



УДК 669.71
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-75-83

Поступила 14.11.2018
Received 14.11.2018

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЗВЕШЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

*Т. А. АХМЕТОВ, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by,
В. К. МЕРИНОВ, Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Беларусь. E-mail: vitali.merinov@gmail.com,
Н. В. КАРГАПОЛОВА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК», г. Жлобин, Гомельская обл., Беларусь, ул. Промышленная, 37. E-mail: nmg.plus@bmz.gomel.by*

Рассмотрена возможность использования осажденных взвешенных частиц дуговых электросталеплавильных печей в качестве термостойких модифицирующих добавок для композитов фрикционного назначения. Показано, что осажденные частицы, полученные при выплавке стали различного сортамента, имеют идентичную морфологию и представляют собой однородную механическую смесь, состоящую преимущественно из сферических частиц размером не более 1 мкм.

Установлено, что композиты на фторполимерной основе, модифицированные осажденными частицами, полученными при выплавке стали различного сортамента, имеют различные триботехнические свойства. Это объясняется различием в химическом составе осажденных частиц.

Установлено, что использование осажденных частиц в композиционных материалах позволяет варьировать значением коэффициента динамического трения в более широком диапазоне, в частности, получить более высокие и стабильные его значения, при этом износостойкость модифицированных фрикционных композитов более чем в 500 раз превышает аналогичный показатель матричного полимера – политетрафторэтилена.

Ключевые слова. Фрикционный композит, стационарное трение, коэффициент трения, металлокорд, осажденные частицы, модификатор трения.

Для цитирования. Ахметов, Т. А. Триботехнические характеристики фрикционных композитов, модифицированных взвешенными частицами отходящих дымовых газов / Т. А. Ахметов, В. К. Меринов, Н. В. Каргаполова // Литье и металлургия. 2018. № 4. С. 75–83. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-75-83.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FRICTION COMPOSITES MODIFIED BY THE SUSPENDED PARTICLES OF EXHAUST FLUE GASES

*T. A. AKHMETOV, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennyya str. E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by,
V. K. MERINOV, Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems named after V. A. Bely of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel city, Belarus. E-mail: vitali.merinov@gmail.com,
N. V. KARGAPOLOVA, OJSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Gomel region, Belarus, 37, Promyshlennyya str. E-mail: metiz.to@bmz.gomel.by*

The possibility of using the deposited suspended particles of electric arc furnaces as heat-resistant modifying additives for friction composites is considered. It is shown that the precipitated particles obtained during the smelting of steel of different grades have identical morphology and are a homogeneous mechanical mixture consisting mainly of spherical particles of no more than 1 μm in size.

It is established that the composites on the basis of the fluoropolymer, modified by precipitated particles obtained in the smelting of steel of various sizes have different tribological properties. This is due to the difference in the chemical composition of the deposited particles.

It was found that the use of deposited particles in composite materials allows to vary the value of the dynamic friction coefficient in a wider range, in particular to obtain higher and stable values, while the wear resistance of modified friction composites is more than 500 times higher than the same index of the matrix polymer – polytetrafluoroethylene.

Keywords. Friction composite, stationary friction, coefficient of friction, metal wire cord, deposited particles, friction modifier.

For citation. Akhmetov T. A., Merinov V. K., Kargapolova V. N. Tribological properties of friction composites modified by the suspended particles of exhaust flue gases. *Foundry production and metallurgy*, 2018, no.4, pp. 75–83. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-75-83.

Введение

Металлокорд является одним из важнейших компонентов, используемых в конструкции автомобильной шины. Качество металлокорда непосредственно влияет на технические характеристики шин, в том числе на безопасность эксплуатации транспортных средств. Металлокорд имеет сложную витую конструкцию. Качество металлокорда в значительной мере обеспечивается за счет стабильного натяжения тонкой стальной проволоки в процессе свивки [1]. Стабильность натяжения проволоки в канатных машинах обеспечивают специальные тормозные системы, представляющие собой узел стационарного трения, с регулируемым моментом трения. Компенсация нагрузки на проволоку осуществляется регулировкой отклонения рычага-компенсатора. В результате корректировки тормозного момента происходит выравнивание натяжения проволоки.

Стабильность момента трения в узле натяжения зависит от свойств материала тормозных элементов. Тормозные элементы работают в условиях трения без смазочного материала и подвергаются воздействию значительных 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].

