

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ТЯГА ПОЕЗДОВ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ

УДК 691.175.5/.8 + 06

А. И. Азоян, П. Г. Иваночкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ ЕГО МОДИФИКАЦИИ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА¹

Аннотация. Изучено влияние наполнителей на физико-механические и трибологические свойства полимерного материала. Экспериментальные данные были получены методами инструментального индентирования и трибологического анализа. Показано, что введение наполнителей в полимерную матрицу позволяет существенно повысить прочностные характеристики и, как следствие, – износостойкость. Совершенствование технологии создания композиционных материалов открывает новые горизонты для их применения в тяговом подвижном составе железнодорожного транспортного комплекса.

Ключевые слова: модификация, восстановление поверхностей узлов трения, композит, твердость, индентирование, планирование эксперимента.

Для цитирования: Азоян, А. И. Исследование эксплуатационных свойств полимерного материала после его модификации в узлах трения подвижного состава / А. И. Азоян, П. Г. Иваночкин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 70 – 77.

Введение

В последние годы стоимость ремонта и технического обслуживания тягового подвижного состава может составлять до 25 % от его стоимости. Причиной значительного снижения ресурса эксплуатации техники является интенсивный износ деталей машин, который может достигать до 85 %. Умение применять знания физико-механических и трибологических свойств различных материалов позволяет сократить расходы на ремонт и реставрацию поверхностей трения.

Все шире в ремонтном производстве применяются технологии восстановления поверхностей узлов трения подвижного состава при использовании полимерных композиционных материалов, благодаря их способности работать в широком диапазоне механических и тепловых воздействий.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований определили наиболее перспективным направлением в области формирования композита принцип модифицирования полимеров [1-2]. Полученные материалы позволяют решить ряд проблем, связанных с физико-химическими и механическими свойствами, которые не могут быть решены при использовании моноармированных композитов:

- повышение чувствительности материала к концентраторам напряжений;
- снижение ударной вязкости с увеличением модуля упругости;
- высокая поверхностная активность;
- возможность варьирования количественного содержания наполнителей в полимерной основе.

Примером композита, способного восстанавливать направляющие металлорежущего станка, является полимерный материал Moglice немецкой компании Diamant [3]. Данный материал прошел трибологические испытания в условиях сухого трения при возвратно-поступательном движении и показал положительные результаты.

Однако в настоящее время в условиях необходимости импортозамещения появилась потребность в исследовании нового композиционного материала, предназначенного для ремонтного производства.

Материалы и методы исследования

В ходе выполнения исследований [4-6] было определено, что в качестве полимерной матрицы следует использовать эпоксидно-диановую смолу марки ЭД-20, а в качестве отверждающего компонента – технический полиэтиленполиамин (ПЭПА). Для улучшения характеристик использовались армирующие (мелкодисперсной шпинели металлов $(\text{Mn/Mg})\text{Fe}_2\text{O}_4$) и антифрикционные (порошок политетрафторэтилена марки Ф4МБ) наполнители.

Для формирования композитов наполнители подвергались диспергированию с последующей седиментацией для определения размеров измельченных частиц. Для равномерного распределения добавок в полимерной матрице и процесса полимеризации композита использовалось специальное лабораторное оборудование: планетарная мономельница PULVERISETTE 6, дисковая центрифуга CPS Model DC24000, лабораторная магнитная мешалка с подогревом ES-6120 и ультразвуковая ванна ПБС-5735-05. Для проведения процессов вакуумирования и отверждения после добавления отвердителя и последующего перемешивания, полученный композиционный материал помещали в пресс-форму. Данный процесс проводился в суховоздушном шкафу в течение 12 часов при автоматической циркуляции горячего воздуха ($\sim 95^\circ\text{C}$).

Для оценки физико-механических свойств было осуществлено исследование твердости и модуля Юнга с использованием метода инструментального индентирования. Для этого проводились испытания на твердомере TBP-D Восток-7 с применением индентора типа D (ГОСТ 24621-91) [7].

Для сравнительных трибологических испытаний на трибометре TRB (Anton Paar) с применением методики DIN 50324 по схеме «шар – диск» использовались образцы в форме дисков диаметром 40 мм и высотой 5-7 мм. Вдавливание стального шара диаметром 6 мм (ШХ15) сопровождалось с усилием на штифте 0,5 и 1 Н по нормали к поверхности диска при вращении с линейной скоростью 0,1 м/с. Выбранные режимы испытаний соответствуют следующим значениям удельных нагрузок: 0,5 Н – 58,8 ... 70,5 МПа, 1 Н – 74,1 ... 88,8 МПа. Продолжительность испытания составляла 250 м, по окончании которого фиксировалось достижение пройденного пути или предельного коэффициента трения.

