

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-49-56

УДК 621.891

## ВЛИЯНИЕ ОСАЖДЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В. К. МЕРИНОВ<sup>+</sup>

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

*Рассмотрена возможность использования отходов металлургического производства, в качестве модификатора трения полимерных композитов.*

*Цель работы — исследование влияния осажденных частиц дымовых газов, образующихся в качестве отходов металлургического производства, на триботехнические и виброакустические свойства фрикционных композитов, предназначенных для работы в условиях стационарного трения.*

*Установлено, что использование осажденных частиц дымовых газов, полученных при выплавке как качественной, так и обыкновенной стали в качестве наполнителя приводит к повышению износостойкости политетрафторэтилена более чем в 400 раз. Показано, что добавка во фрикционные полимерные композиты частиц приводит к увеличению коэффициента трения по стали. Установлено, что оптимальная по величине износостойкости и стабильности коэффициента трения концентрация наполнителя составляет 10–20 мас.%. В области указанных концентраций коэффициент трения фрикционных композитов при  $P = 4$  МПа,  $v = 1$  м/с составляет 0,156–0,158,  $I_h = 8,8 \times 10^{-9}$ , коэффициент стабильности коэффициента трения — 0,96–0,97.*

*Исследована виброакустическая активность фрикционных полимерных композитов. Обнаружено влияние концентрации частиц и температуры в зоне трения на виброакустическую активность пары трения. Показано, что повышение температуры в зоне трения приводит к увеличению давления звука, генерируемого парой трения, в диапазоне высоких частот.*

**Ключевые слова:** фрикционный композит, коэффициент трения, износостойкость, модификатор трения, звуковое давление.

## THE EFFECT OF DEPOSITED FLUE GAS PARTICLES ON TRIBOTECHNICAL AND VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES

V. K. MERINOV<sup>+</sup>

<sup>1</sup>V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

*The possibility of using waste products of metallurgical production, as a friction modifier of friction polymer composites.*

*The aim of the work is to study the effect of deposited flue gas particles generated as metallurgical waste on the tribotechnical and vibroacoustic of friction composites designed to work under stationary friction.*

*It is established that the use of deposited particles as a filler increases the wear resistance of polytetrafluoroethylene by more than 400 times. It is shown that the addition of deposited flue gas particles to the composites obtained by smelting both high-quality and ordinary steel leads to an increase in the friction coefficient for steel. It was found that the concentration of the modifying additive of particles, optimal in terms*

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: vitali.merinov@gmail.com

*of wear resistance and stability of the coefficient of friction, is 10–20 wt.%. In the range of the indicated modifier concentrations, the friction coefficient of friction composites at  $P = 4$  MPa,  $v = 1$  m/s is 0.156–0.158,  $I_h = 8.8 \times 10^{-9}$ , and the coefficient of stability of the friction coefficient  $f$  is 0.96–0.97.*

*The vibroacoustic activity of friction polymer composites was investigated. The effect of particle concentration and temperature in the friction zone on the vibroacoustic activity of a friction pair was found. It is shown that an increase in temperature in the friction zone leads to an increase in the pressure of sound in the high frequency range.*

**Keywords:** friction composite, friction coefficient, wear resistance, friction modifier, sound pressure.

## Введение

Металлокорд является одним из важнейших компонентов, используемых в конструкции автомобильной шины. Качество металлокорда, обусловленное стабильностью натяжения тонкой стальной проволоки в процессе свивки, непосредственно влияет на технические характеристики шин [1]. Стабильность натяжения проволоки в канатных машинах обеспечивают специальные тормозные системы, представляющие собой узлы стационарного трения, с регулируемым моментом трения, стабильность которого зависит от свойств материала тормозных элементов. Тормозные элементы работают в условиях трения без смазочного материала и подвергаются воздействию значительных статических и динамических нагрузок и скоростей. При этом тормозные колодки должны обеспечивать стабильные показатели величины усилия натяжения тонкой проволоки, приемлемый температурный баланс пары трения, низкую виброакустическую активность, высокое сопротивление износу и контактным нагрузкам [2–6].

Для изготовления тормозных элементов разработаны композиционные материалы на основе политетрафторэтиленовой матрицы — фторполимерные композиты (ФПК). Улучшения основных эксплуатационных свойств ФПК достигают путем введения модификаторов трения и различных наполнителей. При выборе наполнителей и модифицирующих добавок необходимо учитывать, что температура формирования изделий из ФПК составляет  $390 \pm 5$  °С [7–11].

В металлургической отрасли, в качестве отходов деятельности дуговых электросталеплавильных печей, образуются осажденные частицы дымовых газов. Осажденные частицы имеют достаточно стабильный элементный и фракционный состав и представляют собой однородную механическую смесь, состоящую преимущественно из сферических частиц оксидов металлов размером не более 1 мкм.

Перспективным представляется использование осажденных частиц в качестве наполнителей фрикционных полимерных композитов. Это позволяет снизить их стоимость и решить проблему утилизации производственных отходов.

**Цель работы** — исследование влияния осажденных частиц дымовых газов, образующихся в качестве отходов металлургического производства, на триботехнические и виброакустические свойства

фрикционных композитов, предназначенных для работы в условиях стационарного трения.