Для изготовления тормозных элементов разработаны композиционные материалы на основе бикомпонентных матриц, основной из которых является политетрафторэтилен (ПТФЭ). Повышение основных эксплуатационных свойств композиционных материалов на ПТФЭ матрице достигается путем введения волокнистых и дисперсных наполнителей, в том числе модификаторов различной размерности. При выборе наполнителей и модифицирующих добавок необходимо учитывать, что температура формования изделий из композитов составляет 663 ± 5 К [3–14].

Перспективным направлением в создании композитов является использование в их составах различных веществ, образующихся в результате производственной деятельности. Это позволяет снизить стоимость композитов и частично решить проблему утилизации производственных отходов [15].

В металлургической отрасли в значительном количестве образуются отходы взвешенных частиц отходящих дымовых газов дуговых электросталеплавильных печей. Осажденные частицы имеют достаточно стабильный элементный и фракционный состав. Представляло интерес изучить возможность использования осажденных частиц в качестве термостойких модифицирующих добавок для композитов фрикционного назначения.

Цель работы – исследование влияния взвешенных частиц дымовых газов металлургического производства на триботехнические свойства фрикционных композитов.

Материалы и методы исследования

Модельные фрикционные композиты для узлов стационарного трения изготавливали на основе ПТФЭ марки ПН (ГОСТ 10007-81). В качестве армирующих наполнителей полимерной матрицы использовали супертонкие минеральные волокна (МВ) длиной менее 150 мкм и диаметром не более 3 мкм, в качестве 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, содержащий мелкодисперсный металлический порошок (ТУ 48–21–150–72).

Для приготовления композиций применяли высокоскоростной смеситель вертикального типа с двумя горизонтальными ножами. Образцы для проведения фрикционных исследований изготавливали 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 по заданному температурному режиму. Для фрикционных испытаний были изготовлены две серии образцов с концентрацией модификатора от 2,5 до 20% объема смеси при соотношении компонентов наполнителей от 0,5 до 2. Для сравнения испытывали композит, содержащий металлический порошок с эффективным размером частиц 1 мкм.

Триботехнические испытания композитов проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «вал–частичный вкладыш». Использовали металлическое контртело в виде ролика диаметром 40 мм и шириной 12 мм, изготовленного из стали марки 45. 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 $\vartheta = 1$ м/с. Приработку проводили до достижения фактической площади контакта не менее 90% от контурной площади образца. Температура окружающей среды во время испытаний составляла $T = 20–25$ °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. Стабильность коэффициента трения определяли как отношение его среднего значения к максимальному значению за время испытаний 120 ч. Линейную интенсивность изнашивания определяли по формуле

$$I_h = \frac{m_0 - m_k}{\rho SL},$$

где m_0 – начальная масса образца, г; m_k – масса образца после испытания, г; ρ – плотность материала образца, г/см³; $S = 2$ см² – контурная площадь фрикционного контакта; $L = \vartheta \tau$ – длина пробега при испытании, км (ϑ – скорость скольжения, км/ч; τ – время испытаний, ч).

Исследования морфологии взвешенных частиц проводили на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором Vega II LSH.

Результаты исследования и обсуждение

На основе полученных экспериментальных результатов показано, что осажденные частицы марок С1 и С2 имеют идентичное строение и представляют собой однородную механическую смесь, состоящую преимущественно из сферических частиц размером не более 1 мкм (рис. 1, 2).

На рис. 3–14 представлены зависимости изменения коэффициента трения и линейной интенсивности изнашивания модельных композитов от содержания наполнителей при скорости $\vartheta = 1$ м/с и нагруз-

