

И. В. Больших, Е. П. Больших, Е. Д. Аникина, Я. К. Склифус

АДГЕЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ С МАТРИЦЕЙ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ *

Аннотация. Создание экономичных и долговечных покрытий на основе фторсодержащих соединений является одной из самых важных задач современной науки. Однако высокая стоимость фторопласта, являющегося ключевым компонентом, обуславливает постоянный поиск путей снижения стоимости производства рассматриваемых покрытий без снижения их эксплуатационных характеристик. Ключевая идея заключается в создании многослойного покрытия, где каждый слой выполняет свою специфическую функцию. Матричное связующее представляет собой трёхкомпонентную систему: каучук, медь порошковая и дисульфид молибдена. Проведенные исследования адгезионной прочности композиционного покрытия, нанесенного на стальную подложку, выполнялись методом отслаивания образцов под углом 180 градусов.

Ключевые слова: композит, армирующая основа, матричное связующее, адгезионная прочность, каучук, контактные поверхности, порошок меди, дисульфид молибдена, оптимальный состав.

Для цитирования: Адгезионная прочность антифрикционных полимерных покрытий с матрицей холодного отверждения / И. В. Больших, Е. П. Больших, Е. Д. Аникина, Я. К. Склифус // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 190–196. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_190.

Введение

В современном машиностроении, особенно в узлах трения, работающих под высокими нагрузками при относительно низких скоростях, широко применяются полимерные композитные покрытия, содержащие фторопласт. Эти покрытия обладают исключительными антифрикционными свойствами, что критически важно для повышения долговечности и эффективности механизмов. Ключевым элементом таких композитов является армирующая основа – специальная ткань, чаще всего саржевого или атласного плетения, обладающая полуторослойной структурой. Это означает, что ткань имеет сложную многослойную структуру, обеспечивающую высокую прочность и износостойкость. На внешнюю, рабочую поверхность этой ткани выведены фторопластовые нити, известные под торговым названием «полифен». Фторопласт благодаря своей уникальной химической инертности и низкому коэффициенту трения обеспечивает превосходные антифрикционные характеристики покрытия. С изнаночной стороны, прилегающей к металлической подложке или субстрату, ткань армирована полиимидными нитями, именуемыми «Аримид-Т». Полиимидные волокна обеспечивают прочное сцепление с основой и повышают общую прочность композитного материала [1–3].

Создание экономичных и долговечных покрытий на основе фторсодержащих соединений, прочно сцепляющихся с различными металлическими поверхностями, является одной из самых важных задач современной науки и инженерного дела. Эти покрытия крайне востребованы во многих областях, от аэрокосмической промышленности до химического машиностроения, где необходима защита от агрессивных сред и высоких температур. Речь идет о разработке материалов, которые были бы не только эффективными, но и экономически целесообразными в производстве. Основной задачей является поиск новых подходов к созданию таких покрытий, применение различных модификаторов и совершенствование технологии нанесения. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка новых полимерных композитов, которые смогли бы сочетать в себе высокую эффективность и экономическую целесообразность. Ключевая идея заключается в создании многослойного покрытия, где каждый слой выполняет свою специфическую функцию. Внешний слой, непосредственно подвергающийся воздействию окружающей среды, состоит преимущественно из фторсодержащего компонента – вещества, обеспечивающего превосходную гидрофобность (водоотталкивающие свойства), высокую химическую стойкость к агрессивным веществам (кислотам, щелочам, растворителям) и низкий коэффициент трения. Это позволяет существенно продлить срок службы защищаемого изделия и снизить потери от износа.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (Соглашение от 13.01.2025 г. № 109-03-2025-007).

Однако фторсодержащие материалы, как правило, дороги. Поэтому экономически выгодный подход предполагает минимизацию использования дорогостоящего фторопласта. Внутренний слой композиционного покрытия разработан таким образом, чтобы обеспечить надежную адгезию к металлическому субстрату (основе). Этот слой, в отличие от внешнего, практически не содержит фторсодержащих компонентов, что значительно снижает себестоимость покрытия. Состав матричного связующего тщательно подбирается с учетом типа металла и условий эксплуатации, чтобы обеспечить максимальную прочность сцепления с основой [4–6].

