

*П. Г. Иваночкин, Е. Д. Аникина, Е. П. Больших*

### **АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОНТРТЕЛА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АНТИФРИКЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ, СОДЕРЖАЩИМ ПТФЭ \***

**Аннотация.** Проведен анализ изменения состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием на основе ткани с волокном ПТФЭ при использовании термостойкого матричного связующего холодного отверждения на основе фенилона. Анализ проводился на основе трибологических испытаний на машине трения ИИ-5018 по схеме «вал – частичный вкладыш». Для оценки состояния поверхности был использован интерференционный микроскоп – оптический профилометр NewView-600 фирмы ZYGO. Показано, что после приработки величина среднего арифметического отклонения профиля от средней линии на протяжении всего периода работы трибосистемы сохраняет значение, не превышающее  $R_a \leq 0,5$  мкм, что обеспечивает работоспособность трибосопрежения.

**Ключевые слова:** антифрикционное покрытие, ткань с волокном ПТФЭ, связующее холодного отверждения, поверхность металлического контртела, трибологические испытания.

**Для цитирования:** Иваночкин, П. Г. Анализ состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ / П. Г. Иваночкин, Е. Д. Аникина, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 28–33. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_28.

#### ***Введение***

Широкое применение в узлах трения антифрикционных самосмазывающихся композиционных материалов на основе полимеров основано на их способности обеспечивать требуемые трибологические характеристики и уменьшать ползучесть материала при том уровне температур, которые реализуются в узле трения, а также обеспечивать нормальный режим работы при неравномерной подаче смазки, что обусловлено их способностью формировать вторичные структуры на поверхности контртела. Особая роль среди этой группы материалов принадлежит композитам на основе тканых материалов. Композиционный материал на основе ткани с волокном ПТФЭ с фенолформальдегидным связующим выдерживает статическую нагрузку 560,0 МПа без проявления тенденций к холодному течению. При создании тканых антифрикционных покрытий на основе волокон ПТФЭ в качестве матрицы чаще всего применяются термореактивные полимерные клеи: фенолформальдегидные, эпоксидные, полиуретановые, полиэфирные и т.д. Однако нанесение таких покрытий обычно выполняется при горячем отверждении, что препятствует их использованию для крупногабаритных трибосистем. В работах [1, 2] была предложена технология создания композиционных покрытий с матричным связующим холодного отверждения на основе АФК-101 (ГИПК-114), однако это связующее работоспособно только до 250 °С (кратковременно до 300 °С), что существенно ограничивает скоростной режим работы узла трения. Целью проводимых исследований является установление возможности применения более термостойкого матричного связующего при сохранении или даже повышении адгезионной прочности покрытий. Представляется перспективным использовать для этого связующее на основе фенилона – ароматического полиамида (плавление при 430 °С).

#### ***Материалы и методы***

Как было отмечено ранее, использование фторопластсодержащих антифрикционных покрытий позволяет обеспечить эффективную работу узлов трения и способствует повышению эксплуатационного ресурса и минимальных потерь на трение [3–5]. Отличительной особенностью работы этого класса покрытий является формирование в зоне контакта фрикционной пленки переноса, возникающей за счет переноса материала полимерного композита на поверхность металлического контртела.

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (Соглашение от 10.01.2024. № 109-03-2024-007).

На машине трения ИИ-5018 были проведены трибологические испытания по схеме «вал – частичный вкладыш». Покрытие исследуемой структуры наносилось на внутреннюю поверхность частичного вкладыша (сегмент с углом раствора  $60^\circ$ ). В качестве контртела использовался ролик из стали Ст45. Испытания проводились при скорости относительного скольжения 0,2 м/с и удельной нагрузке 5,0 МПа в течение 8 ч после приработки. По окончании проведения испытаний исследовали профилограмму поверхности ролика вдоль базовой линии (в направлении поперек дорожки трения) на трех участках по длине окружности.

