

Научная статья

УДК 621.892.5

doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-39

Сравнение трибологических свойств алмазоподобного покрытия в паре со сталью / керамикой при сухом трении и граничной смазке

Илья Александрович Буяновский¹, д.т.н.

Владимир Дмитриевич Самусенко², к.т.н.

Юрий Иванович Щербаков³, научн. сотр.

^{1, 2, 3} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

¹ buyan37@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-5095>

² samusenkovd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8093-5372>

³ Shcherbakov_1949@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9786-3491>

Аннотация. Проведённые в последние десятилетия исследования, подтверждённые опытом многолетнего практического использования в узлах трения различных механизмов и машин, применяемых в народном хозяйстве, показали, что эффективным путём обеспечения их долговечности, надёжности и энергосбережения является нанесение алмазоподобных углеродных покрытий на поверхности трения контактирующих деталей этих узлов трения. В настоящее время установлено, что эффективность применения этих покрытий в значительной мере определяется условиями их функционирования и материалами контактирующих деталей. В представленной статье сравниваются по антифрикционным свойствам пары трения, в которых исследуемые стальные образцы с аморфным алмазоподобным углеродным покрытием, нанесённым на сталь через промежуточный слой алюминитрида титана, изнашиваются в условиях сухого трения и граничной смазки. В качестве изнашивающего контртела используются стандартные шарики из стали ШХ-15 и керамики на основе нитрида кремния. Трибологические эксперименты проводятся на известной лабораторной установке КТ-2 с модернизированным узлом трения, позволяющим реализовать контакт изнашивающего шарика с тремя горизонтально расположенными роликами, на цилиндрические поверхности которых нанесено исследуемое покрытие. В статье приведён анализ полученных результатов этих экспериментов. Помимо испытаний алмазоподобного покрытия для сравнения приведены данные по испытаниям образцов без покрытий и с покрытием только слоем алюминитрида титана. Более твердый материал контртела может значительно влиять на трибологические свойства, разрушая покрытия, тем самым сводя положительные эффекты от антифрикционных свойств покрытий, и даже приводить к повышенному износу за счёт образовавшихся абразивных частиц в зоне трения.

Ключевые слова: алмазоподобное покрытие, аморфный углерод, коэффициент трения, износ, керамический изнашивающий образец, полиальфаолеиновое масло, промежуточное покрытие

Благодарности: авторы выражают благодарность профессору Левченко В.А. (Международный объединённый институт перспективных технологий, г. Тайчжоу, Китай) за ценные замечания и интерес к работе.

Для цитирования: Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И. Сравнение трибологических свойств алмазоподобного покрытия в паре со сталью / керамикой при сухом трении и граничной смазке // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-39

Comparison of tribological properties of a DLC jointly with steel / ceramics under dry friction and boundary lubrication

Ilya A. Buyanovsky¹, D. Eng.
Vladimir D. Samusenko², Ph.D. Eng.
Yuri I. Shcherbakov³, RF

^{1, 2, 3} Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

¹ buyan37@mail.ru

² samusenkovd@gmail.com

³ Shcherbakov_1949@mail.ru

Abstract. Studies conducted in the last decade having proven experience of many years of practical use in friction units of various mechanisms and machines used in the national economy, have shown that the effective way to ensure their longevity, reliability and energy conservation is to apply DLC coatings on the friction surfaces of contacting parts in these friction nodes. It has now been established that the effectiveness of the use of these coatings is determined to a large extent by the conditions of their operation and the materials of the contacting parts. In the presented article, friction pairs are compared in terms of anti-friction properties, in which the studied steel samples with an amorphous DLC coating applied to steel through an intermediate layer of titanium aluminide wear out under conditions of dry friction and film lubrication. Standard balls made of bearing chromium alloyed steel and ceramics based on silicon nitride are used as a wearing coupled element. Tribological experiments are carried out on the well-known laboratory installation KT-2 with an up-graded friction unit, which allows for the contact of a wearing ball with three horizontally positioned rollers, on the cylindrical surfaces of which the coating under study is applied. The article provides an analysis of the results of these experiments. In addition to DLC coating tests, data on tests of uncoated and coated samples with only a layer of titanium aluminide are provided for comparison. A harder coupled element material can significantly affect the tribological properties, destroying coatings, thereby reducing the positive effects of the antifriction properties of coatings, and even lead to increased wear due to the formed abrasive particles in the friction zone.

Keywords: DLC coating, amorphous carbon, slip coefficient, wear, ceramic wear sample, polyalphaoleic oil, intermediate coating

Acknowledgements: the authors express their gratitude to Professor V.A. Levchenko (International Joint Institute of Advanced Technologies, Taizhou, China) for valuable comments and interest in the subject matter.

