

*И. В. Колесников, Е. Д. Аникина, К. Н. Политыко, М. М. Четверик*

## **ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ $Al_2O_3$ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ НА ЕГО ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА \***

**Аннотация.** Рассмотрено влияние добавки  $Al_2O_3$  в разном процентном отношении в базовую матрицу эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 на ее трибологические свойства. Анализ гранулометрического состава и химической структуры исследуемого порошка оксида алюминия выявил оптимальное соотношение для выбора добавки к базовой матрице ЭД-20. Трибологические испытания проводились на машине трения по схеме «ролик – колодка», что позволило точно зафиксировать влияние нагрузки и скорости скольжения на износ образцов. Проведенные трибологические исследования показали, что введение оксида алюминия в различных массовых долях (1, 3, 5 %) позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики эпоксидного композита, снижая коэффициент трения. Эти эффекты обусловлены формированием на поверхности трения трибопленок, обеспечивающих стабильность контактного воздействия нагрузки. Проведенным спектральным анализом выявлено образование вторичных структур в результате взаимодействия алюминия с эпоксидно-диановой смолой. Полученные данные подтверждают перспективность использования эпоксидных композитов в узлах трения машиностроительных конструкций.

Новизна работы состоит в установлении влияния процентного содержания добавки оксида алюминия в матрицу композиционного полимерного материала на величину коэффициента трения по результатам проведенных экспериментальных исследований. При процентном содержании наполнителя 1 и 3 % было выявлено снижение коэффициента трения на ~9 %. Также в работе проведена оценка влияния нагрузочно-скоростного режима на трибологические характеристики полимерного композиционного материала.

**Ключевые слова:** композиционный материал, эпоксидная смола, оксид алюминия, трибологические испытания, износостойкость.

**Для цитирования:** Влияние концентрации  $Al_2O_3$  в полимерном композиционном материале на его трибологические свойства / И. В. Колесников, Е. Д. Аникина, К. Н. Политыко, М. М. Четверик // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 35–43. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_35.

### **Введение**

В настоящее время полимерные композиты находят широкое применение в узлах трения различных отраслей промышленности. Современные исследования направлены на улучшение свойств эпоксидных композитов за счет наполнения их различными дисперсными и наноструктурными добавками, включая оксид алюминия, углеродные нанотрубки, базальтовое и стеклянное волокно [1–3]. Добавление наполнителей в матрицу полимера позволяет снизить коэффициент трения и повысить износостойкость разрабатываемого материала, что существенно увеличит его эксплуатационный ресурс и расширит диапазон условий его применения. Развитие технологии эпоксидных композитов связано не только с совершенствованием добавок, но и с внедрением современных методов переработки (вакуумная инфузия, автоклавное формование, RTM-процессы), а также с переходом к экологически безопасным и биоразлагаемым системам связующего.

В работе [4] рассмотрена возможность трибологического применения эпоксидных композитов, наполненных микрокапсулами со смазочным материалом И-40. В процессе трения происходит высвобождение инкапсулированного смазочного материала в области контакта, а образовавшиеся после разрушения капсул полости способствуют улавливанию частиц износа, что обеспечивает заметное снижение коэффициента трения и удельной скорости изнашивания. В работе [5] представлены два наполнителя с разной массовой долей: первичный наполнитель – карбид кремния 55 %, вторичный – дисульфид молибдена с содержанием 4 % по массе. Такая комбинация наполнителей обеспечивает оптимальный баланс антифрикционных и противоизносных свойств за счет синергетического эффекта между SiC и MoS<sub>2</sub>, что подтверждает снижение коэффициента трения. Следует отметить, что выбор оптимальной

---

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ЮНЦ РАН, номер госрегистрации проекта 125011200153-3.

доли модификатора базовой матрицы является ключевой проблемой. При решении задачи по улучшению трибологических свойств следует обращать внимание на армирующие наполнители для повышения износостойкости материалов [6].