Для описания топографии поверхности широко применяется геометрический подход, при котором оперируют понятиями волнистости, шероховатости и макроотклонений поверхностного рельефа [6–9]. Данный подход обычно используется для описания результатов механической обработки поверхности: строгание, фрезерование, точение и т.д. При таком подходе шероховатость поверхности обусловлена режимами обработки и является неким «следом» рабочего инструмента. Разработана система классов шероховатости, каждому классу шероховатости поставлены в соответствие параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии  $R_a$ , высота неровностей  $R_z$ , средний шаг неровностей профиля  $S_m$ , наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ .

В работе [10] изложены современные представления о формировании шероховатости, методах ее измерения и анализа. Детально исследованы подходы, используемые при описании шероховатости, отмечено, что наряду со статистическими методами анализа поверхностного рельефа сегодня находят применение методы анализа на базе нечеткой логики и машинного обучения, нейросетевых вычислений.

Для оценки состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ, был использован интерференционный микроскоп – оптический профилометр NewView-600 фирмы ZYGO. Обработку данных выполняли с помощью программного обеспечения MetroPro 9, позволяющего полученные результаты выводить на монитор и сохранять в виде файла данных и 3D-изображения. Для анализа использовались следующие характеристики поверхности: Profile Plot – профилограмма поверхности вдоль базовой линии, Amplitude Spectrum Plot – спектральный график амплитуды, Histogram Plot – распределение высот шероховатости поверхности и Autocovariance Plot – график ковариации.

### **Обсуждение и результаты**

В работе [11] сделан вывод о том, что топография металлической контрповерхности является преобладающим фактором в определении величины скорости износа полимерных композитов в сильно различающихся условиях скольжения. Показано, что скорости износа полимеров по этим поверхностям изменяются обратно пропорционально среднему радиусу кривизны неровностей поверхности контртела, а форма изменения полимерного образца согласуется с усталостной теорией износа.

Подобный вывод сделан и в работах [12, 13], где отмечено, что на стадии установившегося износа в случае сухого трения металлополимерной пары величина шероховатости поверхности полимерного композита коррелирует с величиной весового износа.

Стальные ролики, используемые при испытаниях, имели следующие исходные параметры микрогеометрии: среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии  $R_a = 0,9–1,2$  мкм, средняя высота неровностей  $R_z = 1,26–2,8$  мкм, средний радиус микронеровностей  $R_{n, \text{cp}} = 1,19$  мкм.

На триботехнические испытания большое влияние оказывает приработка, в ходе которой идет процесс перестройки поверхностных слоев, взаимодействующих тел. Приработка испытываемых покрытий характеризуется временем и толщиной приработанного слоя, стабилизацией микрорельефа поверхностей трения. В работе [14] отмечено, что для покрытий рассматриваемого типа рациональным давлением приработки является величина от 1,7 до 3,2 МПа, а в результате приработки в течение 60 мин параметры микрогеометрии роликов становятся следующими:  $R_{max} = 3,0–5,0$  мкм,  $R_z = 1,6–1,8$  мкм, средний радиус микронеровностей  $R_{n, \text{cp}} = 4,0–5,8$  мкм.

В процессе приработки в зоне контакта происходит износ покрытия и формирование на поверхности контртела пленки фрикционного переноса, заключающееся в переносе материала покрытия на поверхность ролика и частичном заполнении впадин на его поверхности. Контакт осуществляется по вершинам выступов взаимодействующих тел, что приводит к отделению большого числа частиц неправильной формы с поверхности более мягкого покрытия, которые способствуют равномерному заполнению впадин и осаждению тонкого слоя полимера на поверхности ролика [15]. Важным параметром, влияющим на процессы изнашивания, является наклон сторон пиков неровностей. В вышеупомянутой работе было показано, что наклон сторон пиков прямо пропорционален среднеквадратичному отклонению профиля шероховатости.

