

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_64

*П. Г. Иваночкин, М. М. Четверик, Е. П. Больших***ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ПТФЭ ***

Аннотация. Исследованы механические характеристики антифрикционного полимерного композиционного покрытия на основе ткани с волокном ПТФЭ. Ткань из полимерных волокон пропитывается и приклеивается к субстрату (подложке) термостойким матричным связующим холодного отверждения на основе фенилона с введенными в матричную основу модификаторами (мелкодисперсный порошок меди и масло). Механические свойства покрытий были получены в рамках микроиндейтирования с помощью системы анализа *NanoTest 600* фирмы «*Micro materials Ltd*». Определялись механические характеристики экспериментальных образцов: микротвёрдость, модуль упругости, а также их вязкоупругие свойства. Показано, что использование метода инструментального индейтирования может быть успешно применено для оценки механических характеристик рассматриваемого типа покрытий. Предложена методика получения кривой ползучести для оценки вязкоупругих характеристик покрытия методом непрерывного индейтирования. Определен оптимальный состав модификаторов, обеспечивающих наиболее высокие твердость и модуль упругости композита.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, ткань с волокном ПТФЭ, связующее холодного отверждения, модификаторы, механические характеристики, микротвёрдость, модуль упругости, вязкоупругие свойства.

Для цитирования: Иваночкин, П. Г. Исследование механических характеристик антифрикционного полимерного композиционного покрытия, содержащего ПТФЭ / П. Г. Иваночкин, М. М. Четверик, Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025 – № 2. – С. 64–73. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_64.

Введение

В работах [1–3] была рассмотрена возможность применения нового матричного связующего для антифрикционного полимерного композиционного покрытия, способного работать в тяжелонагруженных узлах трения. В настоящей работе в качестве объекта исследования выступали антифрикционные покрытия на различных типах подложек. Отметим, что получаемые антифрикционные самосмазывающиеся покрытия являются гибридными композитами, в состав которых имеются антифрикционные нити из политетрафторэтилена (ПТФЭ), прочные полиимида нити, которые являются основой тканого материала. Такой материал пропитывается матричным связующим и приклеивается к субстрату (подложке) [4]. Использование такого типа антифрикционных покрытий позволяет обеспечить эффективную работу узлов трения и способствует повышению эксплуатационного ресурса и минимальных потерь на трение. Отметим, что наиболее востребованным методом создания полимерных композиционных материалов, обладающих улучшенными характеристиками, является модификация полимерной матрицы различными видами наполнителей и добавок. Применение же наноразмерных частиц способствует формированию новых соединений в поверхностном слое, отличающихся повышенной износостойкостью, что особенно важно для экстремально высоких нагрузок.

С целью улучшить триботехнические свойства рассматриваемых покрытий в матричную основу вводились модификаторы (мелкодисперсный порошок меди и масло). Варирование компонентов матричного связующего находилось в интервалах, представленных в матрице симплекс-решётчатого плана работы [1], а образцы именовались по первым буквам материала подложки (St – сталь, Lt – латунь), далее следовали значения объемных долей матричного связующего и модификаторов – масло, мелкодисперсный порошок меди.

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

Одними из важнейших характеристик материалов, определяющих их эксплуатационную долговечность и являющихся косвенными показателями их качества, являются их механические свойства. Обобщенной характеристикой механических свойств материалов является твердость. Твердость материала характеризует свойство поверхностного слоя материала сопротивляться внедрению другого, более твердого тела (индентора), при его сосредоточенном воздействии на поверхность материала [5]. Целью настоящей работы являлось определение механических характеристик экспериментальных образцов: микротвёрдость, модуль упругости, упругое восстановление, коэффициенты сопротивления упругой и пластической деформации, а также определение их вязкоупругих свойств.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовались образцы в виде пластинок размером $10 \times 10 \times 3$ мм, представляющие собой металлическое основание (подложку) с нанесенным на одну из сторон покрытием толщиной 1 мм. Использовались стальные (СТ45 – ГОСТ 1050-74) и латунные (Л63 – ГОСТ 15527-70) полоски толщиной 2 мм. Подбор материалов субстрата (подложек) выполнялся из условия их универсальности в области машиностроения и возможности оценки эффективного использования разработанного покрытия на различных металлических подложках [6]. Экспериментальное изучение механических характеристик покрытий на микроуровне проводилось с помощью системы анализа механических свойств материалов *NanoTest 600* фирмы «*Micro materials Ltd*» при максимальной нагрузке $P = 0,5 \div 20$ Н с помощью метода инструментального (непрерывного) индентирования [7]. Непрерывное индентирование представляет собой процесс внедрения индентора в исследуемый материал с непрерывной записью данных изменения нагрузки и глубины проникновения. В случае исследования полимерных покрытий применяются инденторы сферической формы. Измерения проводились сферическим индентором Al_2O_3 диаметром $D_{ind} = 6,35$ мм. При проведении эксперимента осуществляется контроль глубины проникновения индентора, она должна составлять не более 10–12 % от толщины покрытия. Такое ограничение необходимо, чтобы исключить возможность искажения характеристики покрытия вследствие влияния деформации подложки. Обработка полученных данных осуществляется автоматически, после чего строится график зависимости глубины проникновения индентора от приложенной нагрузки. По полученным экспериментальным данным с помощью сферического анализа кривых, а также метода Оливера – Фарра [8–9] рассчитываются физико-механические характеристики покрытия: микротвердость, приведенный модуль, упругое восстановление, коэффициенты сопротивления упругой и пластической деформации.