Определение концентрации армирующих компонентов

Для определения концентрации армирующих наполнителей, были проведены трибологические и физико-механические исследования. Процентное соотношение массы мелкодисперсной шпинели металлов к полимерной основе варьировалось в пределах: 0, 3, 6, 9, 12 и 15 %. Основные данные физико-механических характеристик композита при разной концентрации приведены в таблице 1.

Из анализа полученных результатов установлено, что при концентрации наполнителя свыше 6 % среднее значение твердости снижается, а среднее квадратическое отклонение и дисперсия повышаются при увеличении массовой доли шпинели металлов, что говорит о неоднородности структуры полученного композиционного материала.

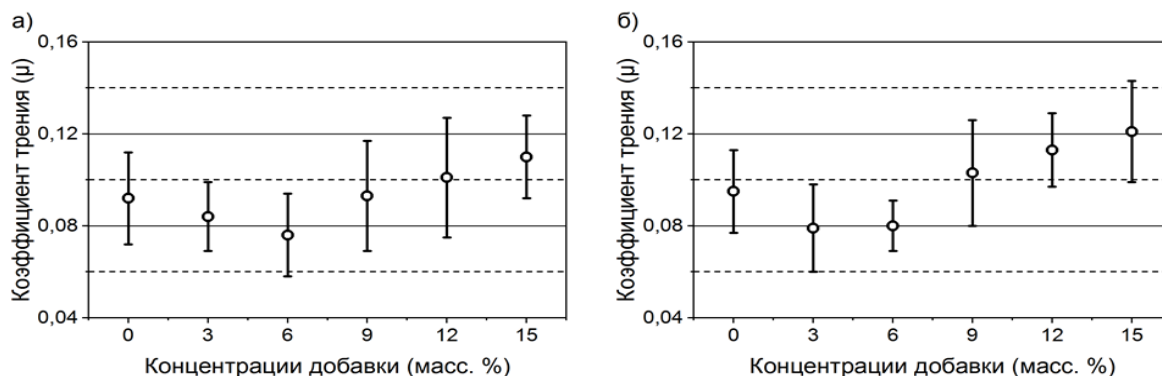
Трибологические испытания показали, что при добавлении наполнителя свыше 6 % наблюдалось повышение коэффициента трения. Было установлено, что при нагрузке 5 Н введение мелкодисперсной шпинели металлов в полимерную основу в концентрации 3 % и

6 %, коэффициент трения снижается до значений 0,076 и 0,084 соответственно. При увеличении нагрузки наименьшее значение коэффициента трения и среднеквадратического отклонения имеет композит с массовой долей наполнителя в 6 % (рисунок 1).

Таблица 1

**Обобщенные данные физико-механических характеристик
образцов композиционного материала**

Образец	Концентрация, %	Среднее значение твердости, HSD	Дисперсия	Среднеквадратическое отклонение
1	0	74,5	0,58	0,76
2	3	82	1,17	1,08
3	6	79,2	1,59	1,26
4	9	72,3	3,04	1,74
5	12	66	4	2
6	15	58,5	9	3



**Рис. 1 Влияние концентрации добавки шпинели на коэффициент трения при различной нагрузке
а) – нагрузка 5 Н, б) – нагрузка 10 Н.**

Анализ трибологических и физико-механических свойств композита, в полимерную матрицу которого входят армирующие компоненты, показал, что для улучшения эксплуатационных свойств материала при различной нагрузке следует применять концентрацию шпинели металлов 6 %.

Определение концентрации антифрикционных компонентов

Для оценки влияния концентрации антифрикционных добавок и нагрузочных режимов на процессы трения был использован статистический метод планирования эксперимента [8-9] с применением ортогонального плана второго порядка.

В качестве исследуемой функции отклика выбран: коэффициент трения образцов, а в качестве варьируемых факторов – концентрация шпинели K_{III} (X_1), концентрация фторопласта K_F (X_2), усилие на инденторе P (X_3), (таблица 2). Диск, совершая вращательное движение, двигался с линейной скоростью 0,1 м/с, усилие на штифте было выбрано 0,5; 1,0; 1,5 Н, а продолжительность испытания составляла 250 м. Интервалы варьирования наполнителей равны 3, а усилия на инденторе – 0,5.