Следует иметь в виду, что процесс трения представляет собой нелинейный неравновесный процесс, характеризующийся возникновением диссипативных структур и обусловленный притоком энергии при трении. Возникает эффект группового воздействия на обрабатываемую поверхность, связанный с появлением в зоне контакта вторичных структур, оказывающих влияние во множестве точек взаимодействия пары трения.

В работе [16] исследована кинетика образования пленки фрикционного переноса во фторопластсодержащих антифрикционных покрытиях рассматриваемой структуры. В первый период трения на поверхность контртела переносятся продукты фенилона, а затем за счет электрического взаимодействия на поверхность фенилона переносится политетрафторэтилен. В результате на поверхности контртела формируется двухслойная структура, обеспечивающая снижение коэффициента трения и приводящая к сглаживанию поверхности металлического контртела, что, в свою очередь, способствует снижению скорости изнашивания пары трения. Скольжение в течение 8 ч приводит к заполнению впадин и осаждению равномерного слоя полимера. В результате происходит контакт между пленкой вторичных структур на поверхности металлического контртела и внутренней поверхностью частичного вкладыша. При этом создаются условия для стационарного режима изнашивания.

Результаты исследования поверхности ролика вдоль базовой линии (в направлении поперек дорожки трения) после проведения трибологических испытаний на трех участках по длине окружности приведены в таблице.

#### Шероховатости роликов после трения с фторопластсодержащим композитом

Материал композита	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3	Среднее
Композиционный материал на основе ткани с волокном ПТФЭ со связующим на основе фенилона	0,309	0,525	0,409	0,414

#### Выводы

Анализ проведенных исследований показывает эффективность применения связующего холодного отверждения на основе фенилона для создания композиционного материала на основе ткани с волокном ПТФЭ. Соотношение полимерное связующее – техническая ткань в рассматриваемых композициях иначе влияет на служебные свойства материалов. Отличительной особенностью используемых покрытий является необходимость обеспечения не только требуемых механических свойств композита, но и показателей шероховатости металлического контртела.

Топография поверхности контртела в период приработки изменяется в результате переноса полимерного композита на металлическую поверхность. В режиме стационарного изнашивания поверхность контртела, сформированная в результате переноса, остается неизменной.

Разница в жесткости полимерного покрытия и металлического контртела способствует тому, что для эффективной работоспособности сопряжения требуется обеспечить после приработки значение среднего арифметического отклонения профиля от средней линии не более  $R_a \leq 0,5$  мкм.

#### Список литературы

- 1 **Больших, И. В.** Матричный материал для антифрикционного полимерного композита / И. В. Больших, В. А. Кохановский // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 5. – С. 33–37. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Больших, И. В.** Нанесение полимерных покрытий с матрицей холодного отверждения / И. В. Больших, В. А. Кохановский, А. В. Илларионов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3. – С. 11–16. – ISSN 1818-5509.

#### References

- 1 **Bolshikh, I. V.** Matrix material for antifriction polymer composite / I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovsky // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2014. – No. 5. – P. 33–37. – ISSN 1818-5509.
- 2 **Bolshikh, I. V.** Application of polymer coatings with a cold-curing matrix / I. V. Bolshikh, V. A. Kokhanovsky, A. V. Illarionov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2016. – No. 3. – P. 11–16. – ISSN 1818-5509.

3 **Машков, Ю. К.** Полимерные композиционные материалы в триботехнике : монография / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, М. Ю. Байбарацкая. – Москва : Недра, 2004. – 262 с. – ISBN 5-8365-0188-2.

4 Нанокomпозиционные машиностроительные материалы : опыт разработки и применения / С. В. Авдейчик [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 403 с. – ISBN 985-417-779-3.

5 **Кохановский, В. А.** Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов (обзор) / В. А. Кохановский, Ю. А. Петров // Вестник Донского государственного технического университета, 2009. – Т. 9, № 1 (40). – С. 30–35. – ISSN 1992-5980.

6 **Демкин, Н. Б.** Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 244 с.