Тестовые измерения механических характеристик образца показали, что использование наномаятника не удовлетворяет условиям эксперимента, поскольку необходимо приложение большей нагрузки к индентору для продавливания образца, что влечет за собой увеличение глубины индентирования. В этой связи принято решение о проведении измерений на микромаятнике, что в свою очередь потребовало внесения конструктивных изменений в оборудование, а именно, изготовление переходника для закрепления индентора. На рис. 1 приведен чертеж разработанного переходника.

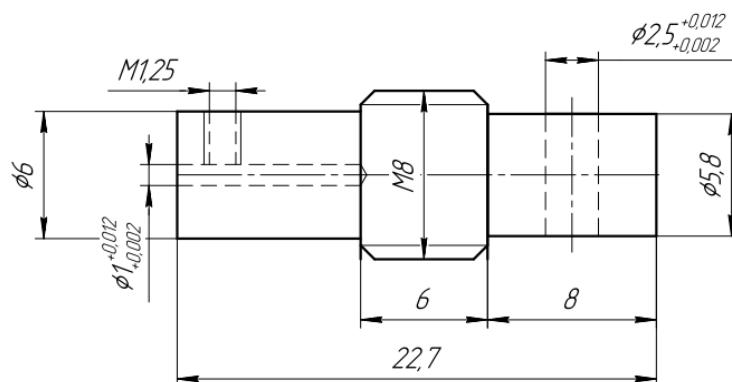


Рис. 1. Чертеж переходника для закрепления индентора на микромаятнике

Установка переходника повлекла за собой изменение конфигурации оборудования, что потребовало полной перенастройки и калибровки прибора. После проведения всех необходимых настроек были сделаны тестовые испытания на калибровочном образце из кварца для подтверждения корректности работы оборудования. Были получены искомые значения механических характеристик кварца в рамках допустимых погрешностей, что свидетельствует о надлежащей работе оборудования.

На следующем этапе проведен ряд тестовых испытаний с образцом St.86.7.7 в диапазоне нагрузок от 1 до 5 Н с целью исследования поведения материала, определения оптимальной величины усилия и контроля глубины вдавливания индентора. На рис. 2 приведен график кривых индентирования при различной приложенной нагрузке.

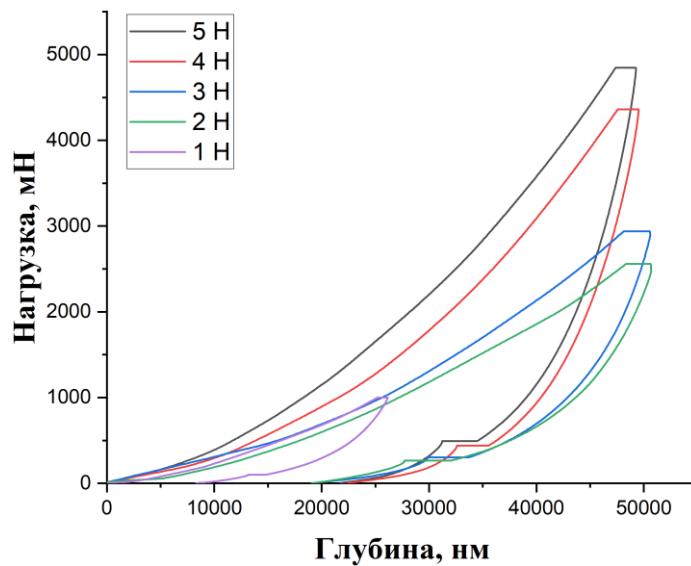


Рис. 2. Кривые индентирования для образца St.86.7.7 в диапазоне нагрузок от 1 до 5 Н

Полученные результаты позволили определить оптимальный диапазон усилий для проведения испытаний, а именно, от 1 до 2 Н. Затем для образца St.86.7.7 проделан ряд измерений при нагрузке 1 Н и различной скорости нагружения. Такой эксперимент позволяет определить порог скорости нагружения, при котором результаты незначительно отличаются друг от друга, а на рис. 3 приведены кривые таких испытаний. На основе полученных данных выбрана скорость нагружения для проведения измерений, ее величина равна 50 мН/с.