В качестве математической модели был принят полином второго порядка:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2.$$

Согласно плану эксперимента, было проведено девять опытов, каждый из которых проводился трижды в случайном порядке для уменьшения погрешностей. В таблицах 3 и 4 представлены матрицы планирования эксперимента, а также средние значения, дисперсия параллельных опытов и значения, рассчитанные на основании полученных математических моделей.

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы				Уровни варьирования			
Наименование	Размерность	Обозначение		кодовые			интервалы варьирования
		натуральное	кодовое	-1	0	+1	
				натуральные			
Концентрация шпинели	%	K_{III}	X_1	3	6	9	3
Концентрация фторопласта	%	K_{Φ}	X_2	3	6	9	3
Усилие на инденторе	Н	P	X_3	0,5	1,0	1,5	0,5

Полученные значения дисперсий параллельных опытов были проверены на однородность по критерию Кохрена соответственно для степеней свободы числителя $f_1 = 2$ и знаменателя $f_2 = 9$ при уровне значимости 0,05. Дисперсии параллельных опытов оказались однородными, так как расчетные их значения были меньше табулированных.

Таблица 3

Матрица плана и результаты эксперимента для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели

№ опыта	Матрица планирования эксперимента			Выходные параметры оптимизации		
	X_0	X_1	X_3	$\bar{Y}_u$	$S_{Y_u}^2$	$\hat{Y}_u$
1	+1	-1	-1	0,695	5,33E-03	0,676
2	+1	+1	-1	0,655	4,29E-03	0,676
3	+1	-1	+1	0,801	3,36E-03	0,777
4	+1	+1	+1	0,794	5,63E-03	0,777
5	+1	-1	0	0,684	4,69E-03	0,727
6	+1	+1	0	0,730	3,84E-03	0,727
7	+1	0	-1	0,615	2,50E-03	0,598
8	+1	0	+1	0,676	3,54E-03	0,699
9	+1	0	0	0,655	1,52E-03	0,649

После расчета коэффициентов уравнений и учета статистически значимых коэффициентов были получены уравнения регрессии:

1. Для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели:

$$\hat{Y}(\mu) = 0,65 + 0,05 \cdot X_3 + 0,08 \cdot X_1^2.$$

2. Для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта:

$$\hat{Y}(\mu) = 0,21 - 0,04 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_2^2.$$

Таблица 4

Матрица плана и результаты эксперимента для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта

№ опыта	Матрица планирования эксперимента			Выходные параметры оптимизации		
	X_0	X_2	X_3	$\bar{Y}_u$	$s_{Y_u}^2$	$\hat{Y}_u$
1	+1	-1	-1	0,270	9,03E-05	0,271
2	+1	+1	-1	0,206	7,23E-05	0,209
3	+1	-1	+1	0,265	6,40E-05	0,265
4	+1	+1	+1	0,179	1,69E-04	0,181
5	+1	-1	0	0,268	1,60E-05	0,268
6	+1	+1	0	0,200	5,63E-05	0,195
7	+1	0	-1	0,215	1,00E-04	0,214
8	+1	0	+1	0,195	2,50E-05	0,197
9	+1	0	0	0,207	3,60E-05	0,206

По критерию Фишера (F) полученные уравнения регрессии оказались адекватными при уровнях значимости 0,05. Анализ уравнений показал, что коэффициент трения зависит как от концентрации добавок, так и от нагрузочных режимов, причем наибольшее влияние на функцию оказывает концентрация, так как помимо линейных эффектов воздействия в уравнениях имеются и квадратичные. На рисунке 2 представлены графики полученной регрессионной модели зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов.