7 **ГОСТ Р ИСО 4287–2014.** Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности : профильный метод. Термины, определения и параметры структуры : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : дата введения 2016-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 21 с.

8 **Томас, Т. Р.** Топографические параметры шероховатости / Т. Р. Томас, О. А. Горленко // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 3. – С. 551–555. – ISSN 0202-4977.

9 **Хусу, А. П.** Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.

10 **Григорьев, А. Я.** Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. – Минск : Белорусская наука, 2016. – 247 с. – ISBN 978-985-08-1999-4.

11 **Hollander, A. E.** An application of topographical analysis to the wear of polymer / A. E. Hollander, J. K. Lancaster // Wear. – 1973. – Vol. 25, No. 2. – P. 155–170. – ISSN 0043-1648.

12 Role of micro- and nanofillers in abrasive wear of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene / S. V. Panin, L. A. Kornienko, L. R. Ivanova, S. V. Shilko // Advanced Materials Research. – 2014. – No. 1040. – P. 148–154. – ISSN 1662-8985.

13 Анализ влияния наполнения композита маслом на состояние поверхности металлического контртела / П. Г. Иваночкин, Е. С. Новиков, А. И. Азоян, М. Д. Аникина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018 – № 3 (71). – С. 16–22. – ISSN 0201-727X.

3 **Mashkov, Yu. K.** Polymer composite materials in tribology : monograph / Yu. K. Mashkov, Z. N. Ovchar, M. Yu. Baibaratskaya. – Moscow : Nedra, 2004. – 262 p. – ISBN 5-8365-0188-2.

4 Nanocomposite engineering materials : experience of development and application / S. V. Avdeychik [et al.]. – Grodno : Grodno State University, 2006. – 403 p. – ISBN 985-417-779-3.

5 **Kokhanovsky, V. A.** Friction and wear of fluoroplastic-containing composites (review) / V. A. Kokhanovsky, Yu. A. Petrov // Bulletin of Don State Technical University. – 2009. – Vol. 9, No. 1 (40). – P. 30–35. – ISSN 1992-5980.

6 **Demkin, N. B.** Surface quality and contact of machine parts / N. B. Demkin, E. V. Ryzhov. – Moscow : Mashinostroenie, 1981. – 244 p.

7 **GOST R ISO 4287–2014.** Geometrical characteristics of products. Surface structure : profile method. Terms, definitions and parameters of structure : national standard of the Russian Federation : official edition : date of introduction 2016-01-01. – Moscow : Standartinform, 2019. – 21 p.

8 **Thomas, T. R.** Topographic parameters of roughness / T. R. Thomas, O. A. Gorlenko // Friction and wear. – 1990. – Vol. 11, No. 3. – P. 551–555. – ISSN 0202-4977.

9 **Khusu, A. P.** Surface roughness (probability-theoretical approach) / A. P. Khusu, Yu. R. Wittenberg, V. A. Palmov. – Moscow : Nauka, 1975. – 344 p.

10 **Grigoriev, A. Ya.** Physics and microgeometry of technical surfaces / A. Ya. Grigoriev. – Minsk : Belarusian Science, 2016. – 247 p. – ISBN 978-985-08-1999-4.

11 **Hollander, A. E.** An application of topographical analysis to the wear of polymer / A. E. Hollander, J. K. Lancaster // Wear. – 1973. – Vol. 25, No. 2. – P. 155–170. – ISSN 0043-1648.

12 Role of micro- and nanofillers in abrasive wear of composites based on ultra-high molecular weight polyethylene / S. V. Panin, L. A. Kornienko, L. R. Ivanova, S. V. Shilko // Advanced Materials Research. – 2014. – No. 1040. – P. 148–154. – ISSN 1662-8985.

13 Analysis of the influence of filling a composite with oil on the surface condition of a metal counterbody / P. G. Ivanochkin, E. S. Novikov, A. I. Azoyan, M. D. Anikin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2018 – No. 3 (71). – P. 16–22. – ISSN 0201-727X.