В исследовании [7] были проведены испытания для оценки износостойкости нанокompозитов с  $Al_2O_3$  и SiC на основе эпоксидной смолы по схеме «палец – кольцо». Результаты исследования показали, что введение наночастиц  $Al_2O_3$  в эпоксидную матрицу приводит к более высокой износостойкости материала по сравнению с композитами, содержащими наночастицы SiC или их гибридное сочетание. Таким образом, проявления синергетического эффекта в повышении износостойкости эпоксидных композитов, модифицированных наночастицами, не наблюдалось.

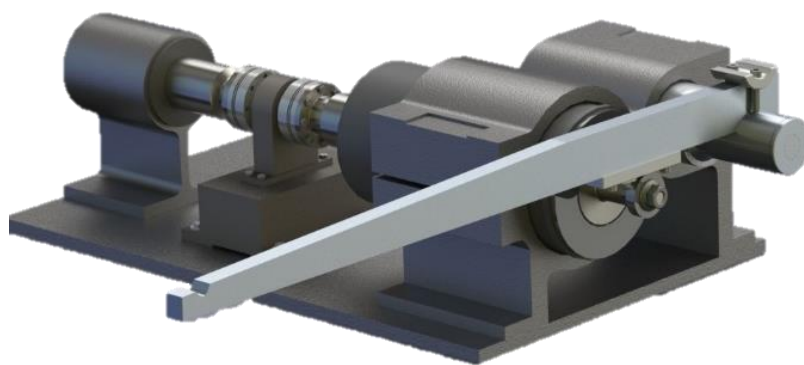
Широкое применение эпоксидной смолы обусловлено сочетанием высокой прочностью, химической стойкостью, хороших адгезионных свойств и универсальности применения эпоксидных связующих. Однако, несмотря на значительное внимание к данной группе материалов, вопросы оптимизации их состава для достижения повышенной износостойкости, термостабильности и механической прочности сохраняют актуальность. В этой связи важно получить экспериментальные зависимости ключевых параметров композиционного материала в зависимости от дисперсных модификаторов, обобщить их на основе математической модели с дальнейшим решением многомерных задач оптимизации. Целью настоящей работы является изучение влияния на трибологические свойства эпоксидной смолы модификации ее оксидом алюминия в разном соотношении (1, 3, 5 % м.д.) и выявление оптимального процентного содержания добавки  $Al_2O_3$ .

#### *Методика исследований*

Матричным материалом была выбрана эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20. В качестве наполнителя был применен оксид алюминия  $Al_2O_3$ , вводимый в различной массовой доле – 1, 3 и 5 %. Данное связующее выступает каркасом для повышения стойкости к износу. Для получения однородной структуры наполнитель добавлялся постепенно, в процессе непрерывного перемешивания композиции, что обеспечивало равномерное распределение частиц в объеме смолы.

Анализ размера и химический состав частиц проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным анализатором OXFORD X-Max 50. Программное обеспечение Aztec микроскопа позволило получить количественное представление о характерном виде вторичных структур на образце и их химическом составе.

Трибологические испытания проводились на модернизированной машине трения СМТ-1. Модернизация оборудования позволила повысить точность, информативность и воспроизводимость получаемых данных, а также проводить испытания различных материалов и покрытий при контролируемых нагрузках и скоростях скольжения (рис. 1). Испытания проводились по схеме «ролик – колодка», где контртелом выступает ролик  $\varnothing 40$  мм из стали 38Х2МЮА. В ходе испытаний осуществлялся непрерывный контроль и регистрация момента трения. Параметры трибологического испытания образцов с разовой ЭД-20 представлены в табл. 1.