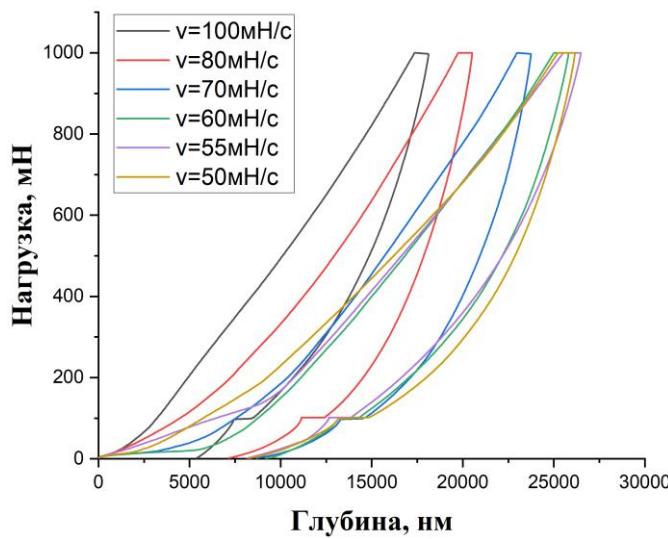


Рис. 3. Кривые индентирования для образца St.86.7.7 при нагрузке 1 Н и различных скоростях нагружения

Определение механических характеристик, исследуемых образцов заключается в проведении цикла «нагрузка – разгрузка» в 10 различных случайных точках поверхности образца. С учетом результатов тестовых испытаний максимальное усилие, прикладываемое к индентору, выбиралось равным 1 Н, скорость нарастания и убывания нагрузки – 0.05 Н/с. В процессе испытаний накладывается ограничение на максимальную глубину проникновения индентора, она не должна превышать 10 % от толщины исследуемого покрытия.

С определенными величиной нагрузки и скоростью нагружения проведены предварительные испытания образцов St.92.7.1, L.86.7.7 и L.92.7.1. Полученные кривые индентирования приведены на рис. 4.

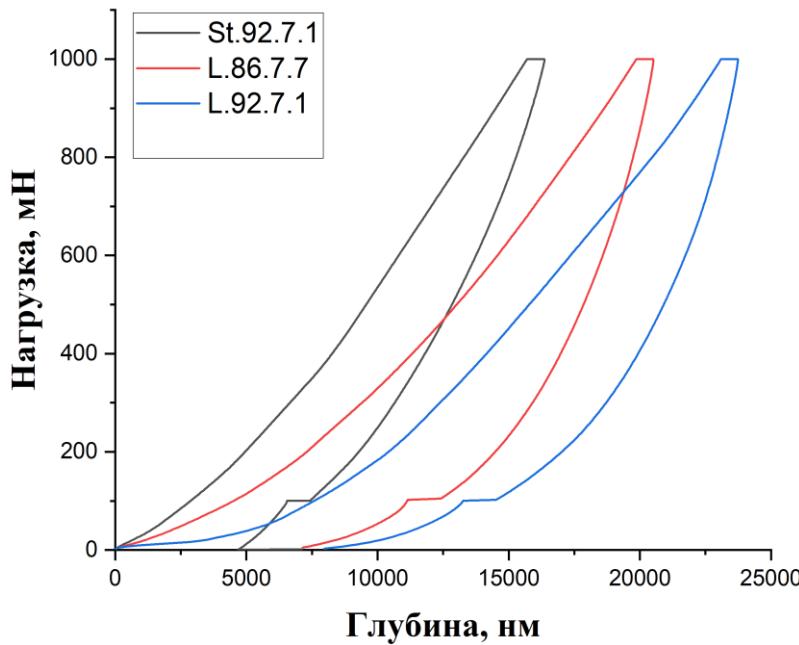


Рис. 4. Кривые индентирования для образцов St.92.7.1, L.86.7.7 и L.92.7.1 при нагрузке 1 Н и скорости нагружения 50 мН/с

Определение вязкоупругих свойств экспериментальных образцов также проводилось с помощью метода непрерывного индентирования. Однако режим индентирования в этих исследованиях включал дополнительную выдержку индентора при постоянном значении нагрузки $P_{\max} = 1\text{Н}$. Время, при котором нагрузка не изменялась и составляла $P_{\max} = 1\text{Н}$, обозначалось $t_{hold}\text{(с)}$, в рамках эксперимента были приняты значения $t_{hold} = [0; 10; 30; 90; 180]$. Нагружение и разгрузка осуществлялись за одно и то же время $t_1\text{(с)}$. Лабораторный эксперимент по определению вязкоупругих свойств композита состоял из совокупности 5 серий испытаний.

Полученные результаты подвергались статистической обработке, строилась зависимость глубины погружения от величины действующей нагрузки и определялась зависимость глубины погружения за период времени, равный времени выдержки.

Полученные данные, а именно, диаграммы индентирования $P = P(h)$, $h_{\text{creep}} = h(t)$ являлись входными данными в теоретической модели стандартного вязкоупругого тела. Восстановление вязкоупругих характеристик покрытия производилось в рамках трехзвенной модели стандартного вязкоупругого тела [10].

$$G(t) = G_\infty + G_0 \cdot e^{-t/\tau_\sigma},$$

где $G(t)$ – функция релаксации, G_0 , G_∞ – мгновенный и длительный модуль соответственно, τ_σ – время релаксации.