14 Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнические характеристики / В. И. Колесников [и др.] // Труды ЮНЦ РАН. – Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2007. – Т. 2 : Физика. Механика. Техника. – С. 9–20. – ISSN 1993-6621.

15 Джейн, В. К. Изменения поверхностной топографии полимера и металла при скольжении. Ч. 1 / В. К. Джейн, С. Бахадур // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия F. Проблемы трения и смазки. – 1980. – Т. 102, № 4. – С. 111–117. – ISSN 0201-8160.

16 Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / И. В. Колесников, П. Д. Мотренко, В. И. Колесников, Д. С. Мантуров. – Москва : ВИНТИ РАН, 2021. – 168 с. – ISBN 978-5-902928-92-8.

14 Composite materials for friction units of rolling stock based on technical fabrics and their tribotechnical characteristics / V. I. Kolesnikov [et al.] // Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – Rostov-on-Don : Publishing House of the SSC of the RAS, 2007. – Vol. 2 : Physics. Mechanics. Engineering. – P. 9–20. – ISSN 1993-6621.

15 Jain, V. K. Changes in surface topography of polymer and metal during sliding. Part 1 / V. K. Jain, S. Bahadur // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Series F. Problems of Friction and Lubrication. – 1980. – Vol. 102, No. 4. – P. 111–117. – ISSN 0201-8160.

16 Increasing the wear resistance of metal and metal-polymer tribosystems by forming the structure and properties of their surface layer / I. V. Kolesnikov, P. D. Motrenko, V. I. Kolesnikov, D. S. Manturov. – Moscow : VINITI RAS, 2021. – 168 p. – ISBN 978-5-902928-92-8.

*P. G. Ivanochkin, E. D. Anikina, E. P. Bolshikh*

#### **ANALYSIS OF THE STATE OF THE METAL COUNTERBODY SURFACE IN INTERACTION WITH AN ANTIFRICTION COATING CONTAINING PTFE**

**Abstract.** The analysis of the change in the state of the metal counterbody surface in interaction with an antifriction coating based on fabric with PTFE fiber using a heat-resistant matrix binder of cold curing based on phenylone was carried out. The analysis was carried out on the basis of tribological tests on the friction machine II-5018 according to the scheme "shaft-partial liner". To assess the surface condition, an interference microscope - optical profilometer "NewView-600" from ZYGO was used. It is shown that after running-in, the value of the average arithmetic deviation of the profile from the mean line throughout the entire period of operation of the tribosystem retains a value not exceeding  $Ra \leq 0.5 \mu\text{m}$ , which ensures the operability of the tribocoupling.

**Keywords:** antifriction coating, fabric with PTFE fiber, cold-curing binder, surface of metal counterbody, tribological tests.

**For citation:** Ivanochkin, P. G. Analysis of the state of the metal counterbody surface in interaction with an antifriction coating containing PTFE / P. G. Ivanochkin, E. D. Anikina, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 28–33. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_28.

#### **Сведения об авторах**

##### **Иваночкин Павел Григорьевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Теоретическая механика»,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: ivanochkin\_p\_g@mail.ru

##### **Аникина Елена Дмитриевна**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Теоретическая механика»,  
аспирант,  
e-mail: al.anikina2002@mail.ru

#### **Information about the authors**

##### **Ivanochkin Pavel Grigoryevich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Theoretical Mechanics»,  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
e-mail: ivanochkin\_p\_g@mail.ru

##### **Anikina Elena Dmitrievna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Theoretical Mechanics»,  
Postgraduate Student,  
e-mail: al.anikina2002@mail.ru

**Больших Елизавета Павловна**

Ростовский государственный университет путей  
сообщения (РГУПС),  
кафедра «Теоретическая механика»,  
аспирант,  
e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru

**Bolshikh Elizaveta Pavlovna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Theoretical Mechanics»,  
Postgraduate Student,  
e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru