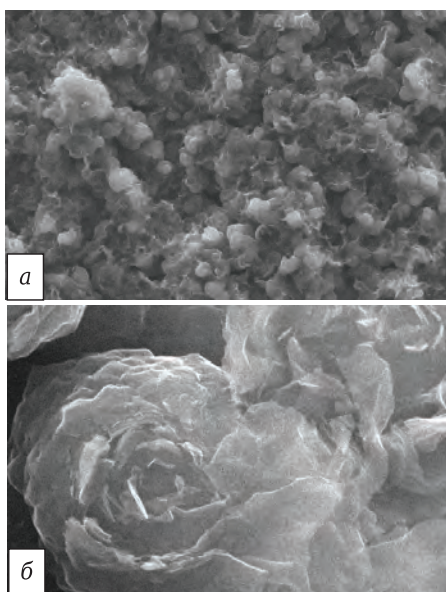


Рис. 1. Фрактограмма ИПУ, $\gamma = 1,94$ г/см³: а — $\times 2000$; б — $\times 40000$. SEM JEOL 7001F [6]

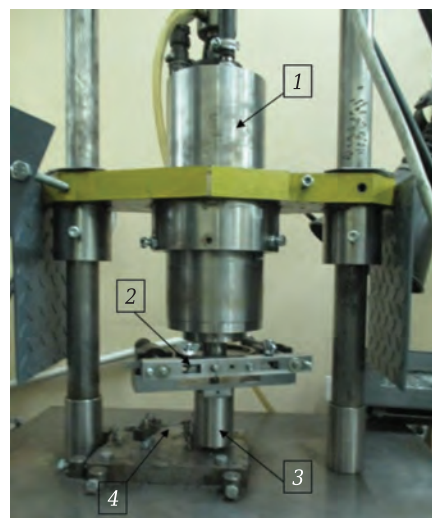


Рис. 2. Общий вид трибометрического стенда: 1 — электрошпиндель; 2 — оснастка для закрепления образца и подачи на него нагрузки; 3 — колонна для передачи вращения на датчик угла поворота; 4 — упругий элемент-ограничитель

Момент трения рассчитывали, определяя угол поворота по калибровочной зависимости вида $y = kx + b$, полученной при пошаговом нагружении узла трения грузами по 0,2 кг.

Скорость изнашивания I , мг/с, оценивали по изменению массы образца в ходе испытания по формуле

$$I = \frac{M_1 - M_2}{\tau}, \quad (2)$$

где M_1 — масса образца до испытания, г; M_2 — масса образца после испытания, г; τ — время, с.

Массу образцов определяли на лабораторных аналитических электронных весах CE224-C класса точности I, плотность образцов — гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 2409–95. Перед замером массы образцы высушивали в течение 2 ч при $(125 \pm 5)^\circ\text{C}$. Контроль микроструктуры и фиксацию ее изменений в результате испытаний проводили на оптическом микроскопе Altami в отраженном свете по методу светлого поля. Дорожки трения и участки износа исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN. Все показатели свойств определяли на шести параллельных образцах для каждого исследуемого материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов трибологических испытаний показал, что коэффициент трения ИПУ в 1,5 раза ниже, чем у АТГ-С (рис. 3). ИПУ обладает стабильным значением коэффициента трения во времени, в то время как коэффициент трения АТГ-С стабилизируется только на 3-й минуте работы.

Полученные данные по скорости изнашивания показали, что АТГ-С изнашивается в 7 раз быстрее, чем ИПУ плотностью $2,11 \text{ г/см}^3$ (см. таблицу). Выявлено также, что коэффициент трения и скорость изнашивания ИПУ демонстрируют тенденцию к снижению по мере увеличения плотности материала. Сопоставление полученных результатов с данными, приведенными в публикации [8], позволяет сделать вывод, что повышение скорости испытания не приводит к возрастанию коэффициента трения ИПУ. Объяснение этому может быть дано при рассмотрении механизма изнашивания углеграфитовых материалов в процессе высокоскоростного трения.