**Рис. 1. Общий вид машины трения СМТ-1**

Таблица 1

### Параметры трибологического испытания

Наименование параметра	Значение параметра		
Нагрузка $N$ , Н	50	125	200
Скорость скольжения $V$ , м/с	0,05		
	0,125		
	0,2		
Пройденный путь, м	720		

Установление нагрузочно-скоростных характеристик осуществлялось в соответствии с матрицей ортогонального центрального композиционного плана второго порядка [8], варьируемыми факторами были определены:  $X_1$  = нагрузка  $P$  (уровень варьирования:  $50 \text{ Н} < X_1 < 200 \text{ Н}$ ),  $X_2$  = линейная скорость  $V$  (уровень варьирования:  $0,05 \text{ м/с} < X_2 < 0,2 \text{ м/с}$ ), и параметром оптимизации (откликом)  $Y$  = коэффициент трения. В качестве математической модели был принят полином второго порядка:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2. \quad (1)$$

### Результаты исследований

Проведенный анализ гранулометрического состава и химической структуры исследуемого порошка показал, что частицы представляют собой соединение, основными элементами которого являются алюминий (около 49,8 %), кислород (приблизительно 39,1 %) и углерод (около 11,2 %). Указанное соотношение элементов согласуется с составом оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , образующего прочную и термостойкую кристаллическую решетку. Размер частиц находится в диапазоне от 15 до 59 мкм, что соответствует типовым показателям для микродисперсных порошков технического оксида алюминия, широко применяемых в композиционных и трибологических материалах. Микроструктурный анализ показал, что поверхность частиц не имеет выраженной разветвленной структуры, преобладает гладкая морфология с тенденцией к образованию сферических или близких к изометрическим форм (рис. 2).

Такая форма способствует равномерному распределению наполнителя в полимерной матрице. Сферические частицы имеют меньшую удельную поверхность по сравнению с остроугольными, что снижает вероятность агломерации при смешивании и способствует формированию однородной структуры материала. Кроме того, повышенная плотность и твердость частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также их химическая инертность обеспечивают повышение износостойкости и термостойкости получаемых композиционных систем.

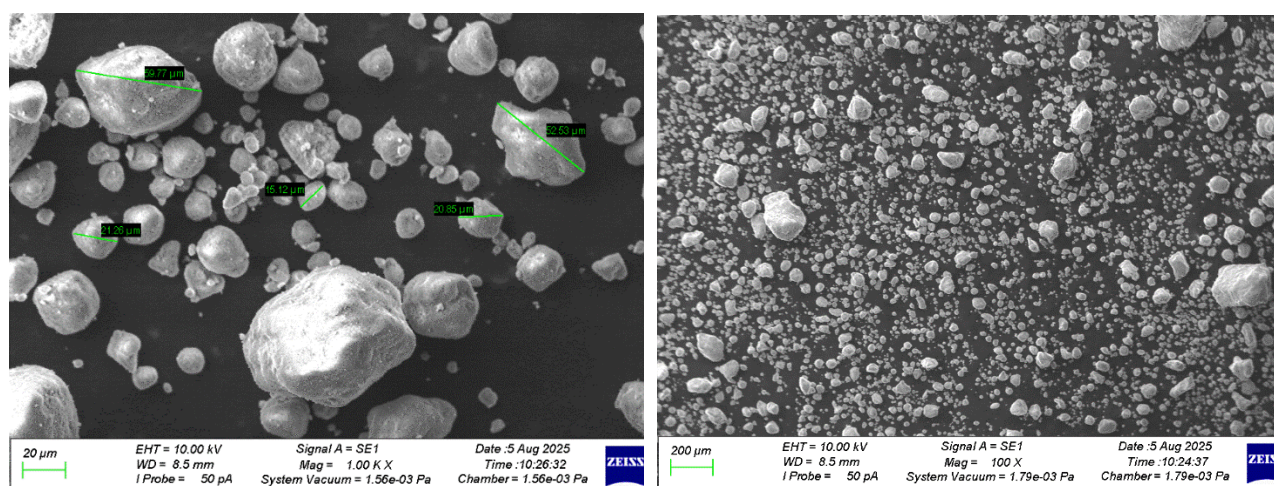


Рис. 2. Исследование дисперсности частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с помощью СЭМ