## Материалы и методы исследования

Модельные фрикционные композиты для узлов стационарного трения изготавливали на основе ПТФЭ (ГОСТ 10007). В качестве армирующих наполнителей полимерной матрицы использовали супертонкие минеральные волокна (МВ) длиной не более 150 мкм и диаметром не более 3 мкм, целевых добавок — оксиды переходных металлов, модификаторов трения — два вида осажденных частиц дымовых газов с условными обозначениями С1 и С2, полученных при выплавке качественной стали и стали обыкновенного качества. В качестве материала сравнения использовали композиционный состав на основе ПТФЭ (ТУ ВУ 400084698.312-2018), широко используемый в технологическом оборудовании металлургических производств.

Для изготовления ФПК применяли высокоскоростной смеситель вертикального типа. Образцы для проведения фрикционных исследований получали методом прямого прессования при удельной нагрузке  $P = 100 \pm 5$  МПа. Время выдержки под давлением составляло 60 с. Термическую обработку осуществляли в электропечи «SNOL 180/400» («Umega», Литва) по заданному температурному режиму. Для проведения испытаний изготовили 2 серии образцов с концентрацией модификатора от 3 мас.% до 30 мас.% смеси.

Триботехнические испытания ФПК проводили на машине трения «СМЦ-2» по схеме «вал–частичный вкладыш». Использовали металлическое контртело в виде ролика, изготовленное из Стали 45 с диаметром 40 мм и шириной 12 мм. Образцы фрикционного материала изготавливали в виде секторов с длиной дуги по внутреннему диаметру 20 мм и шириной 10 мм. Перед началом испытаний осуществляли приработку пары трения при давлении  $P = 1$  МПа и скорости скольжения  $v = 1$  м/с. Приработку проводили до достижения фактической площади контакта не менее 90% от контурной площади образца. Температура окружающей среды во время испытаний — 20–25 °С. Относительная влажность воздуха в помещении — 45–50%. После приработки и каждого испытания поверхность ролика очищали с помощью шлифовальной шкурки с размером зерна 10 мкм. Линейную интенсивность изнашивания определяли по формуле:

$$I_h = \frac{m_0 - m_k}{\rho \cdot S \cdot L},$$

где  $m_0$ , кг — начальная масса образца;  $m_k$ , кг — масса образца после испытания;  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> — плотность материала образца;  $S = 2 \text{ см}^2$  — контурная площадь фрикционного контакта;  $L = v \cdot \tau$ , м — длина пробега при испытании, где  $v$ , м/с — скорость скольжения;  $\tau$ , с — время испытания.

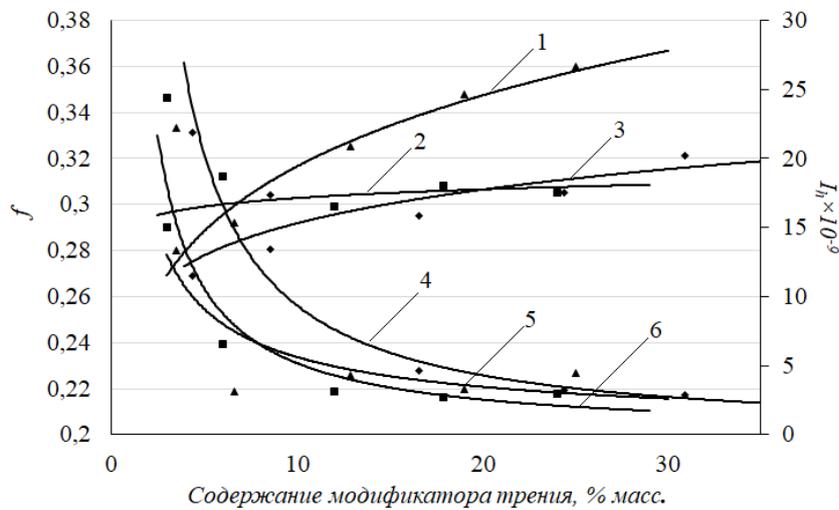
Анализ поверхностей трения ФПК проводили на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором «Vega II LSH» («TESCAN», Чехия). Исследование твердости композитов проводили по методу Бринелля на приборе «НР 250» путем вдавливания шарика диаметром 5 мм в поверхность плоскопараллельного образца. Диаметр отпечатка

измеряли с точностью до 0,01 мм.

Для измерения шума применяли методы бесконтактных измерений с использованием униполярного измерительного микрофона и системы анализа виброакустических сигналов «PULSE 3560В» («Briel&Kjaer», Дания). Фрикционные составляющие звукового давления определяли оригинальным методом в соответствии с [12].