Шлифы ИПУ исследовали в поляризованном свете для выявления дефектов структуры. Из рис. 4, а видно, что структура ИПУ однородная, плотная и бездефектная. После испытания на поверхности образцов ИПУ образовались следы взаимодействия трущихся поверхностей (рис. 4, б), но выкрашивание отсутствует. Можно сказать, что в процессе испытания существенных изменений в структуре ИПУ не произошло. В структуре АТГ-С (рис. 5, а) видны поры и трещины,

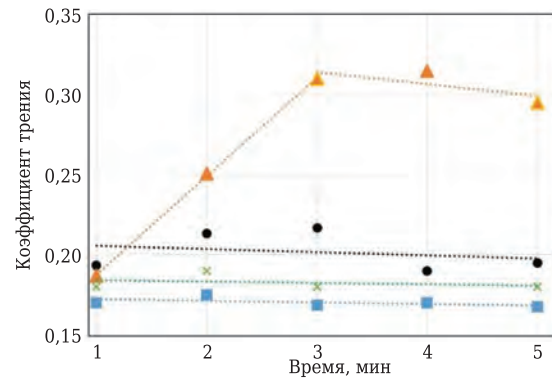


Рис. 3. График зависимости коэффициента трения от времени для различных антифрикционных углеграфитовых материалов при линейной скорости 126 м/с и удельной нагрузке 0,9 МПа: ■ — ПГИ 2,11; × — ПГИ 1,89; ● — ПГИ 1,84; ▲ — АТГ-С

Скорость изнашивания различных АУМ

Номер выборки	Материал	Плотность, г/см ³	Скорость изнашивания, мг/с
1	ИПУ	2,11	0,0031±0,0009
2	ИПУ	1,89	0,0094±0,0023
3	ИПУ	1,84	0,0156±0,0011
4	АТГ-С	1,96	0,0206±0,0027

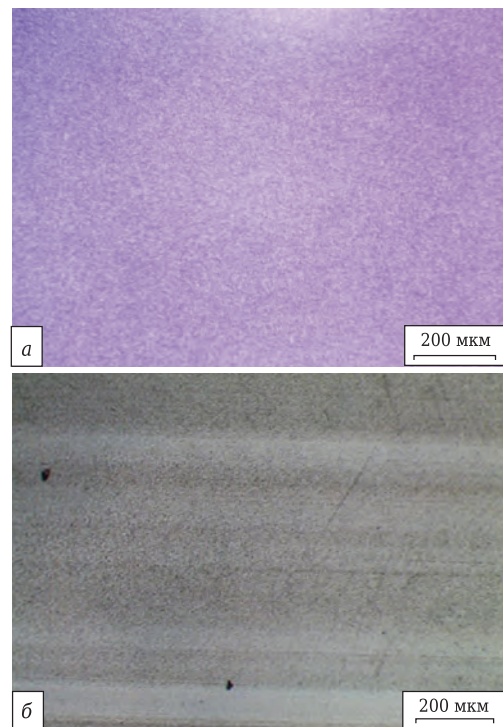


Рис. 4. Микроструктура ИПУ, $\gamma = 2,11 \text{ г/см}^3$: а — до испытания; б — после испытания

включения калиймарганцевого ультрафосфата (более светлые зерна). Из рис. 5, б видно, что после испытания границы зерен графита и включений калиймарганцевого ультрафосфата становятся более размытыми.

Из анализа рис. 6 и 7 следует, что механизм изнашивания поверхности трения ИПУ и АТГ-С

