

*И. В. Больших, А. М. Ананко, Я. К. Склифус, Е. Д. Аникина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА \*

**Аннотация.** На сегодняшний день создание экономически эффективных и прочных фторсодержащих покрытий с высокой адгезионной прочностью к различным металлическим подложкам является актуальной задачей. Один из перспективных подходов заключается в создании многослойных покрытий, где фторсодержащий компонент формирует внешний слой, а внутренний слой, обогащенный армирующим компонентом, обеспечивает прочное сцепление с металлической подложкой. Механизм адгезии в таких композиционных материалах основан на оптимизации поверхностных взаимодействий. Стандартная методика оценки адгезионной прочности основана на измерении усилия, необходимого для отслаивания покрытия от субстрата при его отгибе на 180 градусов. Так как состав матричного связующего представляет собой трехкомпонентную систему, а их сумма равна 100 %, основой разработки стало использование симплекс-решетчатых планов типа состав-свойство.

**Ключевые слова:** полимерные материалы, матричное связующее, адгезионная прочность, фенилон, субстрат, порошок меди, трехкомпонентная система, симплекс-диаграмма.

**Для цитирования:** Исследование адгезионной прочности антифрикционных покрытий на основе фенилона / И. В. Больших, А. М. Ананко, Я. К. Склифус, Е. Д. Аникина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_20.

Фторсодержащие полимерные материалы, несмотря на свои уникальные свойства, такие как высокая химическая инертность, устойчивость к воздействию агрессивных сред и низкий коэффициент трения, стоят значительно дороже аналогов. Это обусловлено сложностью синтеза фторсодержащих мономеров и полимеров, а также необходимостью использования специального оборудования и технологий для их переработки. Еще одним существенным недостатком является плохая адгезия к высокоэнергетическим поверхностям, в частности к металлам. Поверхностная энергия металлов, таких как сталь, достигает сотен мДж/м<sup>2</sup>, значительно превышая поверхностную энергию фторсодержащих полимеров. Это различие в поверхностной энергии обуславливает слабое межмолекулярное взаимодействие между полимером и металлом, что приводит к низкой адгезионной прочности покрытия. Поэтому создание экономически эффективных и прочных фторсодержащих покрытий с высокой адгезионной прочностью к различным металлическим подложкам является актуальной задачей. Для решения этой проблемы активно разрабатываются различные композиционные материалы. Один из перспективных подходов заключается в создании многослойных покрытий, где фторсодержащий компонент формирует внешний слой, обеспечивающий гидрофобность, химическую стойкость и низкое трение, а внутренний слой, обогащенный нефторированным компонентом, обеспечивает прочное сцепление с металлической подложкой. Этот подход позволяет минимизировать количество дорогостоящего фторсодержащего компонента, сохраняя при этом желаемые свойства покрытия.

Механизм адгезии в таких композиционных материалах основан на оптимизации поверхностных взаимодействий. Низкое поверхностное натяжение фторсодержащего компонента способствует его миграции к поверхности, формируя внешний гидрофобный слой. В то же время нефторированный компонент, обладающий более высоким сродством к металлической подложке, обеспечивает прочную адгезию. Важно отметить, что скорость отверждения и плотность компонентов играют второстепенную роль по сравнению с поверхностными взаимодействиями, определяющими качество адгезии [1, 2].

Для достижения оптимального баланса между адгезией и гидрофобностью необходимо тщательно подбирать состав композиции и технологические параметры нанесения покрытия. Это включает в себя выбор фторсодержащего полимера (например, ПТФЭ, фторкаучуки, перфторалкилсодержащие

---

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

акрилаты), нефторированного компонента (например, эпоксидные смолы, полиуретаны, полиимиды) и возможных модификаторов поверхности. Технологии нанесения могут варьироваться от напыления и погружения до более сложных методов, таких как электрофоретическое осаждение или методы сополимеризации.