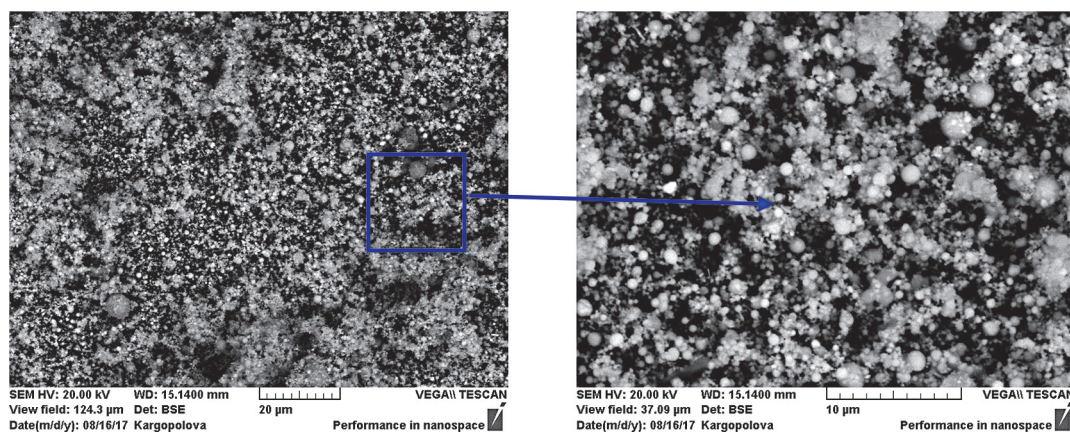


Рис. 1. Микрофотография образцов осажденных частиц дымовых газов С1

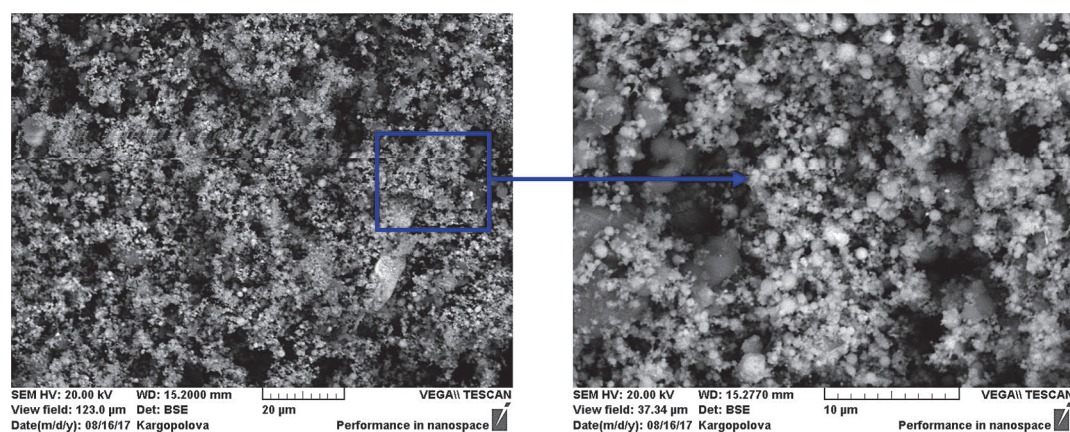


Рис. 2. Микрофотография образцов осажденных частиц дымовых газов С2

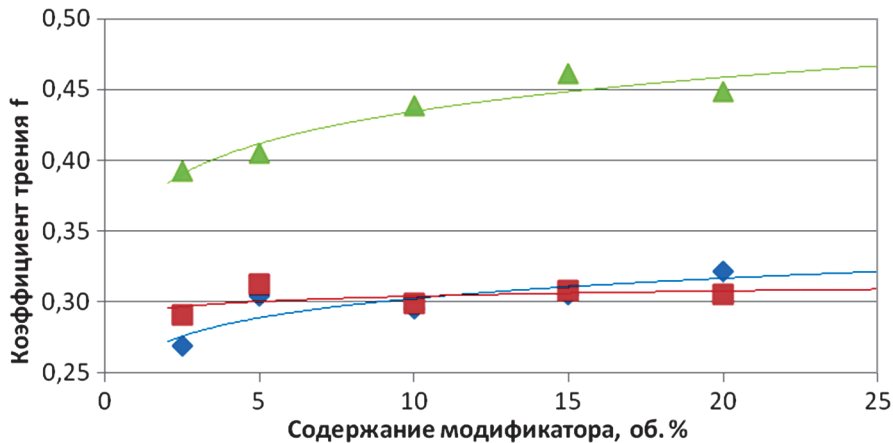


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от объемного содержания наполнителей при $P = 2$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 0,5