### Результаты и их обсуждение

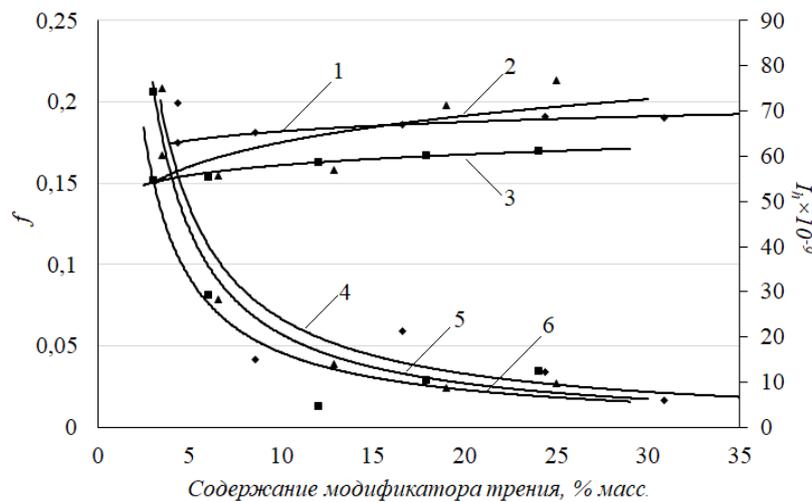
На рис. 1–2 представлены зависимости изменения коэффициента трения и линейной интенсивности изнашивания ФПК от содержания наполнителей при скорости  $v = 1 \text{ м/с}$  и нагрузках  $P = 2$  и 4 МПа. Длительность испытаний  $\tau = 2 \text{ ч}$ .



ФПК, содержащие в качестве наполнителей МВ (♦), МВ и оксиды металлов МВ/С1 (■), МВ/С2 (▲)

Рисунок 1 — Зависимость коэффициента трения  $f$  и линейной интенсивности изнашивания ФПК  $I_h$  от содержания наполнителей при  $P = 2 \text{ МПа}$  (1, 2, 3 –  $f$ ; 4, 5, 6 –  $I_h$ )

Fig. 1 — Dependence of the friction coefficient  $f$  and the linear wear intensity  $I_h$  on the content of fillers at  $P = 2 \text{ МПа}$  (1, 2, 3 –  $f$ ; 4, 5, 6 –  $I_h$ )



ФПК, содержащие в качестве наполнителей МВ (♦), МВ и оксиды металлов МВ/С1 (■), МВ/С2 (▲)

Рисунок 2 — Зависимость коэффициента трения  $f$  и линейной интенсивности изнашивания ФПК  $I_h$  от содержания наполнителей при  $P = 4 \text{ МПа}$  (1, 2, 3 –  $f$ ; 4, 5, 6 –  $I_h$ )

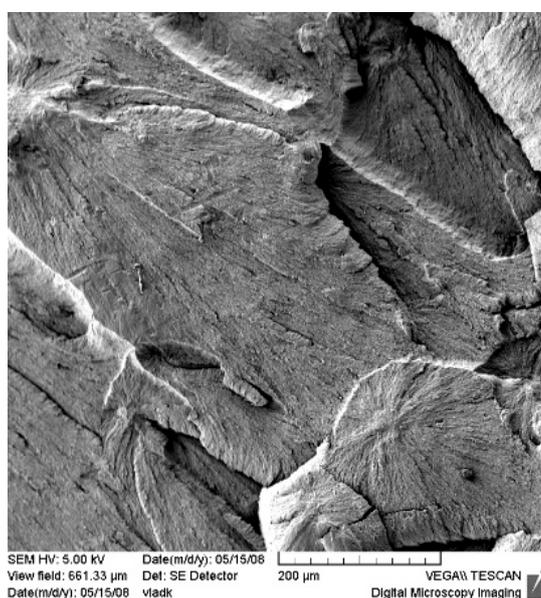
Fig. 2 — Dependence of the friction coefficient  $f$  and the linear wear intensity  $I_h$  on the content of fillers at  $P = 4 \text{ МПа}$  (1, 2, 3 –  $f$ ; 4, 5, 6 –  $I_h$ )

Как свидетельствуют данные, приведенные на рис. 1, 2, наилучшие значения износостойкости и стабильности коэффициента трения имеют ФПК, содержащие 10–20 мас.% модифицирующей добавки. Обнаружено, что значения износостойкости ФПК более чем в 400 раз превышают износостойкость материала сравнения, при этом возрастает и твердость ФПК до 54–57 НВ. Модифицирование ФПК осажденными частицами дымовых газов, полученных при выплавке стали различного сортамента, приводит к увеличению коэффициента трения. Отличия триботехнических свойств ФПК объясняется различием в их химическом составе, в первую очередь, содержанием оксидов металлов. ФПК, обладающие наилучшей износостойкостью, были подвергнуты длительным фрикционным испытаниям в

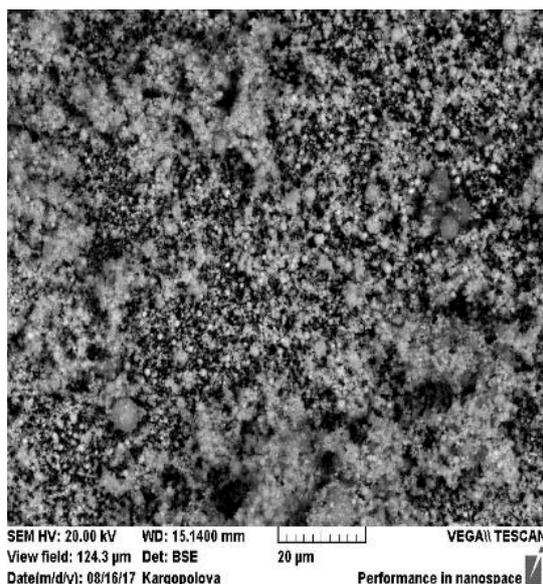
течение 120 ч. Установлено, что коэффициент стабильности коэффициента трения ФПК составляет 0,96–0,97.