В данной работе используется армирующий каркас из органических волокон, включающий политетрафторэтиленовые (ПТФЭ) волокна и полиимидные нити. ПТФЭ-волокна обеспечивают гидрофобность и низкое трение, а полиимидные нити повышают прочность и адгезию композиционного материала. Выбор полиимидных нитей обусловлен их высокой термостойкостью, химической стойкостью и способностью к прочному взаимодействию с другими компонентами композиции. Включение армирующего каркаса позволяет создать покрытие с повышенной прочностью на изгиб и ударной вязкостью, что особенно важно для применения в условиях нагрузок и истирания. Геометрия и ориентация волокон в армирующем каркасе также влияют на механические свойства и адгезию покрытия. Для оптимизации этих параметров могут применяться различные методы формования композиционного материала, например прядение из расплава или раствора, термоформование [4].

Для обеспечения максимальной износостойкости и несущей способности раскрой ткани атласного переплетения производится с учетом направления скольжения. Фторопластовый и полиимидный утки ткани специально ориентируются вдоль вектора скорости скольжения. Этот технологический прием минимизирует износ и обеспечивает максимальную эффективность покрытия. Для определения величины прочности сцепления использовались стальные (сталь 45 – ГОСТ 1050-74) и латунные (Л63 – ГОСТ 15527-70) полоски толщиной 2 мм. Подбор материалов выполнялся из условия их универсальности в области машиностроения и возможности оценки эффективного использования разработанного покрытия на различных металлических субстратах [4].

Весь комплекс исследования адгезионной прочности разработанного антифрикционного покрытия на основе фенилона состоял из следующих этапов:

- подготовка матричного связующего;
- приготовление препрега;
- обработка поверхности металлических образцов;
- формирование покрытия и приготовление технологического пакета;
- испытание на отрыв.

На начальном этапе выполнялась подготовка матричного связующего. Благодаря ранее установленной концентрации фенилона и растворителя (диметилсульфоксида) было достигнуто оптимальное значение вязкости разработанного связующего, которая позволяла обеспечивать одновременно равномерную пропитку тканного каркаса и минимальную текучесть. После чего в матричную основу вводились модификаторы (мелкодисперсный порошок меди и масло), позволяющие улучшить триботехнические свойства связующего. Соединение всех компонентом происходило их тщательным и продолжительным перемешиванием. Варьирование компонентов матричного связующего находилось в интервалах, представленных в табл. 1 [5–7].

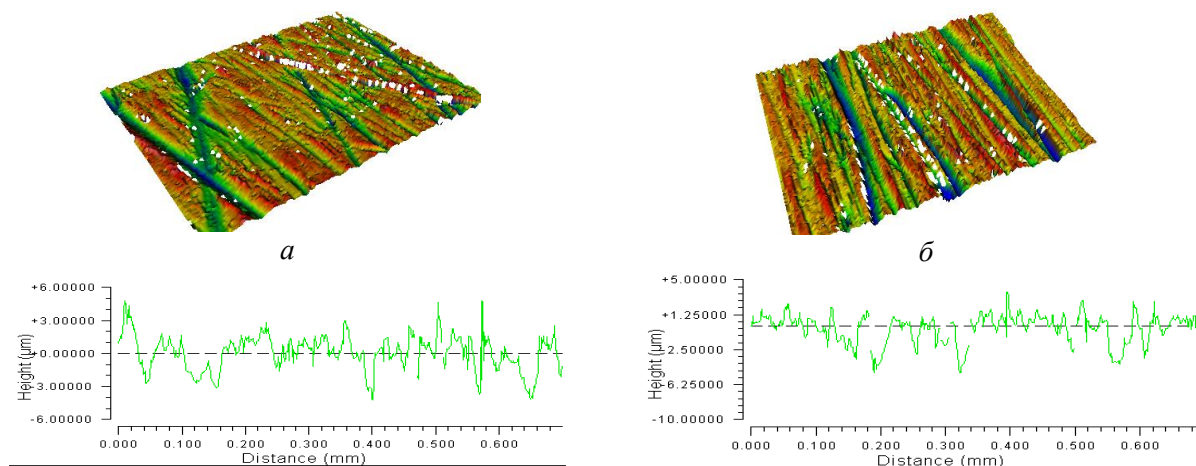
Таблица 1

#### Интервалы варьирования компонентов матричного связующего

№ п/п	Наименование	Диапазон варьирования в переменных, %	
		min	max
1	Фенилон	86	92
2	Масло	7	13
3	Порошок меди	1	7

В ходе проведения следующего этапа готовился препрег. Вдоль прочностных полиимидных нитей «аримид Т», вырезались полоски размером 12×45 мм. После чего на вырезанные полоски наносилось матричное связующее. Обязательным условием являлось нанесение связующего сначала на фторопластовые волокна, а затем на прочностные и укладка образцов волокнами политетрафторэтилена к низу. Это обеспечивало равномерную пропитку и распределение связующего по каркасу. Пропитанные образцы сушились при комнатной температуре 3 часа.

Этап подготовки поверхности заключался в обработке металлических образцов для нанесения композиционного покрытия при помощи наждачной бумаги Ф14А-25НМ с последующей очисткой нефрасом (ТУ 38.401-67-108-92) с целью удаления жировых отложений и загрязнений, а также сушкой и протиркой ацетоном (ГОСТ 27-62). По результатам обработки и очистки поверхности образцов удается достигнуть оптимальной величины шероховатости поверхности  $Ra = 1,187\text{--}1,201\ \mu\text{м}$  (рис. 1). Благодаря выполненной процедуре подготовки достигается надежное сцепление покрытия с подложкой.



**Рис. 1. Результаты исследования поверхности образцов для определения адгезионной прочности после подготовки:**

*a* – сталь 45; *б* – латунь Л62

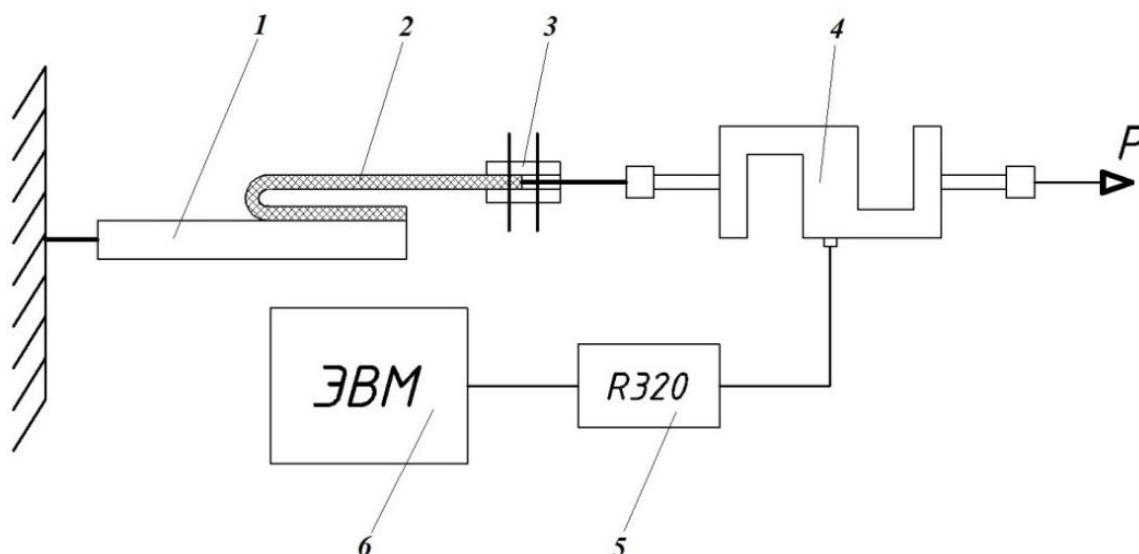
Нерабочую сторону препрега и место для наклейки на металлических образцах обрабатывали тонким слоем разработанного связующего. После чего соединяли подготовленные поверхности. Для предотвращения склеивания покрытия с оснасткой и образцами применяется антиадгезив – фторопластовая пленка. Формирование покрытия осуществлялось при помощи устройства для фиксации покрытия на образцах, представленного на рис. 2.



**Рис. 2. Технологический пакет для нанесения покрытия на образцы**

Прижимное приспособление состоит из нагрузочной пружины, верхней и нижней планок, стержней, распорных шайб и нагрузочных гаек для создания необходимой нагрузки. Использование тарированной пружины позволяет контролировать давление, обеспечивая равномерное отверждение и предотвращая образование внутренних напряжений, которые могут негативно влиять на адгезию [8].

Стандартная методика оценки адгезионной прочности основана на измерении усилия, необходимого для отслаивания покрытия от субстрата при его отгибе на 180 градусов. Схема установки, показанная на рис. 3, достаточно проста, но требует аккуратности в выполнении процедуры. Ключевым моментом является обеспечение равномерного контакта между покрытием и субстратом перед испытанием.



**Рис. 3. Схема установки для определения адгезионной прочности покрытий:**  
1 – субстрат; 2 – покрытие; 3 – фиксатор; 4 – тензодатчик; 5 – индикатор R320; 6 – ЭВМ

Результаты разрушения адгезионного шва, представленные на рис. 4 в виде поверхностей металлических пластин и композитных полосок, позволяют выполнить качественную оценку состояния адгезионного контакта.



**Рис. 4. Результаты разрушения адгезионного шва**

Существенный интерес представляет адгезионная прочность исследуемых связующих на разных подложках, средние значения которой указаны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Адгезионная прочность антифрикционного покрытия на стальном субстрате**

Параметры	Сила отслаивания, Н									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
Результаты опытов (среднее значение)	147,62	65,4	212,55	120,97	203,07	185,41	73,58	71,94	88,29	107,91
Адгезионная прочность, кН/м	13,02	5,45	18,76	10,08	16,9	15,45	6,13	5,995	7,36	8,99

Таблица 3

## Адгезионная прочность антифрикционного покрытия на латунном субстрате

Параметры	Сила отслаивания, Н									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
Результаты опытов (среднее значение)	226,45	88,29	297,57	156,96	232,74	222,44	122,63	95,65	101,37	179,4
Адгезионная прочность, кН/м	17,87	7,16	23,48	13,08	19,4	18,53	10,22	7,97	8,45	14,95

На основании анализа полученных данных после разрушения шва можно сделать следующие выводы:

- на образце из стали разрушение в основном происходит по субстрату, поскольку почти всё матричное связующее остается на покрытии;
- при разрушении адгезионного шва на латунной пластине наблюдается разрушение как по субстрату, так и по покрытию, но преимущественно по субстрату;
- адгезионная прочность шва на латунном субстрате на порядок выше, чем на стальном.

Так как состав матричного связующего представляет собой трехкомпонентную систему, а их сумма равна 100 %, основой разработки стало использование симплекс-решетчатых планов типа «состав – свойство». На рис. 5 показана симплекс-диаграмма.

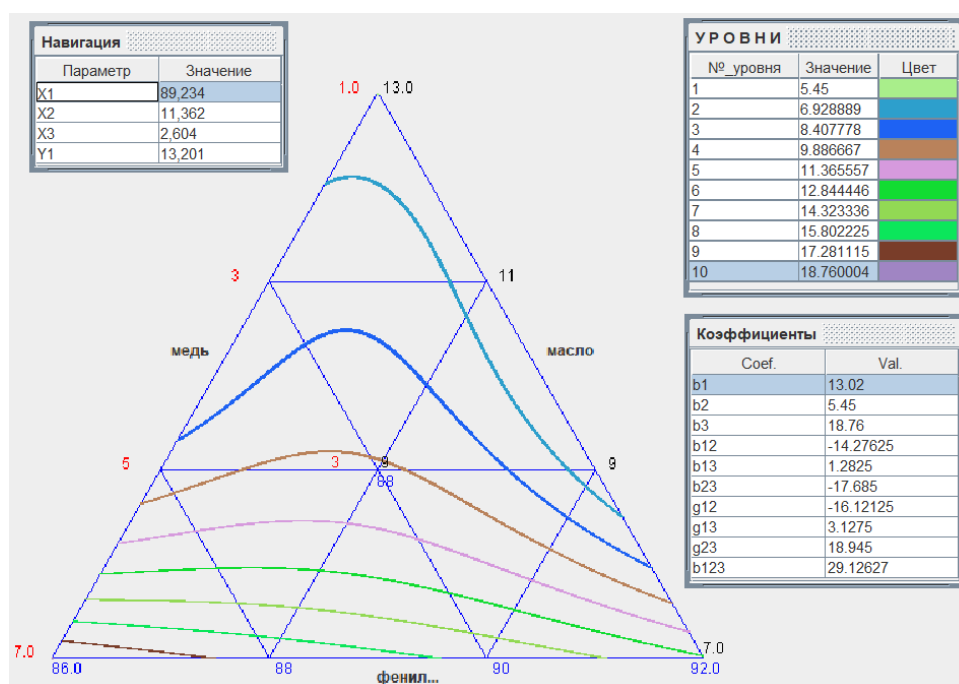


Рис. 5. Симплекс-диаграмма исследования адгезионной прочности на латунном субстрате

**Выводы**

1 Обнаружены возможности для повышения адгезионной прочности шва как за счет оптимизации вязкоупругих свойств связующих на основе фенилона, так и путем улучшения подготовки поверхности субстрата.

2 Полученные результаты подтверждают целесообразность применения модифицированного матричного связующего на основе фенилона, обладающего улучшенной термостойкостью.

3 Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных добавок и модификаторов на свойства покрытия, а также на разработку новых, более эффективных технологий его получения и нанесения.

4 Для поиска оптимального состава матричного связующего необходимо изучить влияние компонентов на вязкоупругие и триботехнические характеристики антифрикционного полимерного покрытия [9].

5 Анализируя симплекс-диаграмму, делаем вывод, что наибольшей адгезионной прочностью обладает образец с составом матричного связующего в т. 3 (86 % фенилона, 7 % индустриального масла и 7 % порошка меди).

### Список литературы

1 The influence of surface nanostructures on the formation mechanism of the anti-friction layer at tribocontact / V. I. Kolesnikov, P. G. Ivanochkin, N. A. Myasnikova [et al.] // International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2017. – P. 121–131. – DOI 10.1007/978-3-319-56062-5\_35.

2 **Колесников, И. В.** Системный анализ и синтез процессов, происходящих в металлополимерных узлах трения фрикционного и антифрикционного назначения : монография / И. В. Колесников ; отв. ред. Резер Семен Моисеевич ; Российская академия наук. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2017. – 381 с. – ISBN 978-5-902928-72-0.

3 **Sidashov, A. V.** Research of fluoroplast-containing nanostructured coating on the surface of steel / A. V. Sidashov, M. V. Boyko, A. T. Kozakov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 96–101. – ISSN 1818-5509.

4 **Кохановский, В. А.** Износостойкость металлополимерных систем с композиционным покрытием / В. А. Кохановский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 13–19. – ISSN 1819-2092.

5 **Кохановский, В. А.** Адгезия антифрикционных полимерных покрытий / В. А. Кохановский, И. В. Больших, Д. С. Мантуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 16–20. – ISSN 0201-727X.

6 **Мантуров, Д. С.** Матричное связующее для антифрикционного полимерного композиционного покрытия / Д. С. Мантуров, И. В. Больших, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 3 (95). – С. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_3\_36.

7 Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). –

### References

1 The influence of surface nanostructures on the formation mechanism of the anti-friction layer at tribocontact / V. I. Kolesnikov, P. G. Ivanochkin, N. A. Myasnikova [et al.] // International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. – New York : Nova Science Publishers, 2017. – P. 121–131. – DOI 10.1007/978-3-319-56062-5\_35.

2 **Kolesnikov, I. V.** System analysis and synthesis of processes occurring in metal polymer friction units for frictional and antifriction purposes : monograph / I. V. Kolesnikov ; ed. Rezer Semyon Moiseevich ; Russian Academy of Sciences. – Moscow : All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 2017. – 381 p. – ISBN 978-5-902928-72-0.

3 **Sidashov, A. V.** Research of fluoroplast-containing nanostructured coating on the surface of steel / A. V. Sidashov, M. V. Boyko, A. T. Kozakov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 4 (53). – P. 96–101. – ISSN 1818-5509.

4 **Kokhanovsky, V. A.** Wear resistance of metal polymer systems with composite coating / V. A. Kokhanovsky // Friction and lubrication in machines and mechanisms. – 2007. – No. 1. – P. 13–19. – ISSN 1819-2092.

5 **Kokhanovsky, V. A.** Adhesion of antifriction polymer coatings / V. A. Kokhanovsky, I. V. Bolshykh, D. S. Manturov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2017. – No. 4 (68). – P. 16–20. – ISSN 0201-727X.

6 **Manturov, D. S.** Matrix binder for antifriction polymer composite coating / D. S. Manturov, I. V. Bolshykh, E. P. Bolshykh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 3 (95). – P. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_3\_36.

7 Effective polymer phosphoromolybdate additive for lubricants / M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. –

C. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_172.

8 **Кохановский, В. А.** Формирование антифрикционного композиционного покрытия. / В. А. Кохановский, Е. А. Бородин // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1, № 3 (9). – С. 155–159. – ISSN 1992-5980.

9 **Belyak, O. A.** Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Vol. 57, No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

2023. – No. 2 (90). – P. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_172.

8 **Kokhanovsky, V. A.** Formation of an antifriction composite coating. / V. A. Kokhanovsky, E. A. Borodin // Bulletin of DSTU. – 2001. – Vol. 1, No. 3 (9). – P. 155–159. – ISSN 1992-5980.

9 **Belyak, O. A.** Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Vol. 57, No. 5. – P. 647–656. – DOI 10.1007/s11029-021-09986-7.

*I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina*

### INVESTIGATION OF THE ADHESIVE STRENGTH OF ANTIFRICTION PHENYLENE-BASED COATINGS

**Abstract.** Today, the creation of cost-effective and durable fluorinated coatings with high adhesive strength to various metal substrates is an urgent task. One of the promising approaches is to create multilayer coatings, where the fluorinated component forms the outer layer, and the inner layer, enriched with a reinforcing component, provides strong adhesion to the metal substrate. The adhesion mechanism in such composite materials is based on the optimization of surface interactions. The standard method for assessing adhesive strength is based on measuring the force required to peel the coating from the substrate when it is bent 180 degrees. Since the composition of the matrix binder is a three-component system, and their sum is 100%, the basis for the development was the use of simplex lattice plans of the composition-property type.

**Keywords:** polymer materials, matrix binder, adhesive strength, phenylene, substrate, copper powder, three-component system, simplex diagram.

**For citation:** Investigation of the adhesive strength of antifriction phenylene-based coatings / I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_4\_20.

#### Сведения об авторах

##### **Больших Иван Валерьевич**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Тяговый подвижной состав»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

##### **Ананко Анатолий Михайлович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
научно-образовательный центр  
научно-исследовательской части  
«Ресурсосберегающие технологии»,  
руководитель группы,  
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

##### **Склифус Ярослав Константинович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Тяговый подвижной состав»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: yaroslav.sklifus@mail.ru

#### Information about the authors

##### **Bolshikh Ivan Valerievich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Traction Rolling Stock»,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

##### **Ananko Anatoly Mikhailovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Scientific and Educational Center of the Research  
Department «Resource-Saving Technologies»,  
Head of the Group,  
e-mail: nypotilitailla@mail.ru

##### **Sklifus Yaroslav Konstantinovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair «Traction Rolling Stock»,  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: yaroslav.sklifus@mail.ru

**Аникина Елена Дмитриевна**

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

**Anikina Elena Dmitrievna**

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