For citation: Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Shcherbakov Yu.I. Comparison of tribological properties of a DLC jointly with steel / ceramics under dry friction and boundary lubrication / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-39

Введение

Одним из наиболее эффективных методов обеспечения надёжности и высокой долговечности тяжело нагруженных узлов трения машин и механизмов является нанесение покрытий трибологического назначения на контактирующие поверхности сопряжённых деталей этих узлов [1]. К таким покрытиям относятся алмазоподобные покрытия (АПП), именуемые в англоязычной печати DLC (Diamond-Like Carbon) покрытиями, т. е. покрытиями алмазоподобным углеродом [2]. Такие покрытия успешно применяются для предохранения магнитных слоёв жёстких дисков компьютеров от износа и повреждений, в

микроэлектромеханических системах, в ответственных узлах трения машин и механизмов, в авиакосмической, автомобильной, биомедицинской, металлообрабатывающей (для покрытия режущего инструмента), и в других отраслях народного хозяйства, функционируя в широком интервале условий нагружения, как всухую, так и в смазочных средах [3, 4]. При этом DLC обладают комплексом таких важнейших характеристик, как высокая твёрдость, модуль упругости, износостойкость, низкий коэффициент трения, химическая инертность, какими не обладают другие известные твёрдые покрытия. В то же время основные физико-механические и трибологические характеристики DLC можно варьировать в достаточно

широких пределах путём направленного выбора технологии их нанесения или легируя различными элементами [5 – 7].

Предварительный выбор оптимального по трибологическим характеристикам DLC обычно производится на лабораторных машинах трения, обеспечивающих трение одноименных образцов с покрытием по одноименному образцу с тем же покрытием (DLC / DLC) [8], либо стальной образец по образцу с исследуемым покрытием (сталь / DLC), то есть изнашивающим образцом (контртелом) здесь служит сталь [9]. Учитывая разнообразие материалов, применяемых в современном машиностроении, представляет интерес определение трибологических свойств DLC в паре с различными материалами, в том числе имеющими высокую твёрдость. В предлагаемой статье такое исследование проводили на четырёхшариковой машине КТ-2 с узлом трения, модернизированным по схеме шар – три ролика, на цилиндрические поверхности которых нанесено аморфное углеродное покрытие с промежуточным слоем износостойкого покрытия алюмонитрида титана (AlTiN), обеспечивающего высокую адгезию слоя DLC к стали. Целью работы было сравнение эффективности антифрикционных и противоизносных характеристик образцов с покрытием при использовании в качестве контртела двух типов шариков: стального и керамического. Это сравнение проводили в условиях сухого трения и в среде инертного синтетического масла.

Материалы и методы

Представленная работа посвящена исследованию антифрикционных свойств углеродного алмазоподобного покрытия, нанесённого на стальные образцы. Образцы представляют собой стандартные подшипниковые ролики диаметром 8 мм из стали 100Cr6 (аналог отечественной стали ШХ-15), на цилиндрические поверхности которого для обеспечения хорошей адгезии покрытия к подложке наносят промежуточный слой алюмонитрида титана AlTiN, а поверх него слой алмазоподобного углерода общей толщины ~1,7 мкм. Методика нанесения такого покрытия подробно приведена в работе [10]. Антифрикционные свойства покрытия оценивали в процессе изнашивания его двумя типами стандартных подшипниковых шариков диаметром 12,7 мм – из стали ШХ-15 и керамического – из нитрида кремния Si₃N₄.

Оценка физико-механических характеристик образцов включала определение их нанотвёрдости и модуля упругости на нанотвердомере НаноСкан-4D. Испытания проведены в соответствии с ГОСТ Р 8.748–2011. В качестве индентора использовалась трёхгранная пирамида Берковича. Время нагружения и разгружения составляло 10 с, максимальная сила – 10 мН. Калибровку формы пирамиды и жёсткости прибора проводили на плавленом кварце. Значения этих характеристик приведены в табл. 1. Микрогеометрию поверхностей образцов оценивали на оптическом профилометре SNeox по профилю длиной 100 мкм вдоль образующей. Результаты оценки физико-механических характеристик приведены в табл. 1.