Для соединения армирующей ткани и создания монолитного покрытия используется связующее – это может быть фенольный, эпоксидный или компаунд на основе каучука, которые в большинстве случаев отверждаются при нагреве. Выбор связующего существенно влияет на температурный диапазон работы покрытия. Так, в зависимости от типа используемого матричного связующего температурный интервал эксплуатации может варьироваться от -70 до $+430$ °С, что охватывает широкий спектр промышленных применений. Однако высокая стоимость фторопласта, являющегося ключевым компонентом, обуславливает постоянный поиск путей удешевления производства рассматриваемых покрытий без снижения их эксплуатационных характеристик.

Проектирование таких многослойных структур требует детального анализа свойств каждого слоя и взаимодействия между ними, а также оптимизации параметров технологического процесса нанесения, чтобы гарантировать равномерность и прочность всего покрытия. Кроме того, важно обеспечить надёжное соединение между слоями, предотвращающее отслоение и снижение эффективности работы покрытия. В конечном итоге это способствует созданию более долговечных и экономически выгодных антифрикционных покрытий для широкого спектра промышленных применений. Проведенные исследования адгезионной прочности композиционного покрытия, нанесенного на стальную подложку, выполнялись методом отслаивания образцов под углом 180 градусов. Это стандартный метод, позволяющий объективно оценить силу сцепления покрытия с основой. Процесс создания такого многослойного покрытия является многоэтапным и требует предельной точности на каждом этапе. На начальном этапе готовится матричное связующее – основа будущего композита. Оптимизация концентрации связующего вещества – критически важный шаг, от которого зависит вязкость смеси и, как следствие, равномерность пропитки тканого каркаса, который может служить основой для покрытия. Этап подготовки матрицы требует тщательного контроля, так как от него зависит итоговая структура и свойства всего покрытия. После достижения необходимой консистенции в матрицу вводят различные модификаторы, в частности мелкодисперсный порошок меди и дисульфид молибдена. Эти добавки играют ключевую роль в улучшении триботехнических свойств покрытия, снижая коэффициент трения и износ. Тщательное и продолжительное перемешивание компонентов на данном этапе гарантирует однородность смеси на молекулярном уровне, что напрямую влияет на качество и надежность конечного покрытия. Только при условии достижения идеальной однородности можно гарантировать стабильные свойства и долговечность создаваемого материала. В итоге разработка и оптимизация каждого этапа технологического процесса – от выбора компонентов до контроля качества смешивания – является залогом создания высокоэффективного и экономически выгодного фторсодержащего покрытия. Недостаточное перемешивание может привести к неравномерному распределению модификаторов, что в свою очередь сказалось бы на конечных свойствах материала. Длительность этого процесса определялась экспериментально и зависела от многих факторов, начиная от вязкости связующего и заканчивая размером частиц модификаторов.

Следующий этап включал в себя подготовку антифрикционного покрытия, готового к нанесению на подложку. В рамках проведенного исследования для повышения прочности и надежности разрабатываемых покрытий было решено использовать в качестве армирующего компонента высокопрочные полиимидные нити, известные под торговым наименованием «Аримид-Т». Из этих нитей вырезались тщательно подготовленные полоски строго определенных размеров: 45 мм в длину и 12 мм в ширину. Геометрия полосок была выбрана не случайно, а основана на результатах предварительных экспериментов и моделирования, позволивших оптимизировать соотношение прочности и гибкости армирующего слоя. Процесс нанесения матричного связующего, обеспечивающего сцепление армирующих нитей и формирование целостной структуры покрытия, был крайне важен и осуществлялся в строгой последовательности. Особое внимание уделялось технологии нанесения связующего, что было обусловлено специфическими свойствами как фторопластовых волокон, так и ариимидных нитей. Сначала связующее наносилось на фторопластовые волокна, что обеспечивало их равномерное распределение по всей поверхности и препятствовало образованию воздушных пустот, только после этого матричное связующее наносилось на прочные ариимидные нити. Критически важным аспектом технологического процесса являлась ори-