Для определения нагрузочно-скоростных характеристик была построена матрица плана эксперимента, представленная в табл. 2, где содержатся средние значения дисперсии параллельных опытов и значения, рассчитанные на основании полученных математических моделей. Согласно плану были проведены девять режимных подходов. Проверка полученных значений дисперсии параллельных опытов осуществлялась на однородность по критерию Кохрена ( $G$ ) (2):

$$G_p = \frac{s_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^N s_u^2}, \quad (2)$$

где  $s_{u\max}^2$  – наибольшее значение дисперсии параллельных опытов;

$\sum_{u=1}^N s_u^2$  – сумма дисперсий параллельных опытов.

Таблица 2

Матрица плана и результаты эксперимента для ЭД-20

№ опыта	Матрица планирования эксперимента			Выходные параметры оптимизации		
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$\bar{Y}_u$	$s_{Y_u}^2$	$\hat{Y}_u$
1	+1	-1	-1	0,695	1,40E-03	0,637
2	+1	+1	-1	0,729	3,67E-03	0,85
3	+1	-1	+1	0,647	2,36E-04	0,675
4	+1	+1	+1	0,664	1,36E-04	0,645
5	+1	-1	0	0,63	1,63E-03	0,68
6	+1	+1	0	0,769	5,00E-04	0,85
7	+1	0	-1	0,885	1,95E-03	0,93
8	+1	0	+1	0,757	5,88E-04	0,8
9	+1	0	0	0,85	3,90E-03	0,9

Полученное значение  $G_p$  сравнивали по табличным данным, соответствующим числу степеней свободы  $f_1 = 2$  и  $f_2 = 9$  при уровне значимости  $A = 0,05$ . Расчетное значение  $G_p$  меньше табличного  $G_{\text{табл}}$ :  $0,2782 < 0,4775$ . Данное неравенство позволяет сделать вывод, что дисперсии параллельных опытов однородные.

Далее были определены дисперсия воспроизводимости  $s^2(M) = 1,56E-2$  и среднеквадратическая ошибка эксперимента  $s(M) = 3,95E-2$ .

По результатам трибологических испытаний было получено уравнение регрессии в кодовых значениях (3) и в натуральных значениях факторов (4):

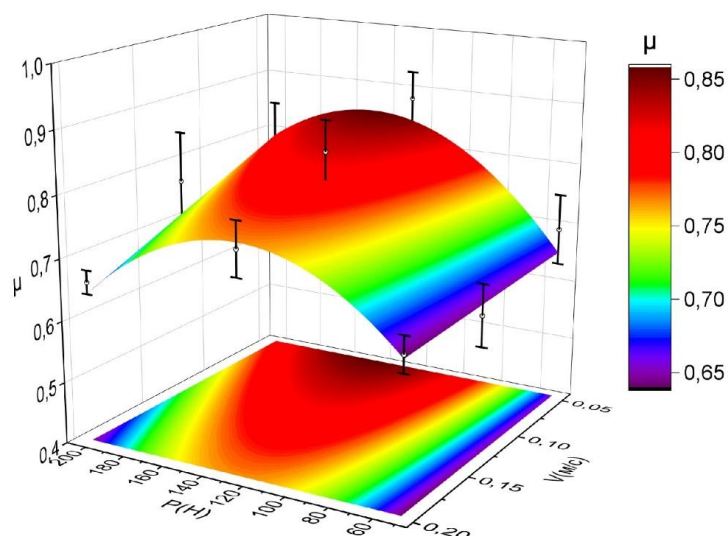
$$Y = 0,813 + 0,0421 \cdot X_1 - 0,0404 \cdot X_2 - 0,0328 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,122 \cdot X_1^2; \quad (3)$$

$$\mu = 0,381 + 0,0067 \cdot X_1 + 0,189 \cdot X_2 - 0,00582 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot X_1^2. \quad (4)$$

Полученное уравнение регрессии (3) было проверено на адекватность по критерию Фишера (F), при уровне значимости 0,95 уравнение адекватное.

Анализ полученного уравнения (3) позволяет сделать выводы о влиянии факторов  $X_1$  (нагрузка  $P$ ) и  $X_2$  (скорость  $V$ ) на  $Y$  (коэффициент трения  $\mu$ ). При оценке линейных коэффициентов видно, что при увеличении  $X_1$  и  $X_2$  происходит увеличение  $Y$ , так как коэффициент  $b_1 > b_2$ , что и указывает на рост  $Y$ . Квадратичный член  $X_1$  снижает рост, но не отменяет его. Наибольший  $Y$  будет достигаться, если фактор  $X_1$  принимает максимальное значение +1, а  $X_2$  – минимальное: -1. Фактор  $X_2$  является неоднозначным: при -1 слабо повышает  $Y$ , а при +1 резко снижает  $Y$ . В целом можно заключить, что увеличение  $X_2$  не обеспечивает устойчивый рост  $Y$ . Резюмируя, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает влияние нагрузка.

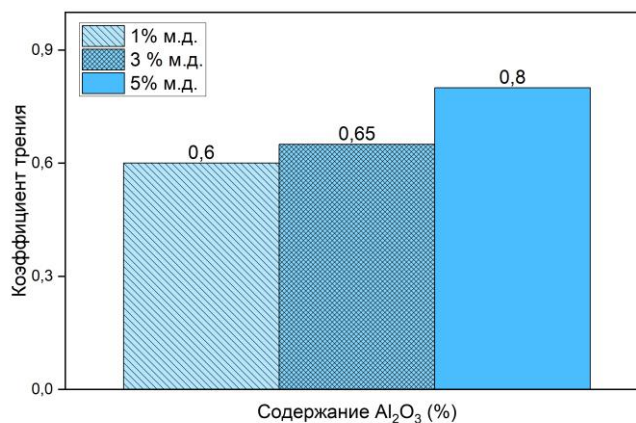
По результатам полученной математической модели (4) выполнена геометрическая интерпретация влияния нагрузочно-скоростных условий эксплуатации на коэффициент трения образцов, представленная на рис. 3.



**Рис. 3. Геометрическая интерпретация уравнения регрессии по влиянию нагрузки  $P$  и скорости  $V$  на коэффициент трения  $\mu$**

Для дальнейших исследований влияния добавок в полимерную матрицу на трибологические характеристики на основании уравнения регрессии были определены нагрузка 200 Н и скорость скольжения 0,2 м/с, данный режим соответствует нагруженному режиму и малому коэффициенту трения для матрицы.

На основании полученных экспериментальных данных построены гистограммы (рис. 4), характеризующие зависимость коэффициента трения от массовой доли (1, 3, 5 % м.д.) оксида алюминия в композиционном материале ЭД-20.



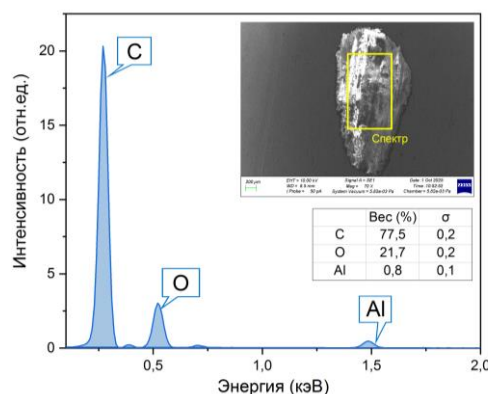
**Рис. 4. Гистограмма изменения коэффициента трения в зависимости от массовой доли оксида алюминия (ЭД-20 + 1, 3, 5 %  $Al_2O_3$ )**

Трибологические испытания на машине трения проводились под нагрузкой 200 Н при скорости скольжения 0,2 м/с. Стоит отметить, что у образцов с содержанием оксида алюминия 1 и 3 % наблюдаются идентичные коэффициенты трения 0,6 и 0,65, что не характерно для образца с массовой долей  $Al_2O_3$  5 %, у которого коэффициент трения достигает 0,8. Данный факт указывает на то, что увеличение содержания оксида алюминия не оказывает существенного влияния на коэффициент трения.

Проведенный комплексный анализ морфологии и элементного состава поверхности дорожки трения показал, что базовая полимерная матрица на основе эпоксидно-диановой смолы в ходе трибологических испытаний подвергается образованию вторичных структур на поверхности контакта.

Выполненное исследование позволило показать, что взаимодействие эпоксидной смолы ЭД-20 и оксида алюминия ведет к образованию вторичных структур. На рис. 5 представлен элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения, а также электронный спектр, характеризующий распреде-

ление химических элементов в зоне контакта. Энергодисперсионный анализ показал наличие характерных пиков, соответствующих элементам – углероду (С), кислороду (О) и алюминию (Al), что указывает на протекание химического взаимодействия между смолой, наполнителем и контртелом в процессе фрикционного воздействия.



**Рис. 5. Элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения**

Спектральный пик алюминия в области  $\approx 1486$  эВ подтверждает перенос композиционного материала на подложку. Содержание алюминия демонстрирует усиление фрикционного воздействия, которое ведет к формированию вторичных трибопленок [9], способствующих повышению износостойкости материала при оптимальном содержании добавки.

Результаты испытаний показывают, что приработанные поверхности обладают уникальными свойствами, которые существенно усиливают эффективность работы трибосистем. Учет влияния этих процессов необходим для разработки более надежных технологий и материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

### **Выводы**

Добавление оксида алюминия  $Al_2O_3$  в различной массовой доле оказывает выраженное влияние на трибологические характеристики эпоксидной матрицы ЭД-20. Проведенные исследования показали, что введение частиц  $Al_2O_3$  способствует формированию более прочного трибослоя на поверхности трения и, как следствие, повышению сопротивления износу.

При содержании добавки на уровне 1 и 3 % м.д. наблюдается наибольшее улучшение эксплуатационных свойств материала – снижение коэффициента трения примерно на 9 %. Эти концентрации обеспечивают оптимальное соотношение между равномерностью распределения частиц в объеме матрицы. Однако при повышении массовой доли  $Al_2O_3$  до 5 % отмечается тенденция повышения коэффициента трения до 0,8, что приводит к снижению трибологических характеристик. Это связано с соединением частиц наполнителя и образованием дефектных зон, приводящих к концентрации напряжений и локальному разрушению матрицы при трении. Следовательно, превышение выбранного оптимального количества наполнителя не усиливает, а, напротив, ослабляет антифрикционные и противоизносные свойства эпоксидного композита. Таким образом, эффект модифицирования системы ЭД-20 частицами  $Al_2O_3$  носит нелинейный характер, и существует оптимальный диапазон концентрации добавки (1 и 3 %), при котором достигается улучшение трибологических свойств за счет снижения коэффициента трения.

### **Список литературы**

- 1 Nano- $Al_2O_3$  obtained the best tribological properties than similar hardness nanoparticles filled into epoxy resin / J. Cui, Y. Tian, R. Li [et. al.] // Colloid and Polymer Science. – 2025. – Vol. 303. – P. 735–745. – DOI 10.1007/s00396-025-05383-x.
- 2 Investigation of the mechanical and tribological behavior of epoxy-based hybrid composite / T. Albahkali, A. Fouly, I. A. Alnaser [et. al.] // Polymer Analysis and Characterization, Special Issue : Mechanical Behavior of Polymeric Materials : Recent