1. Физико-механические характеристики исследуемых образцов

1. Physical and mechanical characteristics of the studied samples

Образцы	Твёрдость <i>H</i> , ГПа	Модуль упругости <i>E</i> , ГПа	Параметр шероховатости <i>Ra</i> , мкм
Без покрытия	9,4 ± 1,5	250 ± 31	0,086
AlTiN	18,0 ± 2,4	264 ± 40	0,080
AlTiN + DLC	41 ± 9	440 ± 80	0,057

Триботехнические испытания проведены на разработанной в ИМАШ РАН четырёхшариковой машине трения КТ-2 с узлом трения, модернизированным по схеме вращающийся шарик – три ролика (рис. 1) [11].

Частота вращения шпинделя машины КТ-2 составляет $1,0 \text{ мин}^{-1}$. Осевая нагрузка на узел трения 110 Н. Продолжительность каждого испытания при заданной нагрузке – 60 мин. Момент трения измеряли торсионным динамометром. Графики зависимости коэффициента трения от времени испытания строились по усредненным результатам трёх повторных испытаний. После окончания каждого испытания при помощи микроскопа делаются фотографии пятен и дорожек износа, для оценки степени повреждения поверхности образцов.

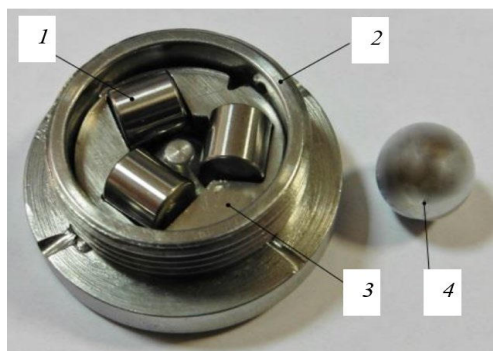


Рис. 1. Модернизированная оправка (накидная гайка снята):

1 – ролик; 2 – корпус оправки; 3 – сепаратор; 4 – изнашивающий шарик

Fig. 1. Upgraded to pin (coupling nut removed):

1 – roller; 2 – toe pin body; 3 – separator; 4 – wear ball

Цикл испытаний исследуемых образцов повторяют дважды: один раз без смазочного материала (при «сухом трении»), а второй раз – при граничной смазке полиальфаолефиновым маслом ПАО-4 ($v_{100} = 4,0 \text{ мм}^2/\text{с}$). При этих испытаниях граничный режим смазки обеспечивается высокими контактными давлениями и низкой скоростью относительного перемещения верхнего шарика относительно трёх нижерасположенных цилиндрических роликов.

Трибологические испытания – результаты и обсуждение

Результаты трибологических экспериментов представлены ниже в виде зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний и соответствующих микрофотографий пятен износа на роликах и дорожек износа на изнашивающих шариках.

Результаты трибологических испытаний образцов без покрытий со стальным и керамическим шарами приведены на рис. 2. При испытаниях без смазочного материала изменение коэффициента трения имеет одинаковую динамику и близкие значения, износ на роликах достаточно большой, износ стального шара также хорошо виден, износ керамического шара не ярко выражен, а на дорожке трения образовался слой из перенесённого материала ролика. При испытаниях со смазочным материалом коэффициент трения при установившемся режиме значительно снижается с 0,85 до 0,48 при стальном шаре, и до 0,19 при керамическом шаре.

Сравнение данных по трибологическим испытаниям образцов с покрытием AlTiN приведено на рис. 3. Как видно, без смазочного материала коэффициенты трения приведённых зависимостей (см. рис. 3, кривые 1 и 2) близки по динамике изменения и значениям, хотя на этапе приработки коэффициент трения выше с керамическим шаром, что возможно связано с разрушением покрытия из-за высокой твёрдости шара. В то же время, размеры пятен износа, а также дорожка износа на стальном шарике заметно различаются: достаточно чётко видно из рис. 3, что керамический шар обеспечил изнашивание исследуемого покрытия до стали в месте контакта, также на нём виден слой переноса материала. В результате разрушения покрытия мы фактически имеем трение керамический шар – сталь ШХ-15, с присутствующими абразивными частицами от разрушенного покрытия, что приводит к повышенному изнашиванию поверхности ролика.

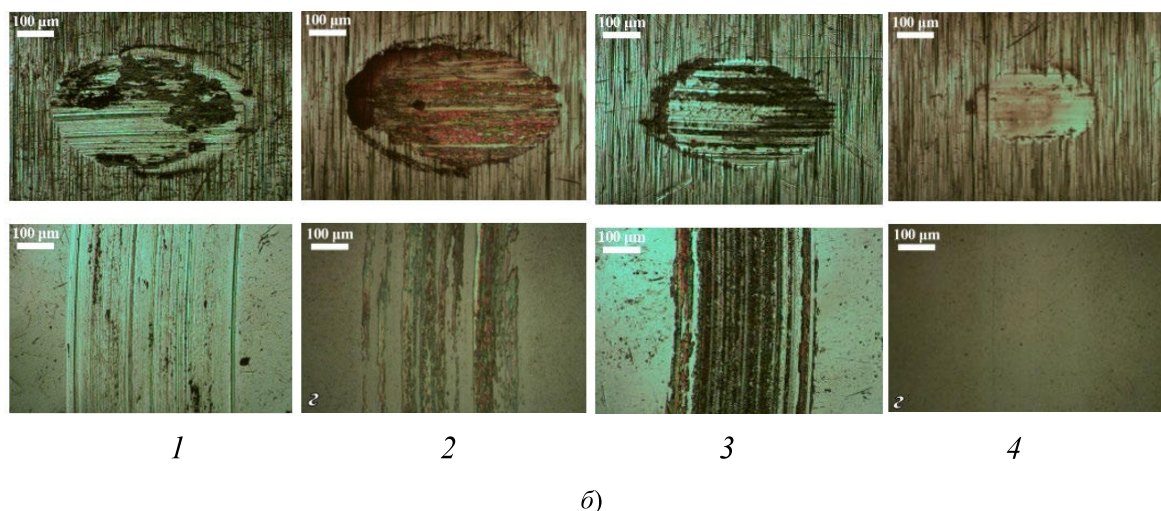
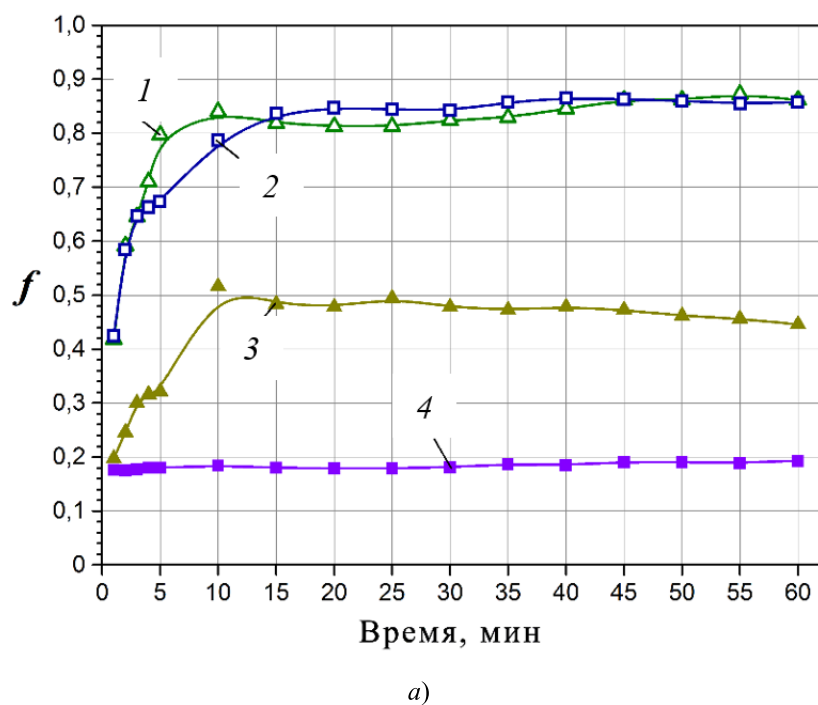
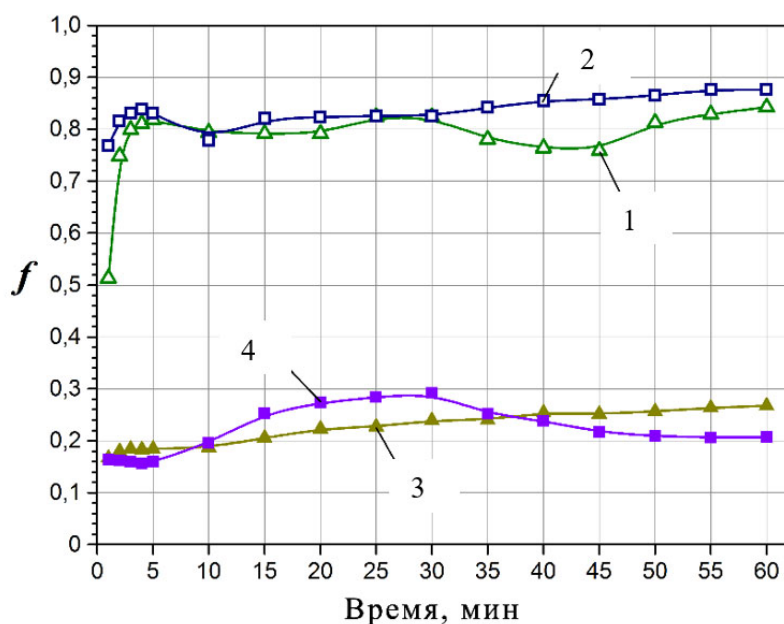