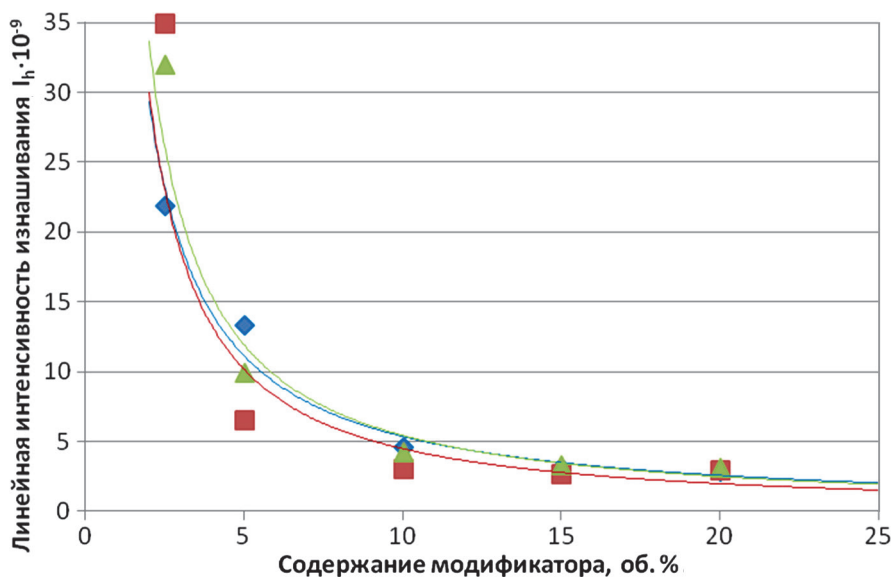


Рис. 4. Зависимость линейной интенсивности изнашивания I_h от объемного содержания наполнителей при $P = 2$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 0,5

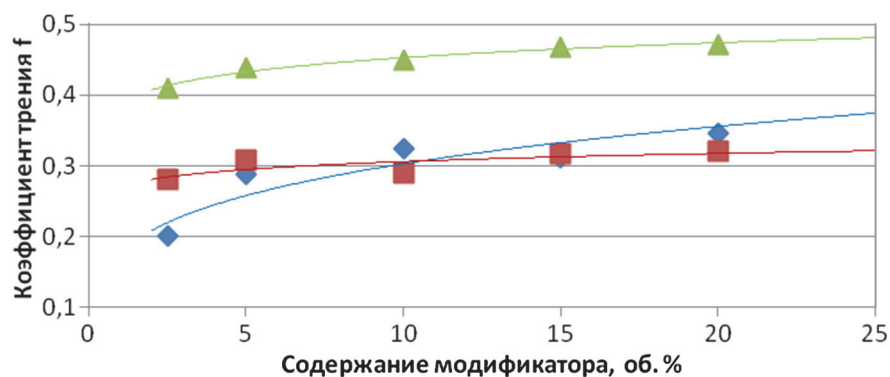


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от объемного содержания наполнителей при $P = 2$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 1

ках $P = 2$ и 4 МПа. Длительность испытаний τ составляла 2 ч. На рисунках композиционный материал, содержащий наполнители минеральное волокно и металлический порошок (МВ/МП), обозначен символом \blacklozenge , композит, содержащий МВ/С1 и МВ/С2 – \blacksquare и \blacktriangle соответственно.

Как видно из рис. 3–14, оптимальная по величине износостойкости и стабильности коэффициента трения концентрация модифицирующей добавки взвешенных частиц составляет от 10 до 15% смеси. При давлении 2 МПа минимальная интенсивность изнашивания достигается при соотношении мине-