ентация образцов во время нанесения связующего. Фторопластовые волокна, отличающиеся низким коэффициентом трения и специфической структурой, должны были быть направлены строго вниз. Такая ориентация обеспечивала оптимальное распределение связующего по всему каркасу из арамидных нитей, предотвращая образование пустот, непропитанных участков и локальных скоплений связующего. Любое отклонение от этой строгой последовательности и ориентации могло привести к снижению прочности, однородности и, как следствие, к ухудшению эксплуатационных характеристик конечного антифрикционного полимерного покрытия. В итоге тщательный контроль каждого этапа, от подготовки армирующих нитей до точного нанесения связующего, являлся залогом получения высококачественного, долговечного и экономически эффективного покрытия. Неравномерное распределение связующего могло бы привести к образованию зон с различной прочностью, что недопустимо для обеспечения надежности покрытия. Одновременно с пропиткой тканного каркаса тонкий слой матричного связующего наносился на металлические образцы, после чего выдерживался 3-минутный интервал и выполнялась фиксация покрытия на субстрате. После склеивания образцы выдерживались при комнатной температуре в течение 72 часов (трое суток). Это время необходимо для полного завершения процесса полимеризации связующего вещества, что обеспечивает надежное скрепление армирующих волокон и придает материалу требуемые механические свойства. Только после полного отверждения связующего можно переходить к следующему этапу [6, 7].

Параллельно с подготовкой покрытия к нанесению проводилась тщательная обработка поверхности стальной подложки. Для обеспечения надежного сцепления покрытия с подложкой металлические и латунные образцы обрабатывались наждачной бумагой Ф14А-25НМ, что обеспечивало необходимую шероховатость поверхности и способствовало проникновению матричного связующего в риски на поверхности металлических образцов. После шлифовки образцы очищались нефрасом (ТУ 38.401-67-108-92) для удаления жировых отложений и других загрязнений. Завершающим этапом подготовки подложки была сушка и протирка ацетоном (ГОСТ 27-62) для удаления остатков растворителей. Для оценки морфологии поверхности был использован оптический профилометр NewView 600. Результаты отображены в виде модели поверхности, а также представлены графики зависимости высоты пиков и длины участка сканирования (рис. 1, а, б) [6].

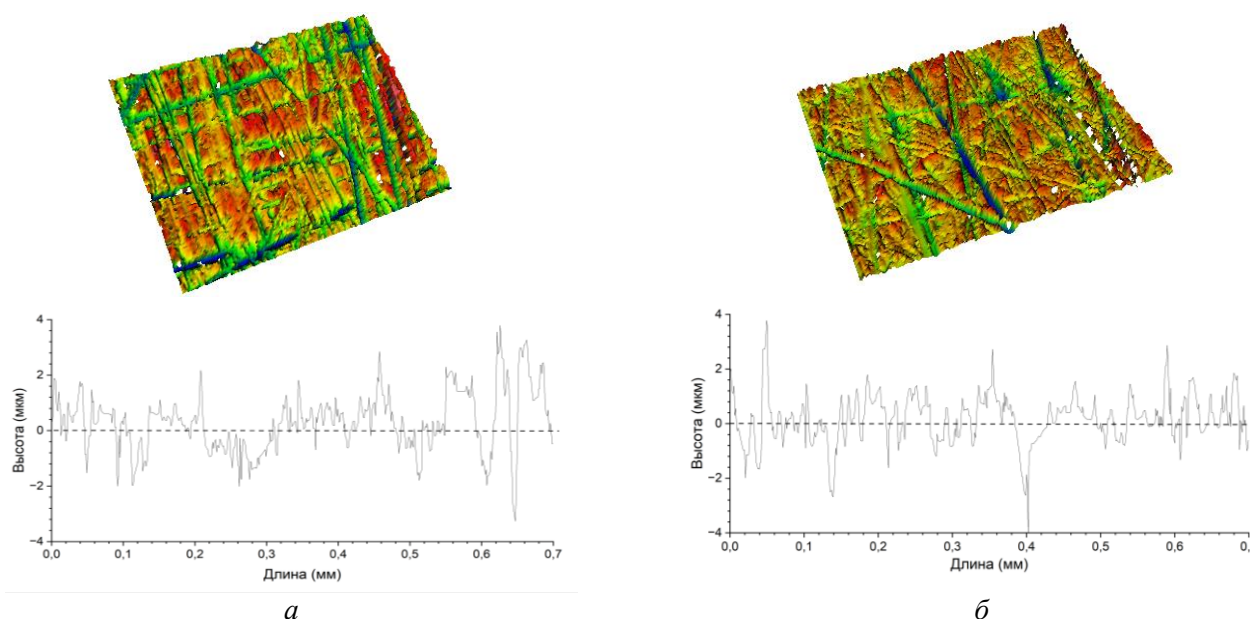


Рис. 1. Результаты исследования морфологии поверхности образцов для определения адгезионной прочности после подготовки:
а – сталь 45; б – латунь Л62

Полученная шероховатость поверхности обеспечивала максимальную площадь контакта между покрытием и металлом, что, в свою очередь, положительно влияло на прочность соединения. Высокая адгезия, достигнутая на этапе подготовки поверхности, является одним из ключевых факторов успеха всего эксперимента. Только после проведения всех этих операций можно было приступить к нанесению композиционного покрытия и последующему тестированию на отслаивание.

Для того чтобы покрытие не прилипало к рабочим инструментам, использовали специальную пленку из фторопласта. Для надежного закрепления разработанного антифрикционного композиционного покрытия на металлической поверхности применяли специальное устройство, которое показано на рис. 2.

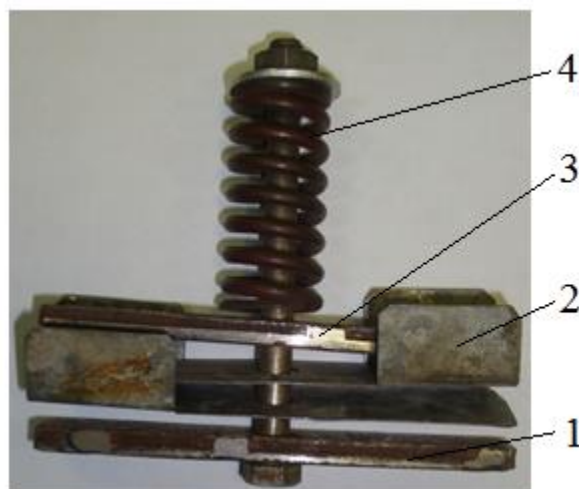


Рис. 2. Приспособление для фиксации покрытия на субстрате:

1 – нижняя планка; 2 – ограничители; 3 – верхняя планка; 4 – нагружающая пружина

Главная задача этого устройства – обеспечить равномерное распределение нагрузки по всей площади, где покрытие соприкасается с металлом. Одним из главных элементов конструкции является нагрузочная пружина, которая подвергалась тарировке перед проведением эксперимента. Верхняя и нижняя планки, между которыми помещался металлический образец с нанесенным покрытием, равномерно распределяли давление пружины по всей поверхности контакта. С помощью регулировочной гайки можно было изменять давление. Использование данного приспособления позволяет точно контролировать силу, с которой покрытие прижималось к металлу. Это обеспечивало равномерное высыхание и затвердевание покрытия, а также предотвращало появление внутренних напряжений. Внутренние напряжения – это скрытая угроза для прочности и долговечности соединения. Они могут привести к снижению адгезии и образованию микротрещин, что делает материал непригодным для эксплуатации. Поэтому контроль давления – критически важный момент в данном технологическом процессе. Окончательный контроль качества проводился путём измерения адгезионной прочности [6].

Схема испытательной установки хотя и проста на первый взгляд, требует предельной точности и аккуратности при проведении испытаний. Крайне важно обеспечить равномерный контакт между покрытием и подложкой до начала испытания. Любое несоответствие может привести к искажению результатов и неверной оценке адгезионной прочности полученного композитного материала. Таким образом, весь процесс создания композитного покрытия, от нанесения до конечного контроля качества, представляет собой совокупность взаимосвязанных технологических операций, где точность и соблюдение всех требований являются залогом получения качественного и надежного материала.

Особое внимание уделяется материалу, который скрепляет эти поверхности – матричному связующему. Оно состоит из трёх основных компонентов: каучука, медного порошка и дисульфида молибдена. Важно понимать, что невозможно изменять количество каждого компонента по отдельности, так как их общее содержание всегда должно составлять 100 %. Для того чтобы найти наилучшее сочетание этих компонентов и получить матричное связующее с оптимальными характеристиками, применяем симплекс-решётчатые планы типа «состав – свойство». Суть этих планов заключается в том, что каждой точке на специальной диаграмме соответствует определённый состав матричного связующего, то есть своя уникальная комбинация основы и модификаторов (рис. 3).

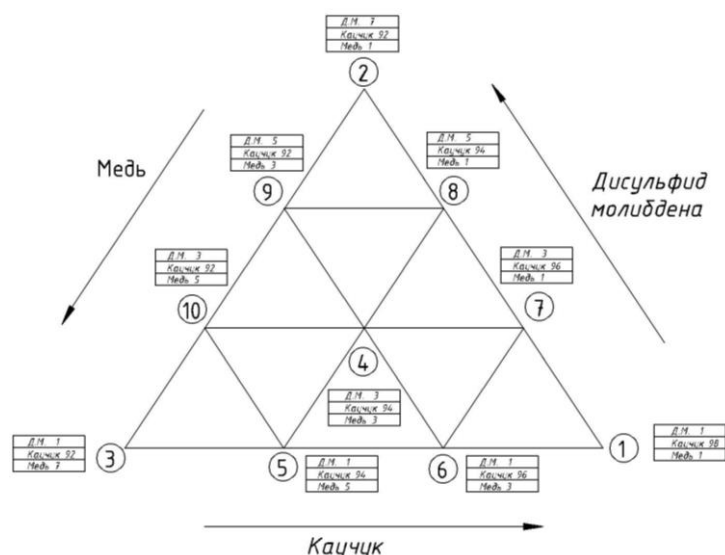


Рис. 3. Графическая интерпретация симплекс-решётчатого плана

Анализ того, как разрушается клеевое соединение (адгезионный шов) между металлическими пластинами и композиционным антифрикционным покрытием, позволяет визуально оценить качество этого соединения. Наблюдая за поверхностями металла и покрытия после разрушения (рис. 4), можно судить о прочности и надежности склеивания.

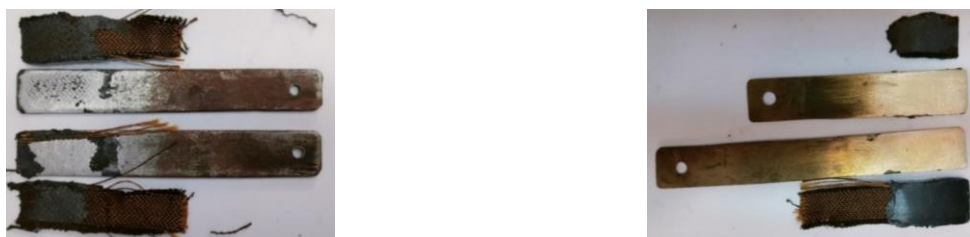


Рис. 4. Контактные поверхности после разрушения адгезионного шва

Результаты экспериментов по определению адгезионной прочности представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

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)	206	135,9	245,3	225,6	215,8	215,8	191,3	166,8	137,3	160
Адгезионная прочность, кН/м	21	11,3	20,4	18,8	18	18	15,9	13,9	11,4	13,3

Таблица 2

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)	137,3	49,05	147,2	127,5	107,9	127,5	78,5	58,9	49,1	68,7
Адгезионная прочность, кН/м	11,4	4,09	12,3	10,6	8,99	10,6	6,54	4,91	4,1	5,72

Выводы

На основании анализа полученных результатов после разрушения шва приходим к следующим выводам:

- на латунном образце разрушение происходит в основном по субстрату, так как практически всё матричное связующее осталось на покрытии;
- разрушение адгезионного шва на стальной пластине происходит как по субстрату, так и по покрытию, что говорит о высокой адгезии;
- как в случае со стальным субстратом, так и с латунным наблюдается повышение адгезии с уменьшением процентного соотношения дисульфида молибдена;
- адгезионная прочность шва на стальном субстрате значительно выше, чем на латунном;
- наибольшее значение адгезионной прочности на стальном субстрате соответствует составу в т. 3 (92 % каучука, 1 % дисульфида молибдена и 7 % порошка меди).

Список литературы

1 Инновационные технологии повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем путем формирования структуры и свойств их поверхностного слоя / В. И. Колесников, И. В. Колесников, Д. С. Мантуров, А. И. Воропаев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2024. – № 8 (158). – С. 3–11. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-11.

2 **Сидашов, А. В.** Исследование фторопластсодержащего наноструктурированного покрытия на поверхности стали / А. В. Сидашов, М. В. Бойко, А. Т. Козаков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 96–101. – ISSN 1818-5509.

3 **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.

4 Улучшение трибологических параметров смазочных материалов введением неорганической полимерной присадки / И. В. Колесников, М. А. Савенкова, А. П. Сычев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 64–66. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-1-64-67.

5 **Савенкова, М. А.** 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). – С. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

6 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 (96). – С. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

7 **Кохановский, В. А.** Адгезия антифрикционных полимерных покрытий / В. А. Кохановский, И. В. Боль-

References

1 Innovative technologies for increasing wear resistance of heavily loaded tribosystems by forming the structure and properties of their surface layer / V. I. Kolesnikov, I. V. Kolesnikov, D. S. Manturov, A. I. Voropaev // Science-intensive technologies in mechanical engineering. – 2024. – No. 8 (158). – P. 3–11. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-3-11.

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

3 **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.

4 Improvement of tribological parameters of lubricants by introducing an inorganic polymer additive / I. V. Kolesnikov, M. A. Savenkova, A. P. Sychev [et al.] // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2021. – No. 1. – P. 64–66. – DOI 10.36652/0042-4633-2021-1-64-67.

5 **Savenkova, M. A.** Effective polymer phosphomolybdate additive for lubricants / M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

6 Study of the adhesion strength of antifriction coatings based on phenylone / I. V. Bolshikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.

7 **Kohanovsky, V. A.** Adhesion of antifriction polymer coatings / V. A. Kohanovsky, I. V. Bolshikh,

ших, Д. С. Мантуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4 (68). – С. 16–20. – ISSN 0201-727X.

D. S. Manturov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2017. – No. 4 (68). – P. 16–20. – ISSN 0201-727X.

I. V. Bolshikh, E. P. Bolshikh, E. D. Anikina, Ya. K. Sklifus

ADHESIVE STRENGTH OF ANTI-FRICTION POLYMER COATINGS WITH A COLD-CURED MATRIX

Abstract. The creation of economical and durable coatings based on fluorine-containing compounds is one of the most important tasks in modern science. However, the high cost of fluoroplastic, which is a key component, has led to a constant search for ways to reduce the cost of producing these coatings without compromising their performance. The key idea is to create a multi-layer coating where each layer has a specific function. The matrix binder is a three-component system consisting of rubber, powdered copper, and molybdenum disulfide. The adhesion strength of the composite coating applied to a steel substrate was studied by peeling the samples at an angle of 180 degrees.

Keywords: composite, reinforcing base, matrix binder, adhesive strength, rubber, contact surfaces, copper powder, molybdenum disulfide, optimal composition.

For citation: Adhesive strength of anti-friction polymer coatings with a cold-cured matrix / I. V. Bolshikh, E. P. Bolshikh, E. D. Anikina, Ya. K. Sklifus // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 190–196. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_190.

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

Больших Елизавета Павловна

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

Аникина Елена Дмитриевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Теоретическая механика», аспирант, e-mail: al.anikina2002@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 Engineering Sciences, Associate Professor, e-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Bolshikh Elizaveta Pavlovna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair “Theoretical Mechanics”, Junior Research Assistant, e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru

Anikina Elena Dmitrievna

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

Sklifus Yaroslav Konstantinovich

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