На рис. 3–5 представлены микрофотографии наполнителей и поверхностей трения ФПК различного состава.

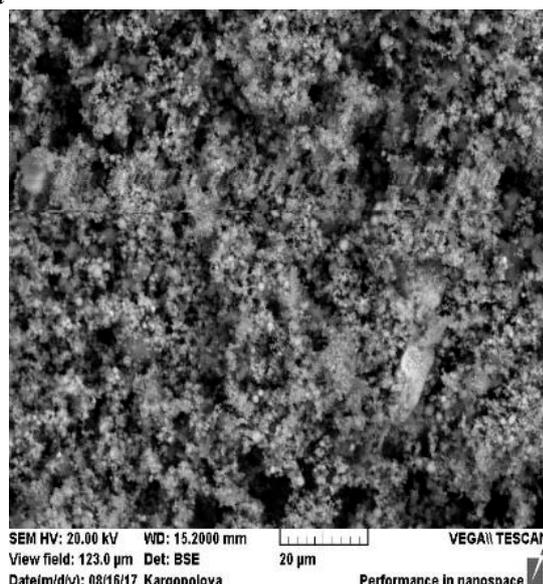
Анализ изображений поверхностей трения показывает, что характерная для ПТФЭ (рис. 3, а) регулярная пластинчатая структура в ФПК, содержащем МВ и модификаторы трения, существенно изменяется. Можно предположить, что повышение износостойкости ФПК связано с изменением структуры поверхности трения: увеличивается количество равномерно распределенных неоднородностей и повышается твердость материала.



а



б



в

Рисунок 3 — Микрофотографии образцов полимерной матрицы из ПТФЭ (а) и осажденных частиц дымовых газов: б – частицы С1; в – частицы С2

Fig. 3 — Micrographs of samples of polymer PTFE matrix (a) and deposited flue gas particles: б – particles C1; в – particles C2

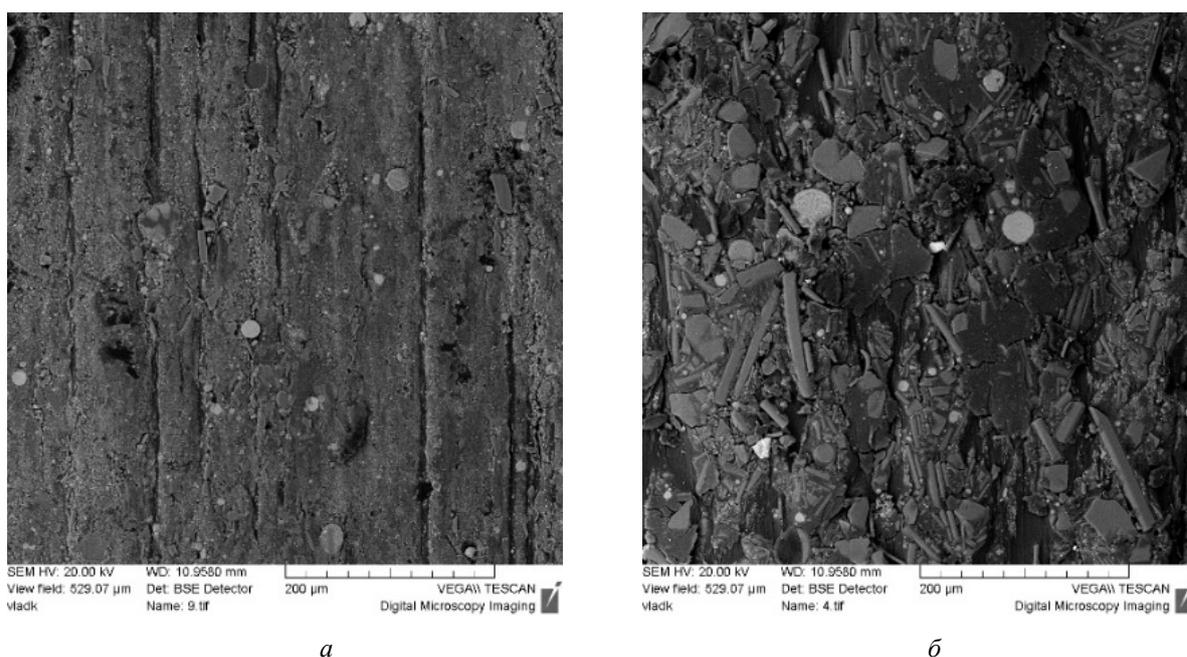


Рисунок 4 — Микрофотографии поверхностей трения ФПК, наполненных частицами C1: *a* – 6 мас.%; *б* – 12 мас.%  
 Fig. 4 — Micrographs of the friction surface of friction composites filled with C1 particles: *a* – 6 wt.%; *б* – 12 wt.%