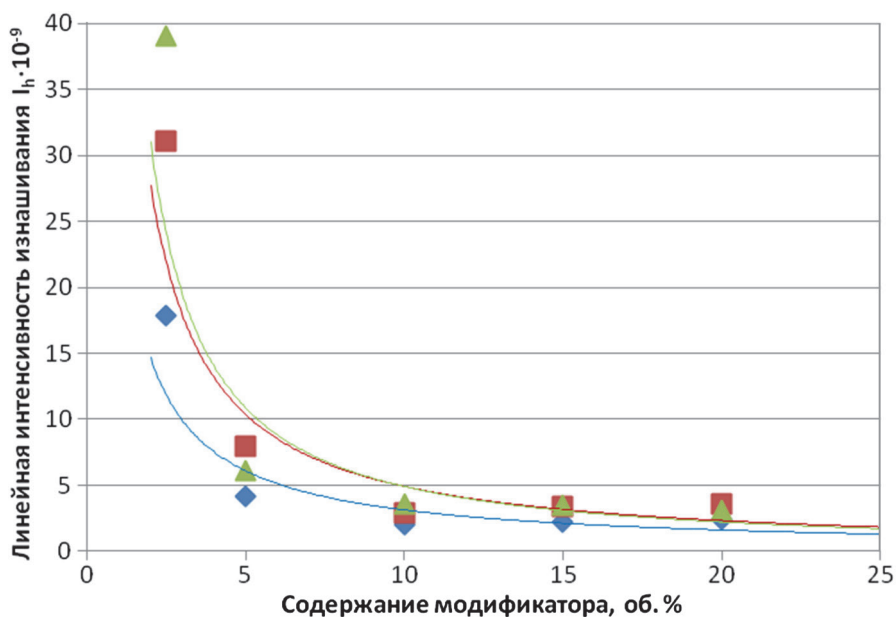


Рис. 6. Зависимость линейной интенсивности изнашивания I_h от объемного содержания наполнителей при $P = 2$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 1

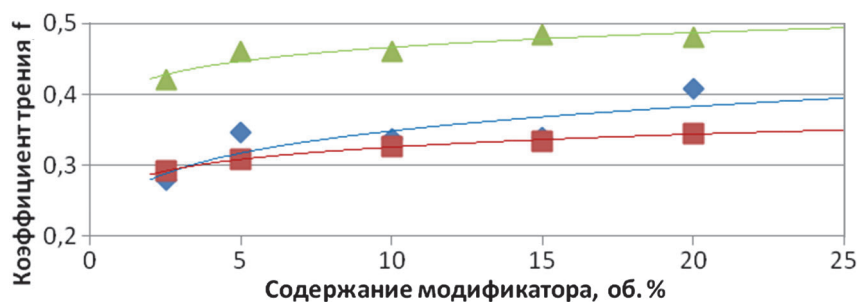


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от объемного содержания наполнителей при $P = 2$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 2

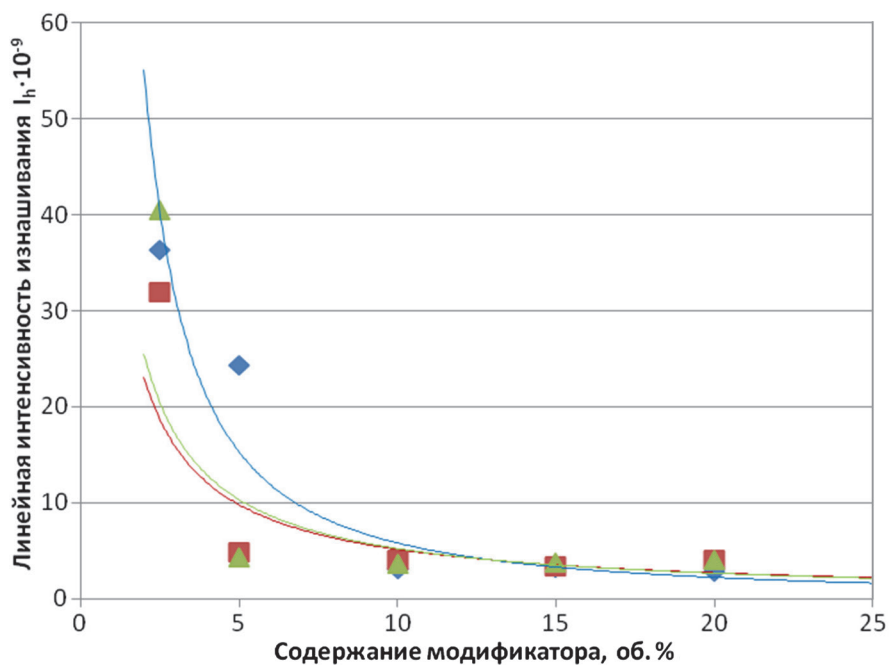


Рис. 8. Зависимость линейной интенсивности изнашивания I_h от объемного содержания наполнителей при $P = 2$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 2

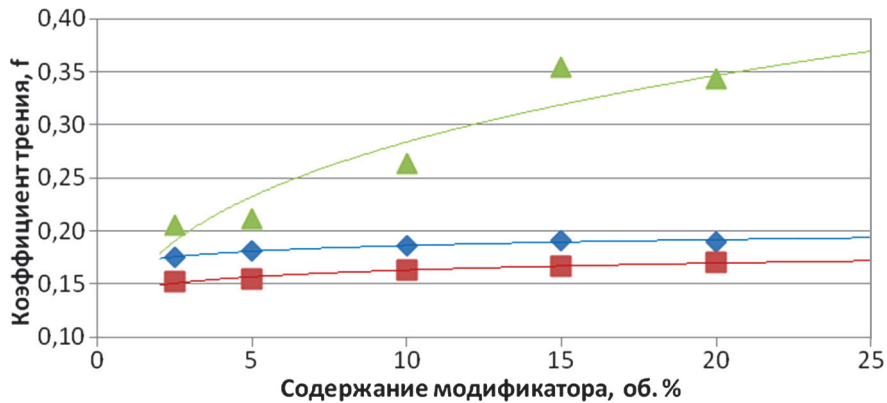


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения от объемного содержания наполнителей при $P = 4$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 0,5

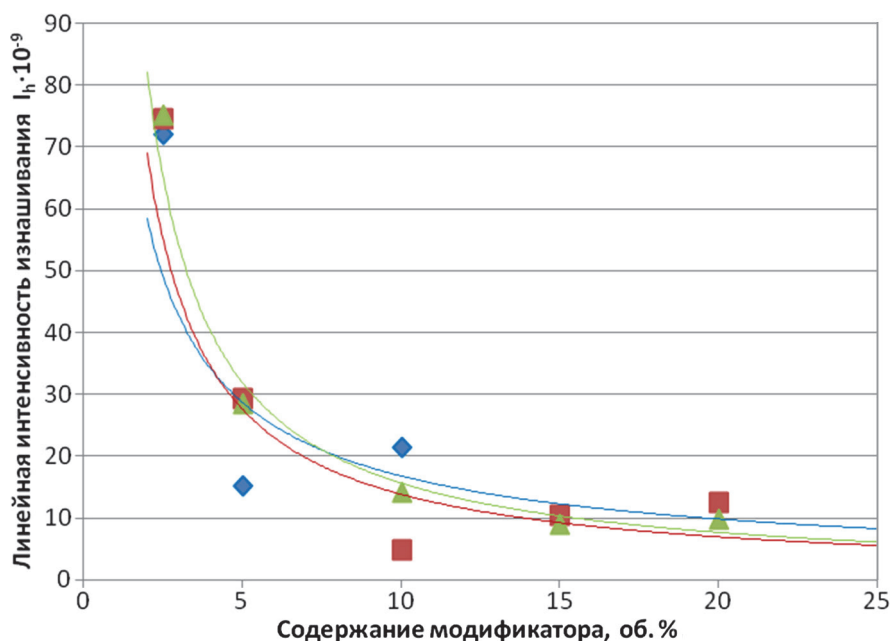


Рис. 10. Зависимость линейной интенсивности изнашивания I_h от объемного содержания наполнителей при $P = 4$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 0,5

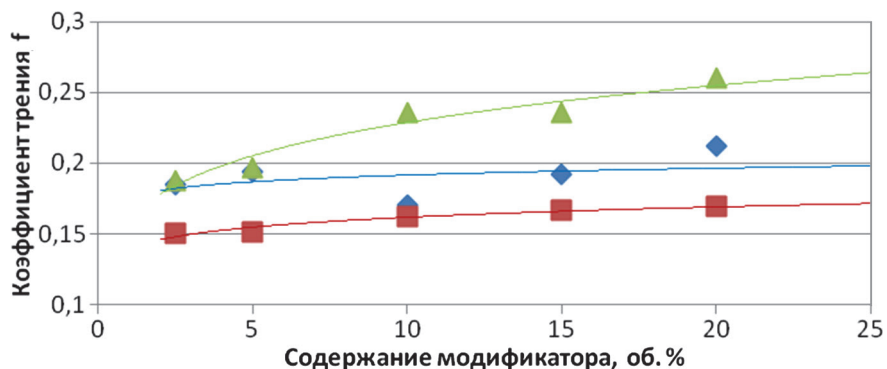


Рис. 11. Зависимость коэффициента трения от объемного содержания наполнителей при $P = 4$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 1

рального волокна и дисперсного наполнителя 0,5. Полученные значения более чем в 500 раз превышают износостойкость ненаполненного матричного полимера ПТФЭ, который используется некоторыми производителями для изготовления деталей фрикционных узлов стационарного трения. Модифицирование композитов осажденными частицами дымовых газов, полученных при выплавке как качественной, так и обыкновенной стали приводит к увеличению коэффициента трения. Коэффициент трения увеличивается до 0,5 при 2 МПа (см. рис. 7) и до 0,35 при 4 МПа (см. рис. 9). Такое существенное влияние модифи-

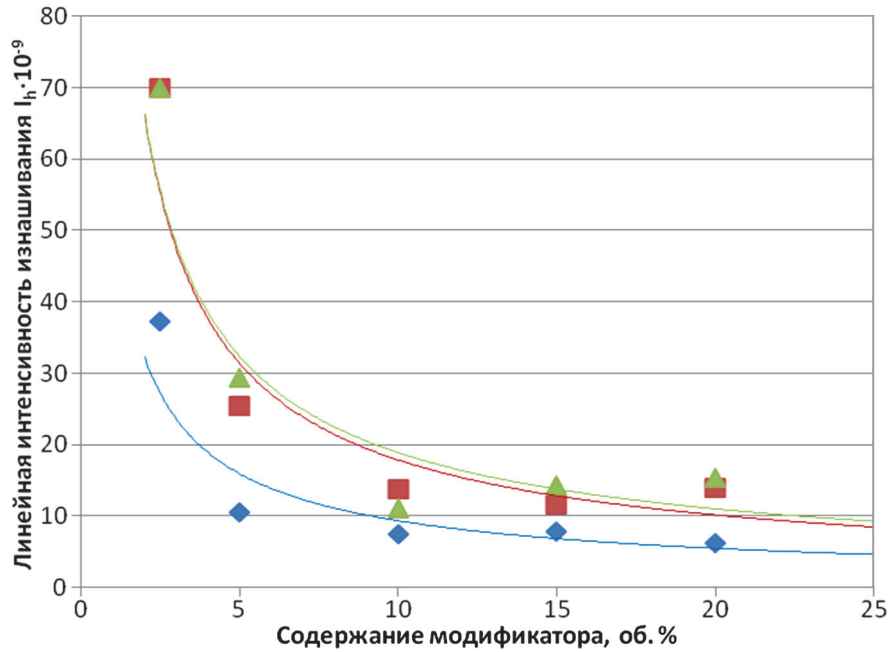


Рис. 12. Зависимость линейной интенсивности изнашивания I_h от объемного содержания наполнителей при $P = 4$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 1

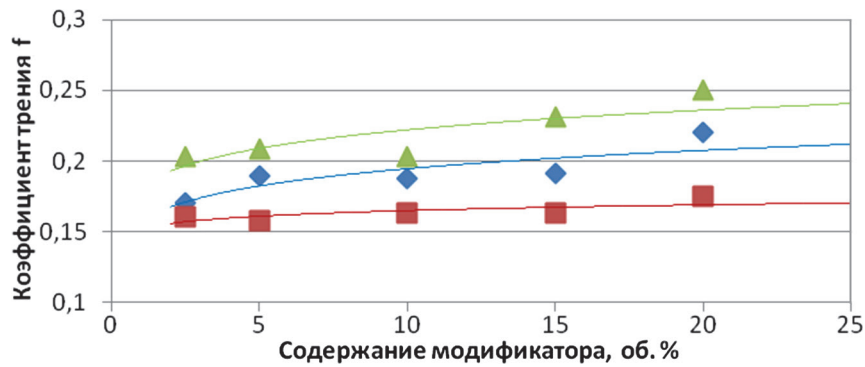


Рис. 13. Зависимость коэффициента трения от объемного содержания наполнителей при $P = 4$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 2