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от времени испытаний (а) для образцов без покрытий и фоторафии (б) пятен износа (вверху) и дорожек трения на шарах (внизу) для пар трения: 1 – Ст-Ст без СМ; 2 – Кер-Ст без СМ; 3 – Ст-Ст ПАО-4; 4 – Кер-Ст ПАО-4

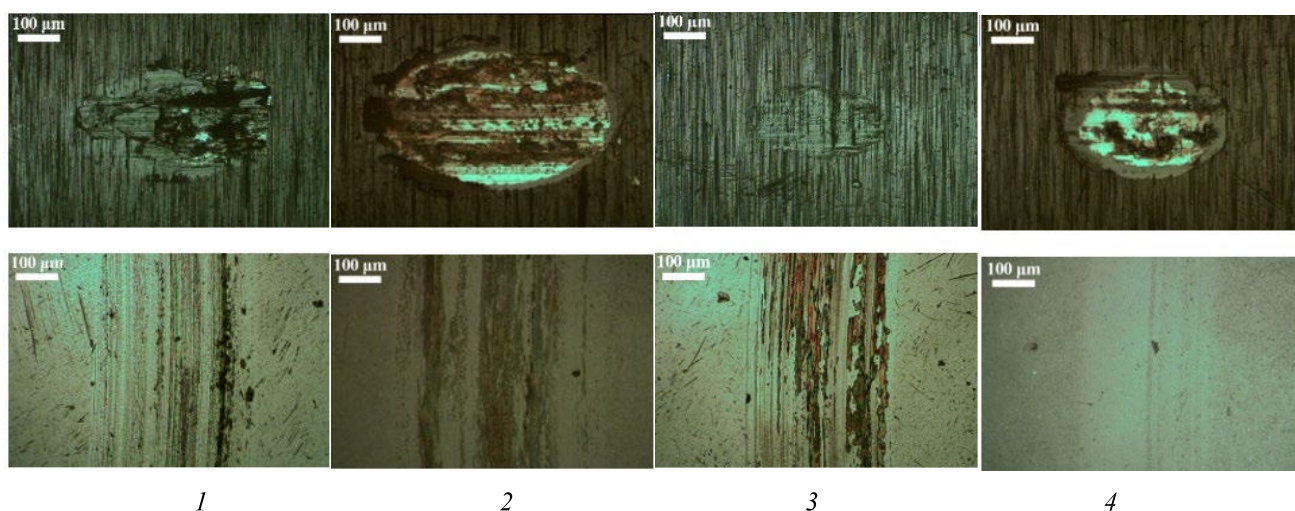
Fig. 2. Dependences of the slip coefficient on the test time (a) for uncoated samples and photographs (b) of wear spots (top) and friction tracks on the balls (bottom) for friction pairs: 1 – St-St without SM; 2 – Cer-St without SM; 3 – St-St PAO-4; 4 – Cer-St PAO-4

Результаты испытаний AlTiN покрытия в смазочной среде ПАО-4 (см. рис. 3, кривые 3 и 4) показывают, что наличие даже инактивной смазочной среды заметно улучшает антифрикционные свойства пары трения и уменьшает размер пятна износа, как при изнашивании стальным шариком, так и при изнашивании керамическим шариком, хотя покрытие всё равно разрушается, хоть и в меньшей

степени. Коэффициент трения при испытании со стальным шаром постепенно возрастает по мере повреждения покрытия, при испытании с керамическим шаром коэффициент трения имеет более сложную зависимость от времени, с ростом до 30 мин, после чего происходит снижение, что вероятно связано с процессом разрушения покрытия.



a)



b)

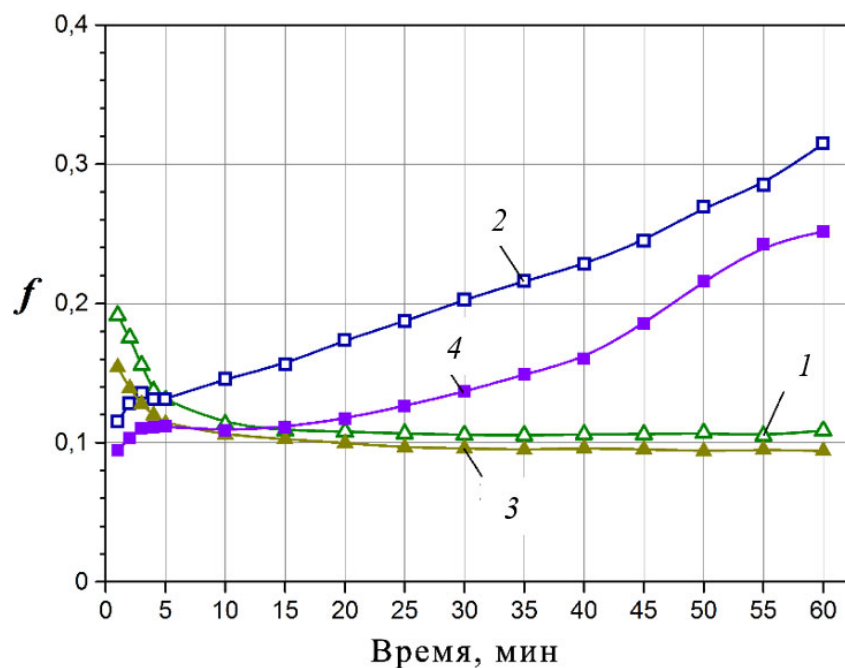
Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от времени испытаний (a) для образцов с покрытием AlTiN и фоторафии (b) пятен износа (вверху) и дорожек трения на шарах (внизу) для пар трения: 1 – Ст-AlTiN без СМ; 2 – Кер-AlTiN без СМ; 3 – Ст-AlTiN ПАО-4; 4 – Кер-AlTiN ПАО-4

Fig.3. Dependences of slip coefficient of friction on the test time (a) for AlTiN coated samples and photographs (b) of wear spots (top) and friction tracks on balls (bottom) for friction pairs:

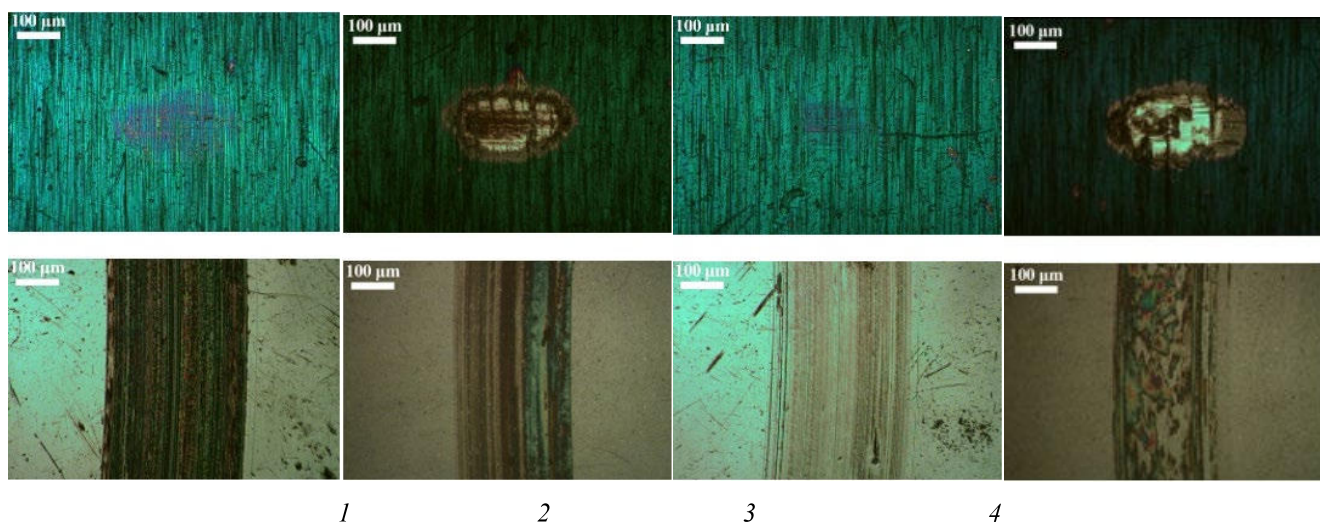
1 – St-AlTiN without SM; 2 – Cer-AlTiN without SM; 3 – St-AlTiN PAO-4; 4 – Cer-AlTiN PAO-4

Результаты испытаний покрытия AlTiN + DLC показаны на рис. 4. Керамический шар также изнашивает это покрытие, в результате постепенного изнашивания покрытия мы видим, как это отображается в постепенном росте коэффициента трения в процессе испытания, как без смазочного материала (см. рис. 4, кривая 2), так и в среде

ПАО-4 (см. рис. 4, кривая 4). Стальной шар не изнашивает значительно покрытие за время испытания и коэффициент трения остается постоянным (см. рис. 4, кривые 1 и 3), после завершения этапа приработки, по значениям коэффициента трения без смазочного материала немного выше, чем с ПАО-4.