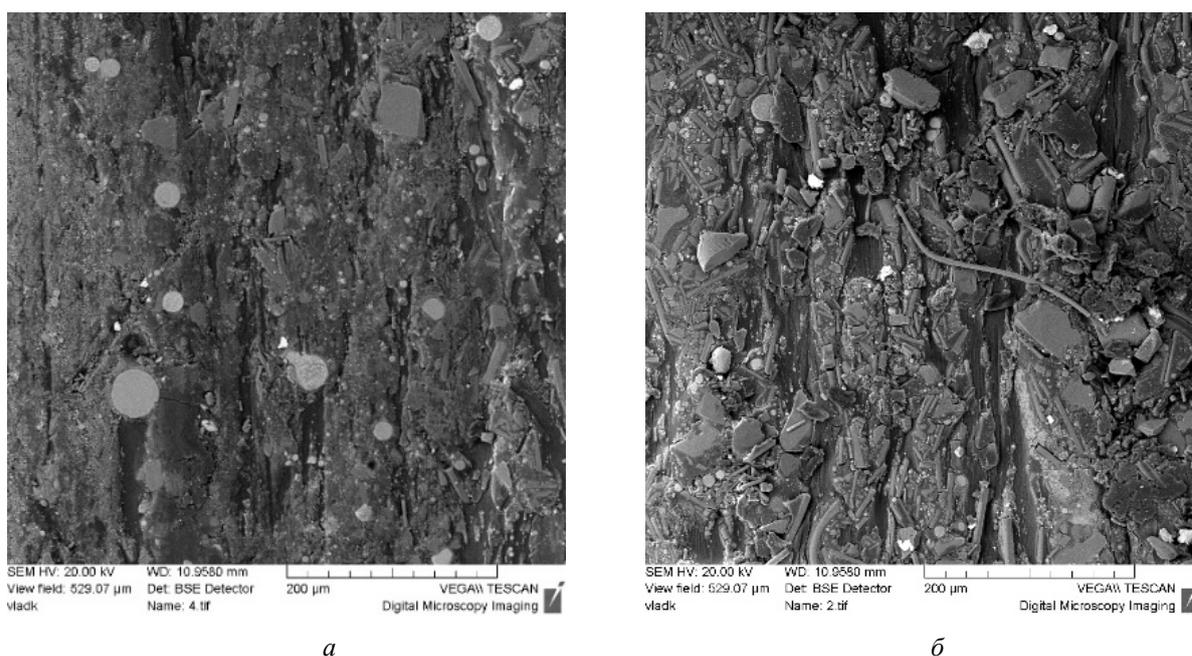


Рисунок 5 — Микрофотографии поверхностей трения ФПК, наполненных частицами C2: *a* – 6 мас.%; *б* – 12 мас.%  
 Fig. 5 — Micrographs of the friction surface of friction composites filled with C2 particles: *a* – 6 wt.%; *б* – 12 wt.%

На рис. 6–9 представлены спектры шума, генерируемого парами трения «сталь–наполненный C1 или C2 ФПК».

Экспериментальные данные свидетельствуют, что для всех исследованных ФПК повышение температуры трения и концентрации наполнителя приводит к увеличению фрикционной составляющей звукового давления в области высоких частот >16 кГц.

## Выводы

Результаты фрикционно-износных испытаний при стационарных режимах трения показали, что использование осажденных частиц дымовых газов в качестве модифицирующей добавки для ПТФЭ позволяет значительно увеличить его износостойкость. Установлено, что оптимальная по величине износостойкости и стабильности коэффициента трения концентрация модифицирующей добавки частиц составляет 10–20 мас.%. В

области указанных концентраций модификатора коэффициент трения ФПК ( $P = 4$  МПа,  $v = 1$  м/с) — 0,156–0,158,  $I_h$  —  $8,8 \times 10^{-9}$ , коэффициент стабильности коэффициента трения  $f$  — 0,96–0,97.

Анализ поверхностей трения показывает, что характерная для ПТФЭ регулярная пластинчатая структура существенно трансформируется при введении в полимер МВ и частиц дымовых газов, что приводит к увеличению твердости ФПК до 54–57 НВ.

Установлено, что для всех исследованных ФПК повышение температуры трения и концентрации модификатора трения приводит к увеличению значений фрикционной составляющей давления генерируемого звука в области высоких частот.

Результаты триботехнических и виброакустических испытаний позволяют рассматривать осаждённые частицы дымовых газов в качестве перспективного наполнителя для ФПК. Применение

осажденных частиц дымовых газов позволит отказаться от использования дорогостоящих металлических наполнителей и сделать еще один шаг к решению важной экологической проблемы — утилизации отходов промышленных производств.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта Белорусского республиканского конкурса фундаментальных исследований Т19УЗБГ-010.

### Обозначения

МВ — минеральное волокно; ПТФЭ — политетрафторэтилен; ФПК — фторполимерный композит; С1, С2 — осажденные частицы дымовых газов;  $f$  — коэффициент трения;  $I_h$  — линейная интенсивность изнашивания.

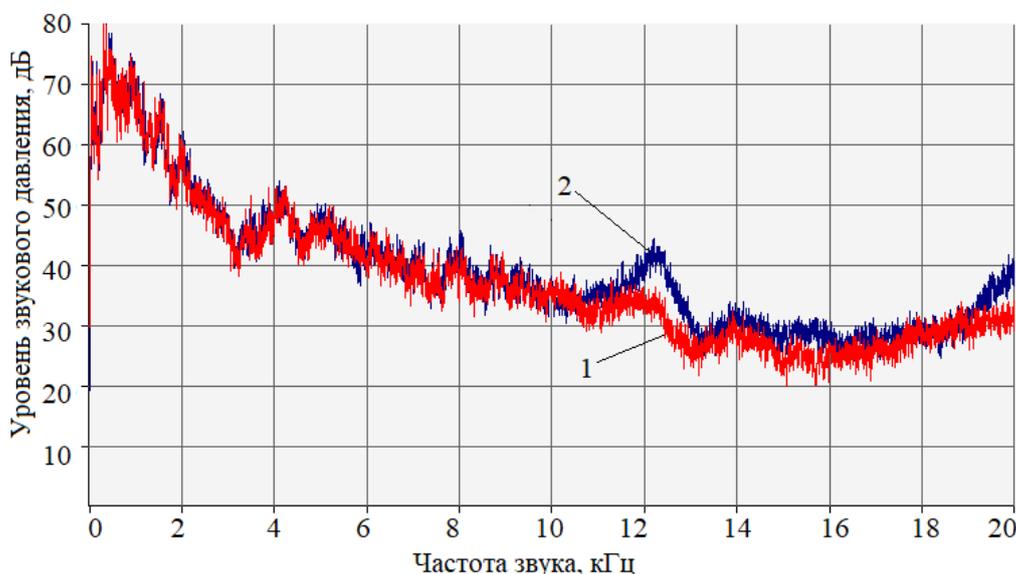


Рисунок 6 — Спектры шума пары трения сталь–ФПК, содержащий 6 мас.% частиц С1 при температуре: 1 – 101 °С; 2 – 129 °С  
Fig. 6 — Noise spectra of a friction pair steel–friction composite containing 6 wt.% particles C1 at a temperature of: 1 – 101 °C; 2 – 129 °C

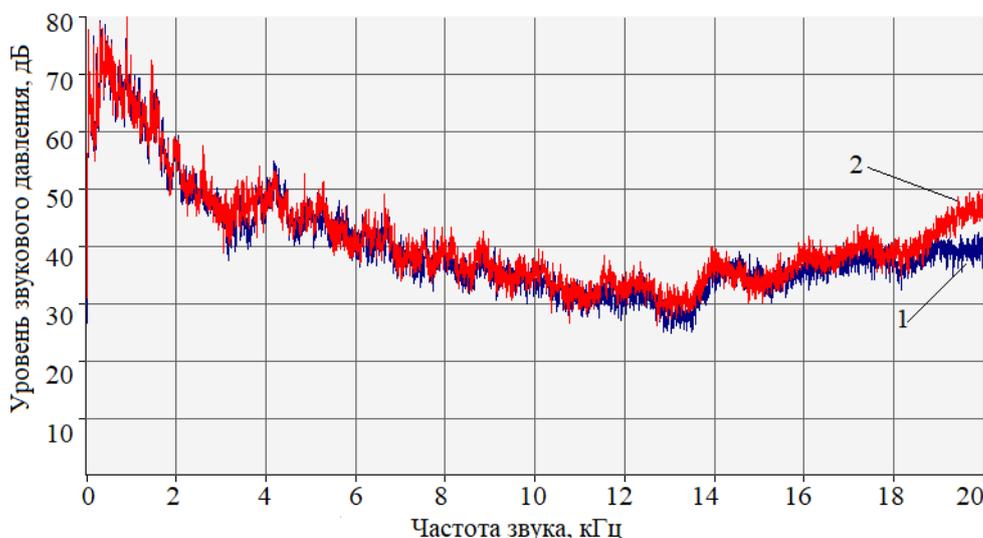


Рисунок 7 — Спектры шума пары трения сталь–ФПК, содержащий 18 мас.% частиц С1 при температуре: 1 – 111 °С; 2 – 148 °С  
Fig. 7 — Noise spectra of a friction pair steel–friction composite containing 18 wt.% particles C1 at a temperature of: 1 – 111 °C; 2 – 148 °C