Надо отметить, что решение прямой задачи о внедрении штампа в вязкоупругое основание было получено для изотропного приближения [10] неоднородного материала, учет гетерогенности материала покрытия можно осуществить в рамках модели Био [11, 12]. Построение решения обратной задачи было основано на соответствующем решении прямой задачи для изотропной однородной среды [10], в результате чего восстанавливались вязкоупругие характеристики покрытия. С этой целью использовался нелинейный метод наименьших квадратов, реализованный в *Matlab* при использовании комбинации генетического алгоритма и метода Нелдера – Мида [10].

Диаграммы индентирования, иллюстрирующие однородность получаемого материала покрытия образца St.92.7.1, приведены на рис. 5, а восстановленные вязкоупругие характеристики и полученные по их результатам ползучести представлены на рис. 6. Скорость нагружения и разгрузки принималась равной 50 мН/с, время выдержки индентора при постоянной нагрузке

$P = P_{max}$ составляло 5 с, безразмерная величина $h^* = h \cdot 10^3$.

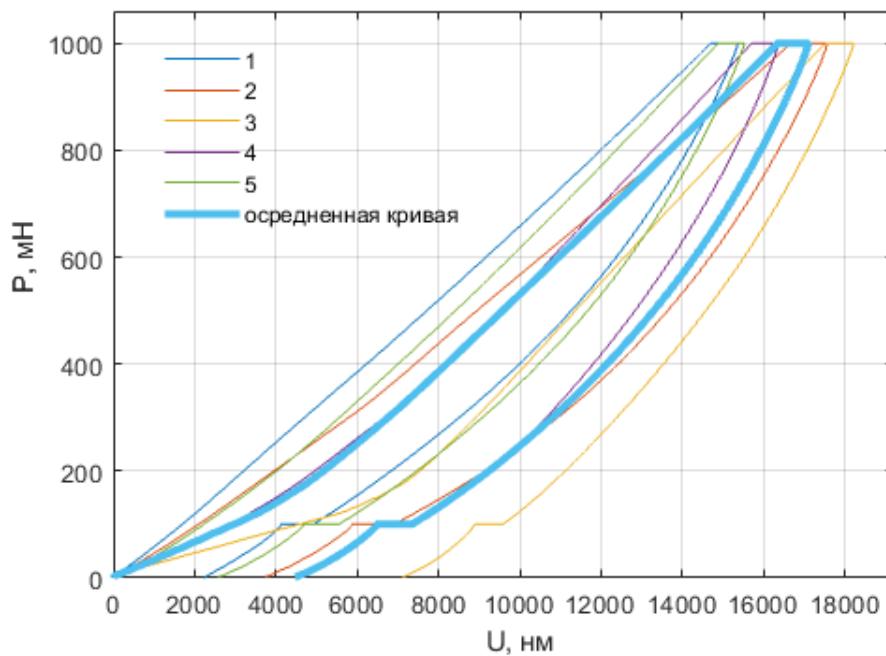


Рис. 5. Графики зависимости глубины проникновения индентора от нагрузки для образца St.92.7.1 в течение времени его выдержки при постоянной максимальной нагрузке

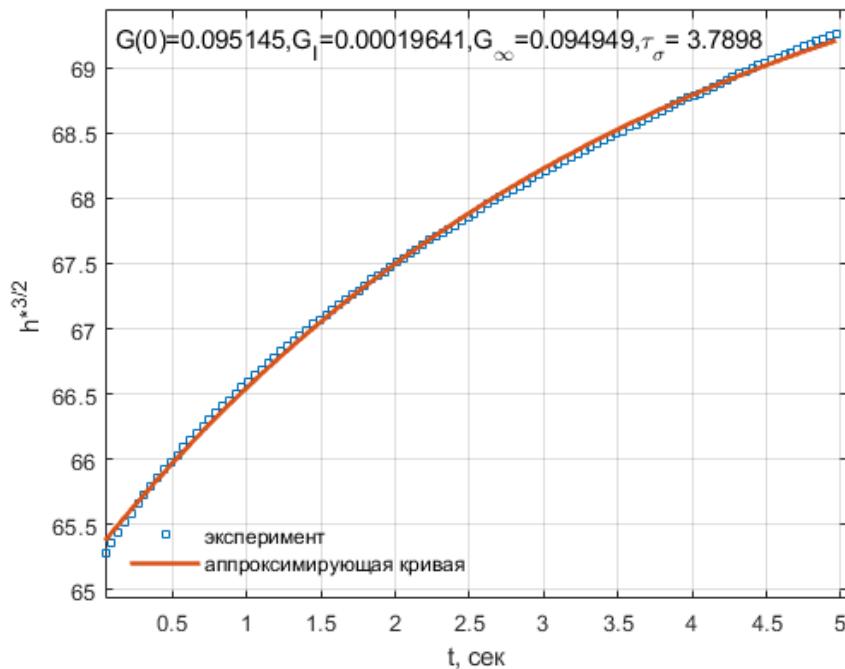


Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая кривые ползучести для образца St.92.7.1

Результаты и их обсуждение

Состав матричного связующего является трехкомпонентной системой, части которой не изменяются независимо друг от друга, составляя 100 %. Основой разработки оптимального соотношения компонент системы является использование симплекс-решётчатых планов типа «состав – свойство» (см. рис. 7).