а)



б)

Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от времени испытаний (а) для образцов с покрытие AlTiN+DLC и фоторафии (б) пятен износа (вверху) и дорожек трения на шарах (внизу) для пар трения: 1 – Ct-AlTiN+DLC без СМ; 2 – Кер-AlTiN+DLC без СМ; 3 – Ct-AlTiN+DLC ПАО-4; 4 – Кер-AlTiN+DLC ПАО-4

Fig. 4. Dependences of slip coefficient on the test time (a) for samples coated with AlTiN+DLC and photographs (b) of wear spots (top) and friction tracks on the balls (bottom) for friction pairs:

1 – Ct-AlTiN+DLC without SM; 2 – Cer-AlTiN+DLC without SM; 3 – Ct-AlTiN+DLC PAO-4; 4 – Cer-AlTiN+DLC PAO-4

Рассмотренные выше результаты измерения пятен износа на исследованных образцах в процессе проведения оценки

антифрикционных свойств рассмотренных трибосопряжений сведены в виде столбчатой диаграммы на рис. 5.

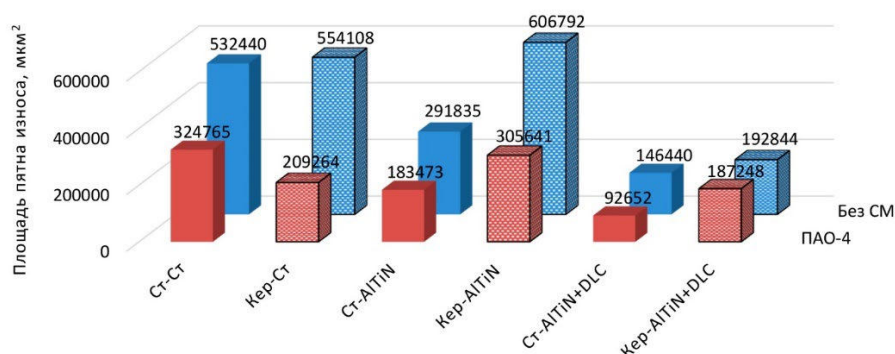


Рис. 5. Диаграмма значений площадей пятен износа на роликах

Fig. 5. Diagram of the values of the areas of wear spots on the rollers

Таким образом, гистограммы площадей пятен износа на роликах позволяют установить, что максимальные площади пятен износа были получены при трении без смазочного материала стального и керамического шариков по стальному ролику, и керамического шарика по ролику с покрытием AlTiN. По-видимому, это объясняется тем, что при трении стали по стали происходит заметное схватывание между поверхностями, а при трении с керамическим шариком более твёрдый материал эффективно изнашивает стальной ролик, при трении же керамического шарика по покрытию AlTiN в результате разрушения этого покрытия его частицы оказывают дополнительное абразивное действие в контакте, что приводит к увеличению износа (см. рис. 3, б, поз. 2). При нанесении на покрытие AlTiN тонкого слоя DLC ситуация заметно изменяется: резко снижается износ покрытия при изнашивании как стальным, так и керамическим шариками. Наконец, смазывание рабочих поверхностей контактирующих образцов приводит к значительному снижению износа поверхности всех образцов. Хотя по-прежнему, при изнашивании в режиме граничной смазки наибольшие износы для этих пар трения наблюдаются в парах трения сталь – сталь, сталь – керамика и AlTiN – керамика.

Заключение

Нанесение дополнительного слоя алмазоподобного покрытия, как видно из рис. 4,

обеспечило больший антифрикционный и противоизносный эффект, чем наблюдался на рис. 2 от применения смазочной среды при испытаниях со стальным шаром. При наличии покрытия AlTiN + DLC в паре со сталью смазывание маслом ПАО-4 почти не влияет на антифрикционные и противоизносные характеристики пары трения, лишь незначительно снижая износ образцов, за счёт разделения их граничной смазочной пленкой.

Смазочный материал ПАО-4 смягчает условия трения, что сказывается на снижении коэффициента трения и износе образцов. Однако, в случае с керамическим контртелом это является недостаточным для предотвращения разрушения покрытия.