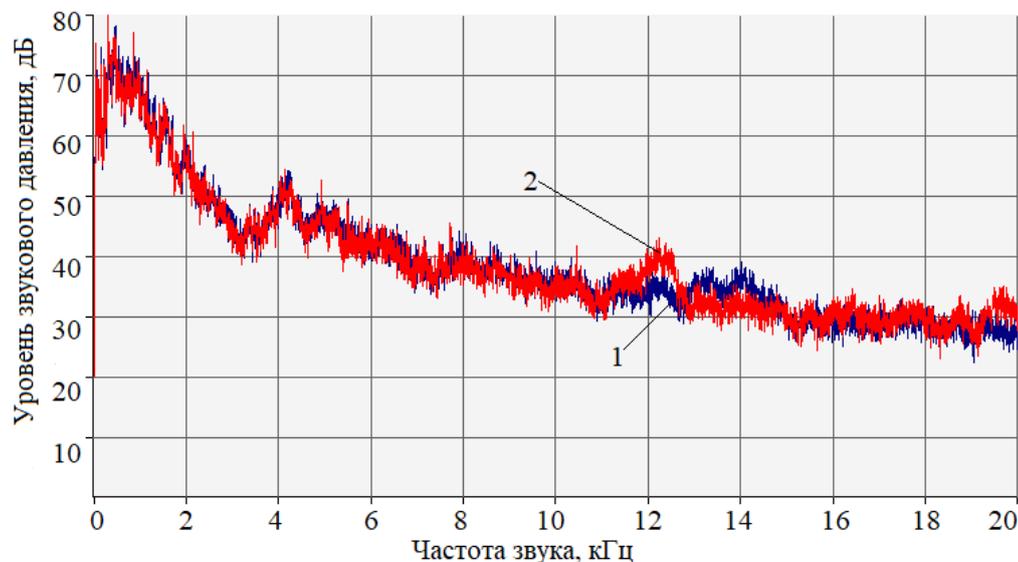


Рисунок 8 — Спектры шума пары трения сталь–ФПК, содержащий 6 мас.% частиц C2 при температуре: 1 – 79 °C; 2 – 120 °C  
 Fig. 8 — Noise spectra of a friction pair still-friction composite containing 6 wt.% particles C2 at a temperature of: 1 – 79 °C; 2 – 120 °C

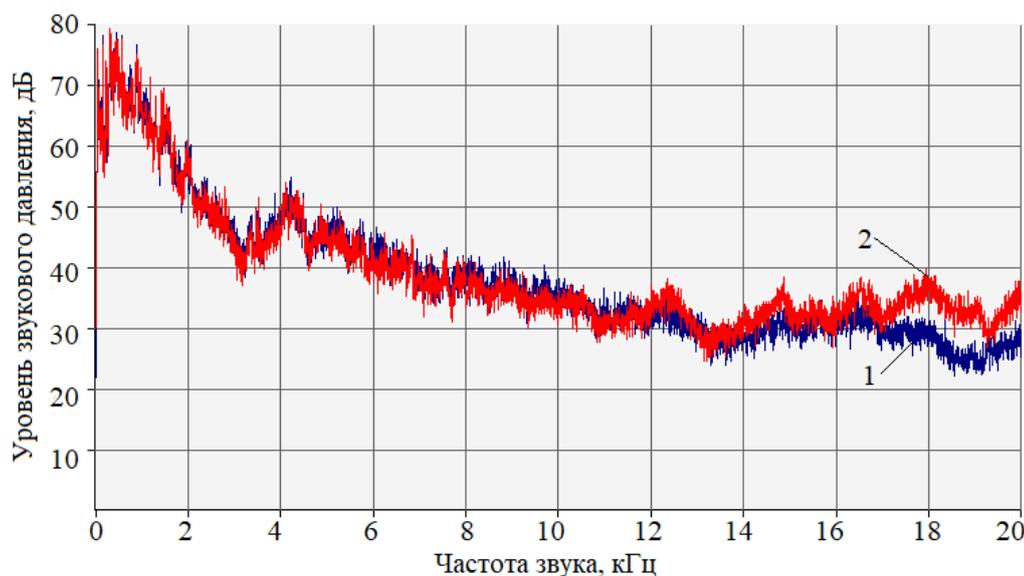


Рисунок 9 — Спектры шума пары трения сталь–ФПК, содержащий 18 мас.% частиц C2 при температуре: 1 – 98 °C; 2 – 138 °C  
 Fig. 9 — Noise spectra of a friction pair still-friction composite containing 18 wt.% particles C2 at a temperature of: 1 – 98 °C; 2 – 138 °C

## Литература

1. Бирюков Б. А., Феоктистов Ю. В., Игнатьев С. Н. Расчеты параметров свивки металлокорда. Мн.: Белоргстанкинпромиздат, 1996. 128 с.
2. Sergienko V. P., Bukharov S. N. Vibration and noise in frictional joints of machines // *Tribologia*, 2008, no. 1, pp. 129–138.
3. Бухаров С. Н., Меринов В. К., Сенатрев А. Н., Сергиенко В. П. Исследование влияния оксида железа (III) на триботехнические и виброакустические характеристики фрикционных композитов для узлов стационарного трения // *Трение и износ*. 2018. Т. 39, № 6. С. 567–572.
4. Sergienko V. P., Bukharov S. N. *Noise and Vibration in Friction Systems*. Switzerland: Springer, 2015. 251 p.
5. Васильев А. П., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г., Иванова З. С. Разработка антифрикционных материалов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами // *Вестник СВФУ им. М. К. Аммосова*. 2017. № 3 (59). С. 39–47.
6. Kudina E. F., Pechersky G. G. *Nanostructured Organosilicate Composites: Production, Properties, Application // Resin Composites: Properties, Production and Application / Editor Deborah B. Song*. New York: Nova Science Publishers, 2011, ch. 3, pp. 101–128.
7. Охлопкова А. А., Виноградов А. В., Пинчук Л. С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. Гомель: ИММС НАНБ, 1999. 164 с.
8. Виноградов А. В., Циеленс У. А., Адрианова О. А., Демидова Ю. В., Лобзов С. Н., Янкович Д. Р., Стафецкий Л. П. Ультрадисперсные тугоплавкие соединения — структурно-активные наполнители кристаллических полимеров // *Механика композитных материалов*. 1991. № 3. С. 526–530.
9. Yoshinori Takeichia, Agung Wibowoa, Masahiro Kawamura, Masao Uemura. Effect of morphology of carbon black fillers on the tribological properties of fibrillated PTFE // *Wear*, 2008, vol. 264, is. 3–4, pp. 308–315.
10. Сергиенко В. П., Биран В. В., Сенатрев А. Н., Ахметов Т. А. Особенности трения и изнашивания фторполимерных компози-

тов, содержащих дисперсные углеродные наполнители // Композитные материалы. 2010. Т. 4, № 1. С. 103–107.