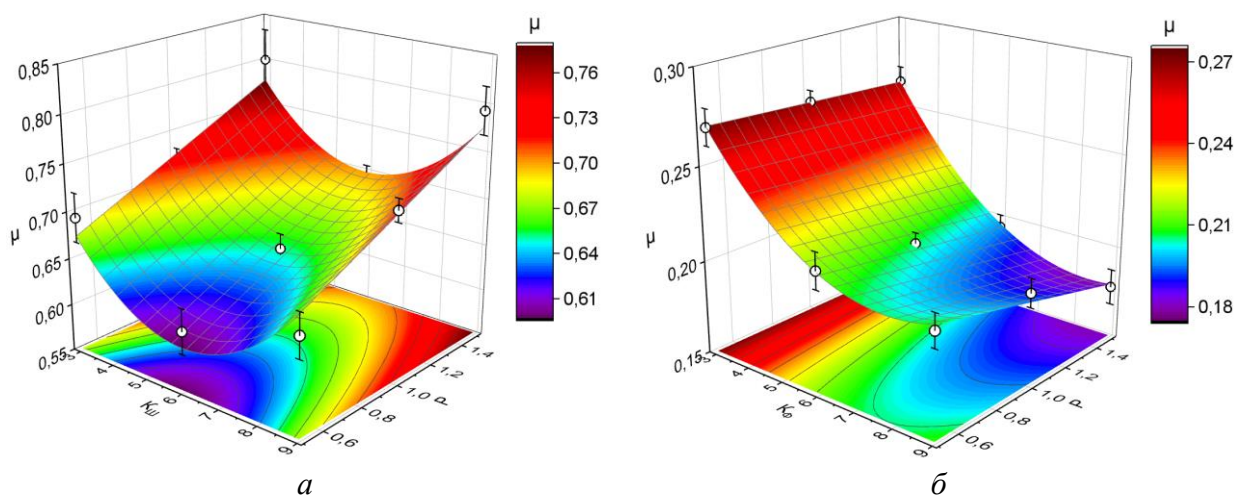


Рис. 2. Изменение величины коэффициента трения μ от нагрузки и концентрации добавки:

- а) – для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели,**
б) – для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта

На основании результатов трибологических испытаний образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели, выбрана массовая доля 6 %. Существенное снижение коэффициента трения достигалось добавлением порошка фторопласта в композит. Причем эффективность работы наполненного материала при увеличении нагрузки наблюдалась с добавлением 6 % ПТФЭ.

Трибологические исследования композиционных материалов

При проведении трибологических лабораторных испытаний вращательное движение диска производилось с линейной скоростью 0,1 м/с. Массовое содержание наполнителей варьировалось в пределах от 0 до 15 %.

При нагрузке, равной 0,5 Н, применение шпинели в качестве наполнителя при любой концентрации значительно увеличивает коэффициент трения (рисунок 3). А при нагрузке в 1 Н коэффициент трения наполненного композита становится сопоставимым со значением его основы. Из рисунка 3 также видно, что применение ПТФЭ с концентрацией в 6 % значительно снижает коэффициент трения. Из полученных данных следует, что наилучшими свойствами композит обладает при концентрации наполнителей с массовой долей 6 %.

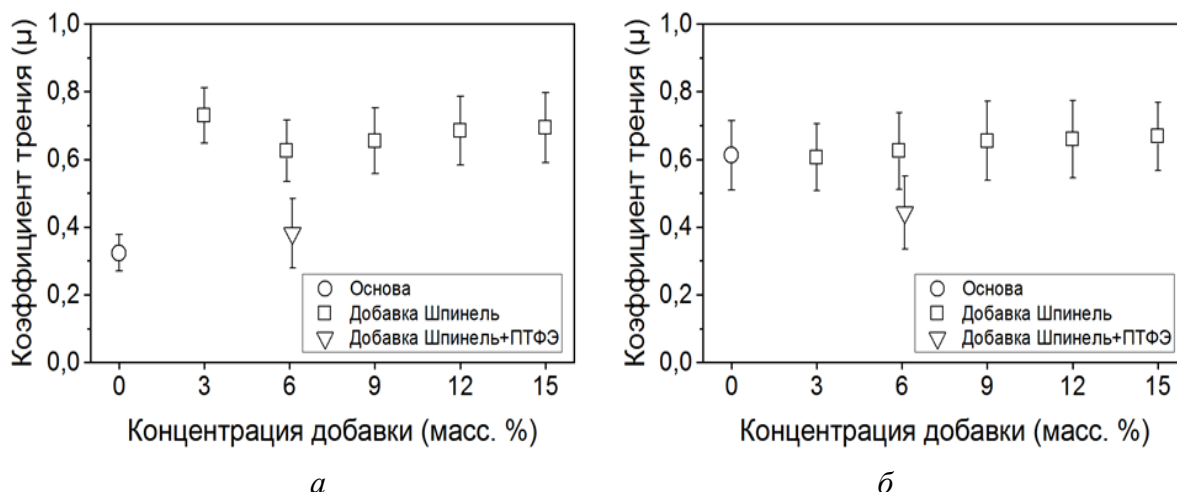


Рис. 3. Влияние концентрации наполнителей на коэффициент трения при различной нагрузке:
а – нагрузка 0,5 Н; б – нагрузка 1 Н