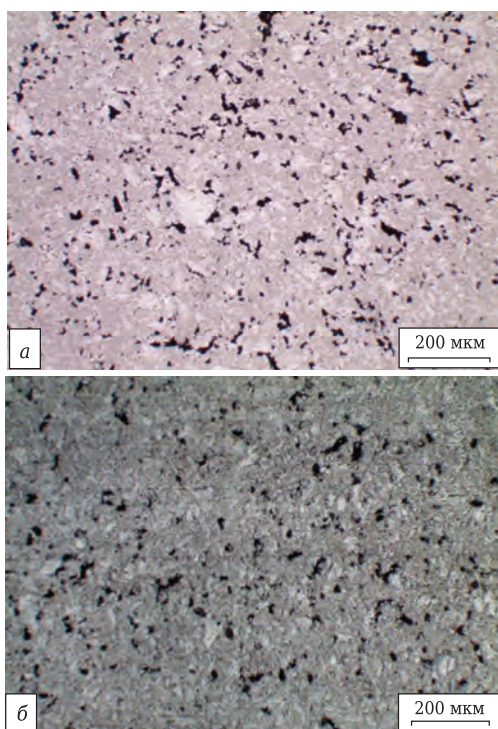


Рис. 5. Микроструктура АТГ-С: а — до испытания; б — после испытания

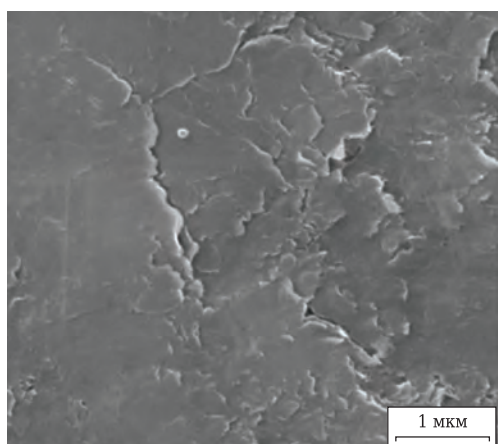


Рис. 6. Фрактограмма дорожки трения ИПУ, $\gamma = 2,11 \text{ г/см}^3$; стрелкой указано направление вращения

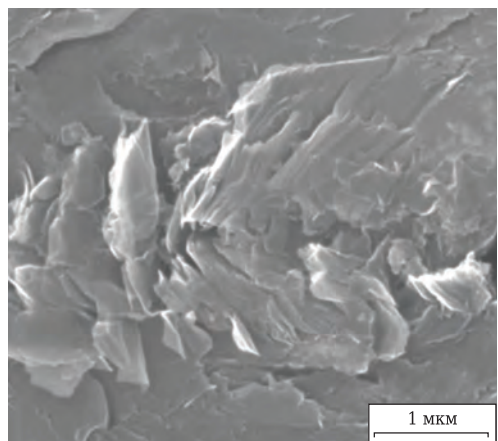


Рис. 7. Фрактограмма дорожки трения антифрикционного графита АТГ-С; стрелкой указано направление вращения

принципиально различается. Благодаря особенностям микроструктуры ИПУ (см. рис. 4, а) в процессе трения нанослой ИПУ отделяются и располагаются параллельно плоскости трения, что облегчает приработку материала (см. рис. 6). Судя по виду поверхности трения изнашивание ИПУ происходит «послойно» по механизму усталостного износа [3]. У антифрикционного графита АТГ-С макрослой разориентированы; имеются слои, расположенные под разными углами к плоскости трения, что затрудняет его приработку. Слои, перпендикулярные плоскости трения, тормозят движение трущихся деталей, «задираются», что приводит к локальному перегреву и неоднородному износу (см. рис. 7). На графитовых слоях наблюдается нарушение сплошности, появившееся предположительно в результате царапания поверхности более твердой частицей, чем графит. Абразивные частицы могут появиться в результате выкрашивания зерен смешанного ультрафосфата. В данном случае имеет место смешанный тип износа: наряду с усталостным механизмом износа действует также абразивный механизм [3].

Общепринято [9], что смазывающие свойства углеграфитовых материалов обусловлены их слоистой структурой, в которой атомы монослоя упакованы плотно и прочно связаны между собой за счет sp^2 -гибридизации, тогда как сами монослои разделены и непрочны связаны между собой за счет ван-дер-ваальсовых сил. Это позволяет легко разрушать межслоевые связи при сдвиге. Вместе с тем установлено, что углеродные материалы имеют в вакууме или инертной среде высокий коэффициент трения, а в кислороде или в водяных парах довольно низкий [7]. Это означает, что слоистость структуры сама по себе не гарантирует низкого коэффициента трения. Необходимым условием обеспечения антифрикционности углеграфитовых систем является присутствие газов воздуха и/или водяных паров [10]. Исключительно важным является то обстоятельство, что в результате процессов, развивающихся на трущихся поверхностях, в графитовых слоях образуются ненасыщенные активные ковалентные связи, последующее взаимодействие которых с контртелами стимулирует адгезию трущихся поверхностей друг к другу и, как следствие, повышает коэффициент трения. С другой стороны, пассивация этих ненасыщенных связей за счет сорбции газов переводит трибологические процессы в антифрикционную область и обеспечивает низкий коэффициент трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что ИПУ благодаря уникальности организации своей микро- и наноструктуры перспективен для эксплуатации в узлах трения силовых турбоагрегатов при высоких скоростях вращения.