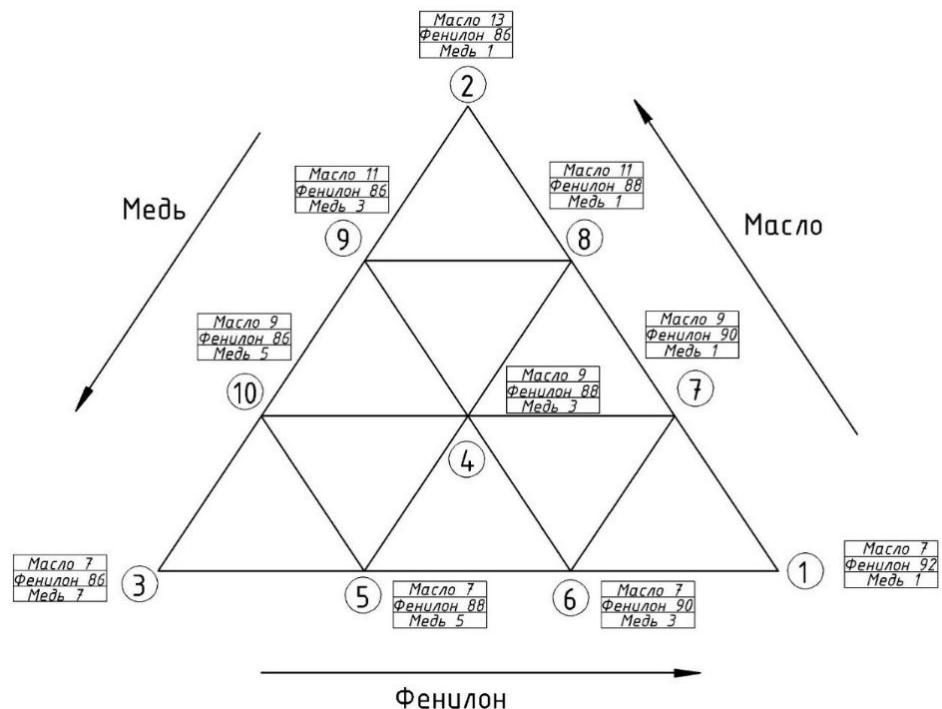


Рис. 7. Графическая интерпретация симплекс-решётчатого плана

Определение механических характеристик разработанного антифрикционного композиционного покрытия с различным составом матричного связующего выполнялось по результатам индентирования образцов, изготовленных в соответствии с матрицей плана. На рис. 8 и 9 показаны симплекс-диаграммы исследования твёрдости и модуля упругости покрытия на стальном субстрате.