При трении керамического шара по исследуемым покрытиям во всех случаях происходит разрушение покрытий. По-видимому, при тяжёлом режиме граничной смазки пару трения керамика – AlTiN + DLC следует применять с осторожностью, поскольку керамическое контртело может интенсивно изнашивать защитное покрытие даже в смазочной среде. Разрушение покрытия будет приводить к образованию твёрдых абразивных частиц, и усиливать изнашивание деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Албагачиев А.Ю. Трибологические свойства эффективных покрытий деталей машин и режущего инструмента. В кн.: Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин / Отв. ред. Г.В. Москвитин. М.: ЛЕНАНД., 2019. С. 55–72.
2. Donnet C., Erdemir A. (ed.). Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media, 2007. 664 с.

3. **Hauert R.** An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications // Tribology International. 2004. Т. 37. №. 11-12. С. 991–1003.

4. **Kalin M. et al.** Review of boundary lubrication mechanisms of DLC coatings used in mechanical applications // Meccanica. 2008. Т. 43. С. 623–637.

5. **Tyagi A. et al.** A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications // International journal of refractory metals and hard materials. 2019. Т. 78. С. 107–122.

6. **Bewilogua K., Hofmann D.** History of diamond-like carbon films – From first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology. 2014. Т. 242. С. 214–225.

7. **Семёнов А.П.** Трибологические свойства и вакуумно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 1. С. 83–102.

8. **Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Левченко В.А.** Использование нитрида титана и алюмонитрида титана как промежуточных слоёв для алмазоподобных покрытий // В кн.: Триботехника-машиностроению: Труды XII Международной конференции. М.: ИМАШ РАН. 2020. С. 58–62.

9. **Zahid R. et al.** Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: a review // Tribology Letters. 2015. Т. 58. С. 1–28.

10. **Левченко В.А. и др.** Антифрикционные свойства алмазоподобного покрытия и алюмонитрида титана в модельных смазочных средах // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 6. С. 706–711.

11. **Матвеевский Р.М.** Методы и аппаратура для оценки триботехнических свойств смазочных материалов // В кн.: Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. М.: Машиностроение. 1989. С. 20–47.

12. **Буяновский И.А., Хрущев М.М., Самусенко В.Д.** Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке. Ч. 1. Структура, методы испытаний, смазка адсорбционным слоем // Материаловедение. 2021. № 9. С. 3–18.

REFERENCES

1. Albogachiev A.Y. Tribological properties of effective coatings of machine parts and cutting tools. In the book: Promising methods of surface treatment of machine parts / Publ. ed. G.V. Moskvitin. Moscow: LENAND., 2019, pp. 55–72.

2. Donnet C., Erdemir A. (ed.). Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media, 2007. 664 c.

3. Hauert R. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications // Tribology International. 2004. Т. 37. №. 11-12. С. 991–1003.

4. Kalin M. et al. Review of boundary lubrication mechanisms of DLC coatings used in mechanical applications // Meccanica. 2008. Т. 43. С. 623–637.

5. Tyagi A. et al. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications // International journal of refractory metals and hard materials. 2019. Т. 78. С. 107–122.

6. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – From first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology. 2014. Т. 242. С. 214–225.

7. Semenov A.P. Tribological properties and vacuum-plasma methods for obtaining diamond and diamond-like coatings // Friction and wear, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 83–102.

8. Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Levchenko V.A. The use of titanium nitride and titanium aluminide as intermediate layers for aluminum-like coatings // In the book: Tribotechnika-mashinostroyeniye: Proceedings of the XII International Conference. Moscow: IMASH RAS, 2020, pp. 58–62.

9. Zahid R. et al. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: a review // Tribology Letters. 2015. vol. 58. pp. 1–28.

10. Levchenko V.A. et al. Antifriction properties of diamond-like coating and aluminidatitan in model lubricant media // Friction and wear, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 706–711.

11. Matveevsky R.M. Methods and equipment for evaluating tribotechnical properties of lubricants // In the book: Lubricants: antifriction and anti-wear properties. Test methods: Handbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, pp. 20–47.

12. Buyanovsky I.A., Khrushchev M.M., Samusenko V.D. Diamond-like carbon coatings: tribological behavior in boundary lubrication. Part 1. Structure, test methods, lubrication with an adsorption layer // Materials science, 2021, no. 9, pp. 3–18.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.03.2024; одобрена после рецензирования 22.03.2024; принята к публикации 28.03.2024

The article was submitted 16.03.2024; approved after reviewing 22.03.2024; assepted for publication 28.03.2024