### **References**

- 1 Nano- $Al_2O_3$  obtained the best tribological properties than similar hardness nanoparticles filled into epoxy resin / J. Cui, Y. Tian, R. Li [et. al.] // Colloid and Polymer Science. – 2025. – Vol. 303. –P. 735–745. – DOI 10.1007/s00396-025-05383-x.
- 2 Investigation of the mechanical and tribological behavior of epoxy-based hybrid composite / T. Albahkali, A. Fouly, I. A. Alnaser [et. al.] // Polymer Analysis and Characterization, Special Issue : Mechanical Behavior of Polymeric Materials : Recent

- Trends and Advancements –2023. – Vol. 15 (19). – Article no. 3880. – DOI 10.3390/polym15193880.
- 3 Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // *Mechanics of Composite Materials*. – 2025. – Vol. 61. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.
- 4 Применение маслonaполненных микрокапсул для улучшения трибологических характеристик эпоксидных композитов / П. Г. Иваночкин, О. А. Беляк, А. А. Бичеров, А. М. Ананко // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2023. – № 4 (92). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_4\_8.
- 5 Preparation and Tribological Properties of Modified MoS<sub>2</sub>/SiC/Epoxy Composites / C. Liu, M. Li, Q. Shen, H. Chen // *Materials (Basel)*. – 2021, Apr 1. – Vol. 14 (7). – Article no. 1731. – DOI 10.3390/ma14071731.
- 6 Tribological Characterization of an Epoxy Composite Coating for Enhanced Wear Resistance in Oil Well Casing Applications / A. Bawagnih, N. Merah, F. Al-Badour [et al.] // *Polymers (Basel)*. – 2025, Aug 11. – Vol. 17 (16). – Article no. 2192. – DOI 10.3390/polym17162192.
- 7 Tribological and mechanical properties of epoxy reinforced by hybrid nanoparticles / W. H. Alhazmi, Y. Jazaa, S. Mousa [et al.] // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vol. 18 (03). – DOI 10.1590/1679-78256384.
- 8 **Евдокимов, Ю. А.** Программное сопровождение научно-исследовательских работ по триботехнике. Ч. 1 : Обработка экспериментальных данных методом планирования эксперимента / Ю. А. Евдокимов, В. В. Шаповалов, А. Л. Озябкин. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2003. – 122 с.
- 9 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 (88). – С. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_4\_41.
- Trends and Advancements –2023. – Vol. 15 (19). – Article no. 3880. – DOI 10.3390/polym15193880.
- 3 Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, A. M. Ananko // *Mechanics of Composite Materials*. – 2025. – Vol. 61. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.
- 4 Application of oil-filled microcapsules to improve the tribological characteristics of epoxy composites / P. G. Ivanochkin, O. A. Belyak, A. A. Bicherov, A. M. Ananko // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. – 2023. – No. 4 (92). – P. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X\_2023\_4\_8.
- 5 Preparation and Tribological Properties of Modified MoS<sub>2</sub>/SiC/Epoxy Composites / C. Liu, M. Li, Q. Shen, H. Chen // *Materials (Basel)*. – 2021, Apr 1. – Vol. 14 (7). – Article no. 1731. – DOI 10.3390/ma14071731.
- 6 Tribological Characterization of an Epoxy Composite Coating for Enhanced Wear Resistance in Oil Well Casing Applications / A. Bawagnih, N. Merah, F. Al-Badour [et al.] // *Polymers (Basel)*. – 2025, Aug 11. – Vol. 17 (16). – Article no. 2192. – DOI 10.3390/polym17162192.
- 7 Tribological and mechanical properties of epoxy reinforced by hybrid nanoparticles / W. H. Alhazmi, Y. Jazaa, S. Mousa [et al.] // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2021. – Vol. 18 (03). – DOI 10.1590/1679-78256384.
- 8 **Evdokimov, Yu. A.** Software support for research in tribology. Part 1 : Processing experimental data using the experimental design method / Yu. A. Evdokimov, V. V. Shapovalov, A. L. Ozyabkin. – Rostov-on-Don : RSTU, 2003. – 122 p.
- 9 Research of the kinetics and mechanism of formation of secondary structures of modified epoxy resin / D. S. Manturov, P. G. Ivanochkin, A. I. Azoyan, P. V. Kharlamov // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. – 2022. – No. 4 (88). – P. 41–51. – DOI 10.46973/0201-727X\_2022\_4\_41.