2. Получены данные о скорости изнашивания и коэффициенте трения ИПУ в режиме сухого трения при линейной скорости 126 м/с и удельной нагрузке 0,9 МПа. Скорость изнашивания ИПУ снижается от 0,016 до 0,003 мг/с по мере роста плотности материала от 1,84 до 2,11 г/см³. Коэффициент трения при тех же условиях показывает тенденцию к снижению от 0,21 до 0,16.

3. Показано, что при разрушении в процессе изнашивания фрагменты углеродных нанослоев ИПУ располагаются параллельно поверхности трения, что способствует снижению коэффициента трения.

4. Анализ результатов трибологических испытаний показал, что ИПУ имеет коэффициент трения в 1,5 раза ниже и скорость изнашивания в 7 раз ниже, чем антифрикционный графит АТТ-С.

Авторы выражают благодарность конструкторскому бюро ООО «Вириал» и лично его начальнику С. А. Вашарину и инженеру-конструктору А. А. Давыдову за помощь в процессе модернизации трибостенда.

Библиографический список

1. Паровай, Е. Ф. Актуальные проблемы надежности узлов трения газотурбинных двигателей / Е. Ф. Паровай, И. Д. Ибатуллин // Вестник СГАУ. — 2015. — № 2/3. — С. 375–383. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-375-383.
2. Елисеев, Ю. С. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, С. А. Колесников, Ю. Н. Васильев. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 368 с.
3. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун [и др.] ; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2003. — 576 с.
4. Дроздов, Ю. Н. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики / Ю. Н. Дроздов, В. А. Надеин, Т. М. Савинова // Трение и износ. — 2008. — Т. 29, вып. 1. — С. 22–28.
5. Ткаченко, С. Н. Поверхностное легирование деталей из углерод-углеродистых композиционных материалов для авиационной промышленности с целью повышения жаростойкости / С. Н. Ткаченко // Вісник двигунобудування. — 2014. — № 1. — С. 147–151.

6. Румянцев, В. И. Изотропный пироуглерод как наноструктурированный композиционный материал / В. И. Румянцев, А. С. Осмаков, А. Е. Кравчик, Н. М. Радциг // Электронный научно-технический журнал «Новости материаловедения». — 2013. — № 1. — С. 2.
7. Xiao, J. Anisotropic friction behavior of highly oriented pyrolytic graphite / J. Xiao // Carbon. — 2013. — № 65. — P. 53–62. DOI: 10.1016/j.carbon.2013.07.101.
8. Нешпор, В. С. Структура и физические свойства разновидностей пирографита // Химическое газофазное осаждение тугоплавких неорганических материалов / В. С. Нешпор. — Л.: ГИПХ, 1976. — С. 32–63.
9. Антипов, Ю. В. Машиностроение. Т. II-4. Энциклопедия. Неметаллические материалы / Ю. В. Антипов, П. Г. Бабаевский, Ф. Я. Бородай [и др.] ; под ред. А. А. Кулькова. — М.: Машиностроение, 2005. — С. 219–230.
10. Семенов, А. П. Высокотемпературные твердые смазочные вещества / А. П. Семенов // Трение и износ. — 2007. — Т. 28, вып. 5. — С. 525–538. ■

Получено 04.10.19

© В. А. Хорев, В. И. Румянцев, Г. А. Пономаренко, А. С. Осмаков, В. Н. Фиццев, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

 Coalesce Research Group

3rd European Congress on Material Science & Nanotechnology

24–25 сентября, 2020 | Париж, Франция

<https://coalesceresearchgroup.com/conferences/materialresearch>