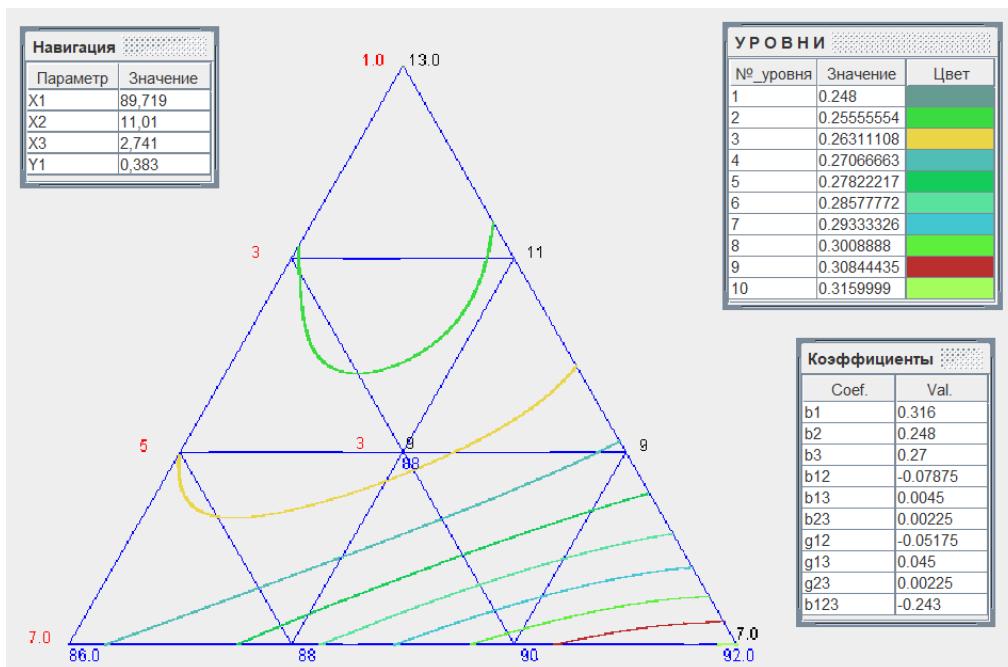


Рис. 8. Исследование твёрдости покрытия на стальном субстрате

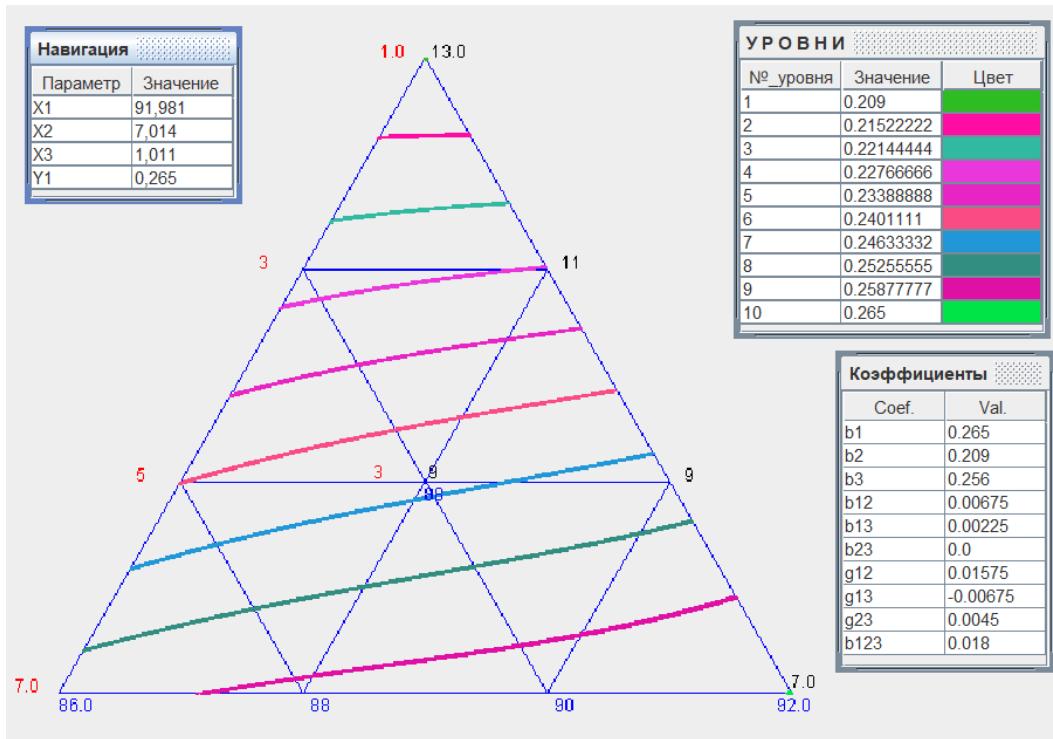


Рис. 9. Исследование модуля упругости покрытия на стальном субстрате

Анализ симплекс-диаграмм свидетельствует, что механические характеристики композиционного покрытия на стальном субстрате имеют тенденцию на увеличение показателей жёсткости и упругости в направлении точки 1 плана (92 % фенилона, 7 % масла и 1 % меди). Аналогичный результат получен и для латунной подложки (рис. 10 и 11).