*I. V. Kolesnikov, E. D. Anikina, K. N. Polityko, M. M. Chetverik*

## INFLUENCE OF Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CONCENTRATION IN A POLYMER COMPOSITE MATERIAL ON ITS TRIBOLOGICAL PROPERTIES

**Abstract.** The effect of the adding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at various percentages to the base matrix of ED-20 epoxy-diane resin on its tribological properties is considered. An analysis of the granulometric composition and chemical structure of the aluminum oxide powder under study revealed the optimal ratio for choosing an additive to the ED-20 base matrix. Tribological tests were carried out on a friction machine according to the “roller-pad” scheme, which made it possible to accurately record the effect of load and sliding speed on the wear of the samples. Tribological studies have shown that the addition of aluminum oxide in various mass fractions (1, 3, 5 %)

can significantly improve the performance of the epoxy composite, reducing the coefficient of friction. These effects are caused by the formation of tribofilms on the friction surface, which ensure the stability of the contact effect of the load. The spectral analysis revealed the formation of secondary structures as a result of the interaction of aluminum with epoxy-diane resin. The data obtained confirm the prospects of using epoxy composites in friction units of machine-building structures.

The novelty of the work is to establish the effect of the percentage of aluminum oxide additives in the matrix of a composite polymer material on the value of the coefficient of friction based on the results of experimental studies. With a percentage of filler of 1 and 3 %, a decrease in the coefficient of friction by ~9% was detected. The work also evaluates the effect of the load-speed regime on the tribological characteristics of the polymer composite material.

**Keywords:** composite material, epoxy resin, aluminum oxide, tribological tests, wear resistance.

**For citation:** Influence of  $Al_2O_3$  concentration in a polymer composite material on its tribological properties / I. V. Kolesnikov, E. D. Anikina, K. N. Polityko, M. M. Chetverik // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 35–43. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_35.

### Сведения об авторах

#### **Колесников Игорь Владимирович**

Федеральный исследовательский центр  
«Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН),  
лаборатория транспорта, композиционных материалов и конструкций,  
ведущий научный сотрудник.

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Теоретическая механика»,  
доктор технических наук,  
член-корреспондент РАН,  
ведущий научный сотрудник НИЧ,  
e-mail: oooedt@rambler.ru

#### **Аникина Елена Дмитриевна**

Федеральный исследовательский центр  
«Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН),  
лаборатория транспорта, композиционных материалов и конструкций,  
младший научный сотрудник.

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

#### **Политыко Кирилл Николаевич**

Федеральный исследовательский центр  
«Южный научный центр Российской академии наук» (ЮНЦ РАН),  
лаборатория транспорта, композиционных материалов и конструкций,  
младший научный сотрудник.

### Information about the authors

#### **Kolesnikov Igor Vladimirovich**

Federal Research Center “Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (SSC RAS),  
Laboratory of Transport,  
Composite Materials and Structures,  
Lead Researcher.

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Theoretical Mechanics”,  
Doctor of Engineering Sciences,  
Corresponding Member of RAS,  
Leading Researcher of the Research Department,  
e-mail: oooedt@rambler.ru

#### **Anikina Elena Dmitrievna**

Federal Research Center “Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (SSC RAS),  
Laboratory of Transport,  
Composite Materials and Structures,  
Junior Researcher.

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

#### **Polityko Kirill Nikolaevich**

Federal Research Center “Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (SSC RAS),  
Laboratory of Transport,  
Composite Materials and Structures,  
Junior Researcher.

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

**Четверик Максим Максимович**

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

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

**Chetverik Maksim Maksimovich**

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