Основные выводы

В результате проведения экспериментальных исследований установлен оптимальный состав полимерного композиционного материала, повышающий эксплуатационные свойства металлополимерного трибосопряжения: введение в полимерную матрицу 6 % шпинели металлов и 6 % ПТФЭ способствует снижению коэффициента трения при контактом давлении 58,8 ... 70,5 МПа на 16,7 %, а при 74,1 ... 88,8 МПа – на 28,6 % по сравнению с немодифицированным полимером.

Полученный модифицированный полимерный материал может применяться не только в ремонтном производстве, но и в качестве покрытия поверхностей узлов трения тягового подвижного состава.

Библиографический список

1. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова. – Москва: Машиностроение, 2005. – 240 с. – ISBN 5-217-03288-X.
2. **Gershman, I. S., Bushe, N. A.** Elements of Thermodynamics and Self-Organization during Friction / I. S. Gershman, N. A. Bushe // Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed. Taylor & Francis Group. – Boca Raton – London – New York, 2006. – Ch. 2. – P. 13–58.

3. **Ищенко, А. А.** Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами / А. А. Ищенко. – Москва: Инфра-Инженерия, 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-9729-0776-2.
4. **Иваночкин П. Г., Мантуров Д. С., Азоян А. И., Данильченко С. А.** Механические и трибологические характеристики модифицированной эпоксидной смолы наноразмерной шпинелью железа / П. Г. Иваночкин, Д. С. Мантуров, А. И. Азоян, С. А. Данильченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3. – С. 6–17. – DOI 10.46973/0201–727X_2022_3_6.
5. **Мантуров Д. С., Иваночкин П. Г., Азоян А. И., Харламов П. В.** Исследование кинетики и механизма формирования вторичных структур модифицированной эпоксидной смолы / Д. С. Мантуров, П. Г. Иваночкин, А. И. Азоян, П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 41–51. – DOI 10.46973/0201–727X_2022_4_41.
6. **Азоян А. И., Мантуров Д. С., Шишияну Д. Н., Данильченко С. А.** Экспериментальное исследование влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала / А. И. Азоян, Д. С. Мантуров, Д. Н. Шишияну, С. А. Данильченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1 (93). – С. 186–195. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_186.
7. **Михальченков А. М., Тюрева А. А., Филин Ю. И., Панова Е. И.** Обоснование методики определения твердости полимерных дисперсных композиционных материалов / А. М. Михальченков, А. А. Тюрева, Ю. И. Филин, Е. И. Панова // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 1. – С. 55–58. – ISSN 2500-2651.
8. **Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – Москва : Наука, 1980. – 228 с.
9. **Евдокимов, Ю. А.** Применение методов моделирования при решении задач трения и износа в машинах / Ю. А. Евдокимов / Труды РИИЖТ. – 1972. – № 84. – С. 53–62.

A. I. Azojan, P. G. Ivanochkin

STUDY OF PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYMERIC MATERIAL AFTER ITS MODIFICATION IN FRICTION UNITS OF ROLLING STOCK

Abstract. The influence of fillers on the physical, mechanical and tribological properties of the polymer material has been studied. Experimental data were obtained using instrumental indentation and tribological analysis methods. It has been shown that the introduction of fillers into the polymer matrix can significantly increase the strength characteristics and, as a result, wear resistance. The improvement of technologies for the creation of composite materials opens up new horizons for their use in traction rolling stock of the transport complex.

Keywords: modification, restoration of friction unit surfaces, composite, hardness, indentation, experimental planning.

For citation: Azojan, A. I. Study of Performance Properties of Polymeric Material after its Modification in Friction Units of Rolling Stock / A. I. Azojan, P. G. Ivanochkin // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 1. – P. 70 – 77.

Сведения об авторах**Азоян Анаид Иосиповна**

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
младший научный сотрудник,
е

Иваночкин Павел Григорьевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук, профессор,
е

Information about the authors**Azojan Anaid Iosipovna**

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Junior Researcher,
e-mail: azojan.anaid@mail.ru

Ivanochkin Pavel Grigorievich

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