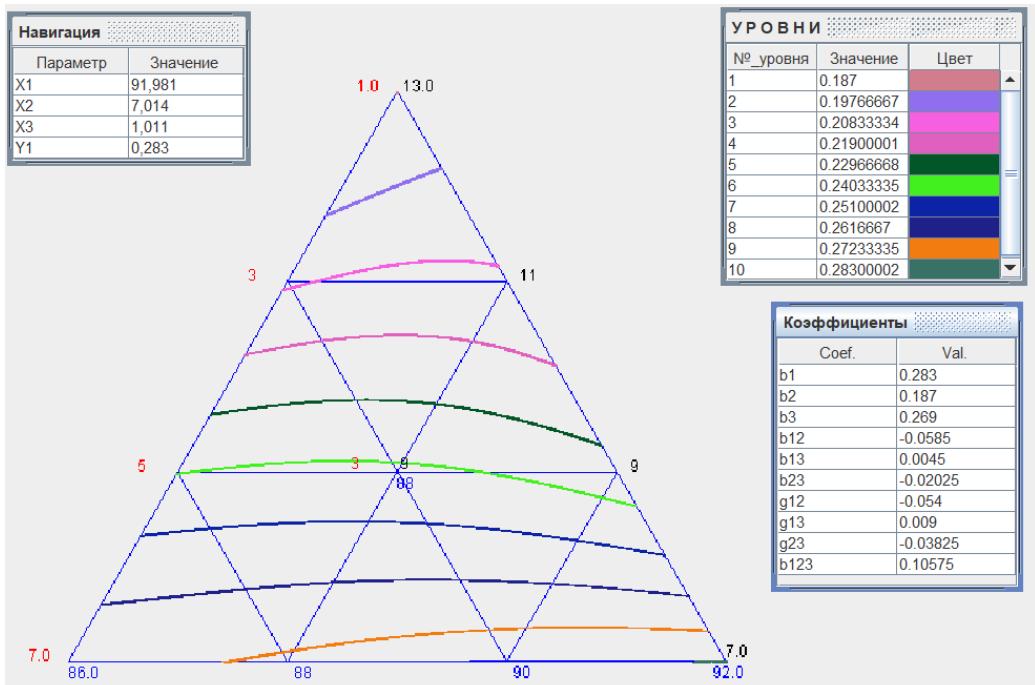


Рис. 10. Исследование твёрдости покрытия на латунном субстрате

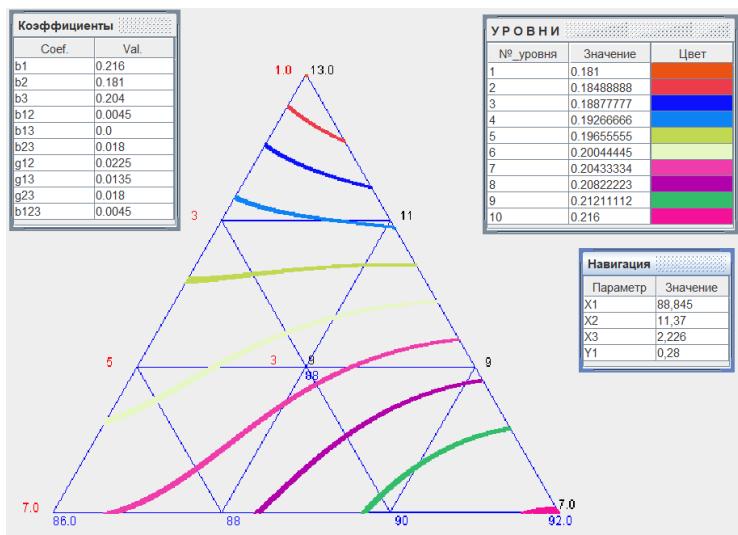


Рис. 11. Исследование модуля упругости покрытия на латунном субстрате

В таблице представлены восстановленные на основании экспериментальных данных параметры модели вязкоупругого поведения покрытий, отобранных на основании симплекс-решётчатых планов типа «состав – свойство».

Параметры модели вязкоупругого поведения отобранных покрытий

Образец	G_0 , МПа	G_∞ , МПа	τ , с
L.92.7.1	57,965	57,845	3,88
St.92.7.1	95,145	94,949	3,79

Выходы

Показано, что использование метода инструментального индентирования может быть успешно применено для оценки механических характеристик рассматриваемого типа покрытий.

Обосновано использование микромаятника системы анализа механических свойств материалов *NanoTest 600* фирмы «*Micro materials Ltd*» для определения твердости и модуля упругости антифрикционного полимерного композиционного покрытия, содержащего ПТФЭ. Изготовлен переходник для закрепления индентора на микромаятнике. Проведены тестовые испытания на калибровочном образце из кварца. Определен оптимальный диапазон усилий для проведения испытаний, выбрана скорость нагружения.

Для определения вязкоупругих характеристик покрытия методом непрерывного индентирования предложена методика получения кривой ползучести. Вязкоупругие свойства исследуемого материала описываются трехзвенной моделью стандартного вязкоупругого тела

Определен оптимальный состав модификаторов (мелкодисперсного порошка меди и масла) обеспечивающих наиболее высокие твердость и модуль упругости композита.

Сделан вывод о влиянии подложки на механические характеристики покрытия. Показано, что использование в качестве субстрата стали обеспечивает более высокие механические характеристики покрытия.

Список литературы

1 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.

2 Иваночкин, П. Г. Анализ состояния поверхности металлического контртела при взаимодействии с антифрикционным покрытием, содержащим ПТФЭ / П. Г. Иваночкин, Е. Д. Аникина,

References

1 Manturov, D. S. Matrix binder for antifriction polymer composite coating / D. S. Manturov, I. V. Bolshikh, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 3 (95). – P. 36–42. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_3_36.