11. Сергиенко В. П., Целуев М. Ю., Купреев А. В., Антоноук В. Е., Заболоцкий М. М., Рудый В. В. Тепловой режим работы многодискового маслоохлаждаемого тормоза // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2009. № 4 (9). С. 39–46.
12. Пат. 2449255 РФ, МПК7 G 01 M 15/00, G01 M 17/07. Способ определения триботехнических составляющих виброакустических спектров трибосопряжений / В. И. Колесников, Н. А. Мясникова, В. П. Сергиенко, С. Н. Бухаров, А. П. Сычев. N 4 2009127468; заявл. 16.07.2009; опубл. 27.04.2012.
6. Kudina E. F., Pechersky G. G. Nanostructured Organosilicate Composites: Production, Properties, Application. *Resin Composites: Properties, Production and Application*. Editor Deborah B. Song. New York: Nova Science Publishers, 2011, ch. 3, pp. 101–128.
7. Ohlopkova A. A., Vinogradov A. V., Pinchuk L. S. *Plastiki, napolnennyye ul'tradispersnymi neorganicheskimi soedineniyami* [Plastics filled with ultrafine inorganic compounds]. Gomel': IMMS NANB Publ., 1999. 164 p.
8. Vinogradov A. V., Tsielens U. A., Adrianova O. A., Demidova Yu. V., Lobzov S. N., Yankovich D. R., Stafetskiy L. P. Ul'tradispersnye tugoplavkie soedineniya – struktumno-aktivnye napolniteli kristallicheskikh polimerov [Ultrafine refractory compounds are structurally active fillers of crystalline polymers]. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1991, no. 3, pp. 526–530.
9. Takeichia Y., Wibowoa A., Kawamurab M., Uemuraa M. Effect of morphology of carbon black fillers on the tribological properties of fibrillated PTFE. *Wear*, 2008, vol. 264, no. 3–4, pp. 308–315.
10. Sergienko V. P., Biran V. V., Senatrev A. N., Akhmetov T. A. Osobennosti treniya i iznashivaniya torpolimernykh kompozitov, sodержashchikh dispersnye uglerodnye napolniteli [Features of friction and wear of fluoropolymer composites containing dispersed carbon fillers]. *Kompozitnye materialy*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 103–107.
11. Sergienko V. P., Tseluev M. Y., Kupreev A. V., Antonyuk V. E., Zabolotskiy M. M., Rudyy V. V. Teplovoy rezhim raboty mnogodiskovogo maslookhlazhdaemogo tormoza [Thermal performance of a multidisc oil-cooled brake]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2009, no. 4 (9), pp. 39–46.
12. Kolesnikov V. I., Myasnikova N. A., Sergienko V. P., Bukharov S. N., Sychev A. P. Sposob opredeleniya tribotekhnicheskikh sostavlyayushchikh vibroakusticheskikh spektrov tribosopryazheniy [Method for determining the tribological components of vibroacoustic spectra of tribological conjugations]. Patent RF, no. 2009127468, 2009.

## References

1. Biryukov B. A., Feoktistov Yu. V., Ignat'ev S. N. *Raschety parametrov svivki metallokorda* [Calculations of steel cord twist]. Minsk: Belorgstankinpromizdat Publ., 1996. 128 p.
2. Sergienko V. P., Bukharov S. N. Vibration and noise in frictional joints of machines. *Tribologia*, 2008, vol. 1, pp. 129–138.
3. Bukharov S. N., Merinov V. K., Senatrev A. N., Sergienko V. P. Issledovanie vliyaniya oksida zheleza (III) na tribotekhnicheskie i vibroakusticheskie kharakteristiki friktsionnykh kompozitov dlya uzlov statsionarnogo treniya [Studies in the effect of iron oxide (III) on tribotechnical and vibroacoustic performance of brake composites for stationary tribosystems]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2018, vol. 39, no. 6, pp. 567–572.
4. Sergienko V. P., Bukharov S. N. *Noise and Vibration in Friction Systems*. Switzerland: Springer, 2015. 251 p.
5. Vasil'ev A. P., Okhlopkova A. A., Struchkova T. S., Alekseev A. G., Ivanova Z. S. Razrabotka antifriktsionnykh materialov na osnove politetrafluoretilena s uglerodnymi voloknami [Development of antifriction materials based on polytetrafluorethylene with carbon fibers]. *Vestnik SVFU im. M. K. Ammosova*, 2017, no. 3 (59), pp. 39–47.

Поступила в редакцию 25.06.2019

© В. К. Меринов, 2019