2 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

- Е. П. Больших // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.
- 3 Исследование адгезионной прочности антифрикционных покрытий на основе фенилона / И. В. Больших, А. М. Ананко, Я. К. Склифус [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.
- 4 **Кохановский, В. А.** Металлополимерные трибосистемы с фторопластсодержащими покрытиями : монография / В. А. Кохановский ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2024. – 223 с. – ISBN 978-5-907815-01-8.
- 5 ГОСТ Р 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002) ГСИ.** Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 24 с.
- 6 **Кохановский, В. А.** Износстойкость металлополимерных систем с композиционным покрытием / В. А. Кохановский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 13–19. – ISSN 1819-2092.
- 7 Методические и метрологические аспекты измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования / А. И. Потапов, К. В. Гоголинский, В. А. Сясько [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 8. – С. 16–21. – DOI 10.14489/td.2016.08.pp.016-021.
- 8 **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583.
- 9 **Головин, Ю. И.** Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (обзор) / Ю. И. Головин // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 12. – С. 2113–2142. – ISSN 0367-3294.
- 10 Исследование вязкоупругих свойств композиционных материалов на основе метода индентирования / В. И. Колесников, О. А. Беляк, Т. В. Суворова [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.
- 11 **Суворова, Т. В.** Математическое моделирование деформации основания железнодорожного пути при встречном движении поездов / Т. В. Суворова, О. А. Беляк, С. А. Усошин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.
- Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – № 4 (96). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_8.
- 3 Investigation of the adhesive strength of anti-friction phenylene-based coatings / I. V. Bol'shikh, A. M. Ananko, Ya. K. Sklifus, E. D. Anikina [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 20–27. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_20.
- 4 **Kokhanovsky, V. A.** Metal-polymer tribosystems with fluoroplastic-containing coatings : monograph / V. A. Kokhanovsky ; Rostov State Transport University. – Rostov-on-Don : RSTU, 2024. – 223 p.
- 5 GOST R 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002) GSI.** Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials by instrumental indentation. Part 1. Test method. – Moscow : Standartinform, 2013. – 24 p.
- 6 **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.
- 7 Methodological and metrological aspects of measuring mechanical properties of materials by instrumental indentation / A. I. Potapov, K. V. Gogolinsky, V. A. Syasko [et al.] // Kontrol'. Diagnostika. – 2016. – No. 8. – P. 16–21. – DOI 10.14489/td.2016.08.pp.016-021.
- 8 **Oliver, W. C.** An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583.
- 9 **Golovin, Yu. I.** Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films (review) / Yu. I. Golovin // Physics of the Solid State. – 2008. – Vol. 50, No. 12. – P. 2113–2142. – ISSN 0367-3294.
- 10 Study of viscoelastic properties of composite materials on the basis of indentation method / V. I. Kolesnikov, O. A. Belyak, T. V. Suvorova [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2023. – No. 4 (92). – P. 25–33. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_25.
- 11 **Suvorova, T. V.** Mathematical modeling of deformation of the railway track base during oncoming train traffic / T. V. Suvorova, O. A. Belyak, S. A. Usoshin / Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. –

сообщения. – 2011. – № 4. – С. 155–161. – ISSN 0201-727X.

12 Беляк, О. А. Влияние микроструктуры основания на силы трения при движении плоского штампа / О. А. Беляк, Т. В. Суворова // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2018. – № 3. – С. 25–31. – DOI 10.31429/vestnik-15-3-25-31.

2011. – No. 4. – P. 155–161. – ISSN 0201-727X.

12 Belyak, O. A. Influence of the foundation microstructure on frictional force during the motion of a flat punch / O. A. Belyak, T. V. Suvorova / Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation – 2018. – No. 3. – P. 25–31. – DOI 10.31429/vestnik-15-3-25-31.

P. G. Ivanochkin, M. M. Chetverik, E. P. Bolshikh

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN ANTIFRICTION POLYMER COMPOSITE COATING CONTAINING PTFE

Abstract. The mechanical characteristics of an antifriction polymer composite coating based on fabric with PTFE fiber are studied. The fabric of polymer fibers is impregnated and glued to the substrate (base) with a heat-resistant matrix binder of cold curing based on phenylone with modifiers introduced into the matrix (fine copper powder and oil). The mechanical properties of the coatings were obtained by microindentation using the NanoTest 600 analysis system from Micro materials Ltd. The mechanical characteristics of the experimental samples were determined: microhardness, elastic modulus, as well as their viscoelastic properties. It is shown that the use of the instrumental indentation method can be successfully applied to assess the mechanical characteristics of the considered type of coatings. A technique for obtaining a creep curve for assessing the viscoelastic characteristics of the coating using the continuous indentation method is proposed. The optimal composition of modifiers providing the highest hardness and elastic modulus of the composite is determined.

Keywords: antifriction coating, fabric with PTFE fiber, cold-curing binder, modifiers, mechanical characteristics, microhardness, elastic modulus, viscoelastic properties.

For citation: Ivanochkin, P. G. Investigation of the mechanical characteristics of an antifriction polymer composite coating containing PTFE / P. G. Ivanochkin, M. M. Chetverik, E. P. Bolshikh // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 64–73. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_64.

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

Четверик Максим Максимович
Ростовский государственный
университет путей сообщения (РГУПС),
студент,
e-mail: chetverikm@mail.ru

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

Information about the authors

Ivanochkin Pavel Grigoryevich
Rostov State Transport University
(RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Doctor of Engineering Sciences,
Professor,
e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Chetverik Maksim Maksimovich
Rostov State Transport University
(RSTU),
Student,
e-mail: chetverikm@mail.ru

Bolshikh Elizaveta Pavlovna
Rostov State Transport University
(RSTU),
Chair “Theoretical Mechanics”,
Postgraduate Student,
e-mail: elizaveta.mz@yandex.ru