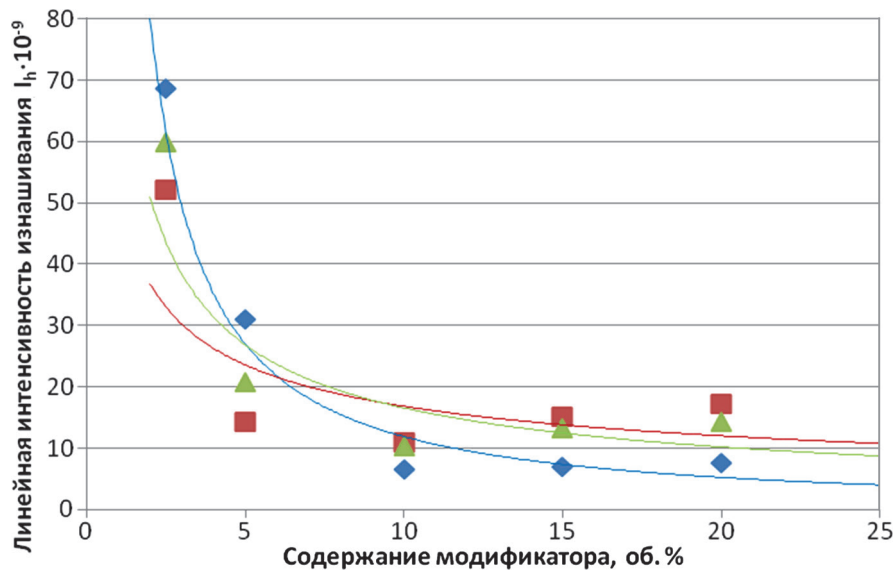


Рис. 14. Зависимость линейной интенсивности изнашивания I_h от объемного содержания наполнителей при $P = 4$ МПа; соотношение компонентов наполнителей 2

цирующих добавок на величину коэффициента трения позволяет рассматривать осажденные частицы как перспективный наполнитель для узлов нестационарного трения. Отличие триботехнических свойств композитов на фторполимерной основе, модифицированных осажденными частицами, полученными при выплавке стали различного сортамента, объясняется различием в их химическом составе, в первую очередь, содержанием оксидов металлов. Композиты, обладающие наилучшей износостойкостью, были подвергнуты длительным фрикционным испытаниям в течение 120 ч. Установлено, что коэффициент стабильности коэффициента трения разработанных композитов составляет 0,96–0,97, что позволяет рассматривать осажденные частицы дымовых газов в качестве перспективного модификатора фрикционных композиционных материалов, используемых в размоточных устройствах канатных машин.

Выводы

Результаты триботехнических испытаний показали, что осажденные частицы дымовых газов, полученные при выплавке качественной стали, могут использоваться в качестве модификаторов трения полимерных композитов триботехнического назначения взамен традиционно применяемых дорогостоящих мелкодисперсных металлических порошков. Применение в качестве модификатора осажденных частиц дымовых газов, полученных при выплавке стали обыкновенного качества, позволяет повысить коэффициент трения, что также при необходимости может быть использовано во фрикционных композициях для узлов нестационарного трения, крупнотоннажно выпускаемых для транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков Б. А., Феоктистов Ю. В., Игнатъев С. Н. Расчеты параметров свивки металлокорда. Мн.: Белоргстанкинпромиздат, 1996, 128 с.
2. Sergienko V. P., Bukharov S. N. Noise and vibration in frictional joints of machines // *Tribology*. 2008. Vol. 1. P. 81.
3. Паншин Ю. А., Малкевич С. Г., Дунаевская Ц. С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 232 с.
4. Пугачев А. К. Переработка фторопластов в изделия. Технология и оборудование. Л.: Химия, 1987. 168 с.
5. Carlos A. Baez. Diversity in PTFE // *IAPD Magazine*. April/May, 2004.
6. Пугачев А. К. Из истории создания отечественных фторполимеров // *Рос. хим. журн.* 2008. Т. LII. № 3. С. 5–6.
7. Охлопкова А. А. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А. А. Охлопкова, А. В. Виноградов, Л. С. Пинчук. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1999. 164 с.
8. Виноградов А. В. Ультрадисперсные тугоплавкие соединения – структурно-активные наполнители кристаллических полимеров / А. В. Виноградов, У. А. Циеленс, О. А. Адрианова // *Механ. композиц. материалы*. 1991. № 3. С. 526–530.
9. Адерица В. Н., Шаповалов В. А., Плескачевский Ю. М. Прочностные свойства, структура и износостойкость композитов ПТФЭ – технический углерод // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 2. С. 160–166.
10. 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. P. 308–315.
11. Сергиенко В. П. Особенности трения и изнашивания фторполимерных композитов, содержащих дисперсные углеродные наполнители / В. П. Сергиенко, В. В. Биран, А. Н. Сенатрев, Т. А. Ахметов // *Композиционные материалы*. 1998. Т. 4. № 1. С. 103–107.
12. Kudina E. F. Nanostructured Organosilicate Composites: Production, Properties, Application / E. F. Kudina, G. G. Pechersky // *Resin Composites: Properties, Production and Application* / New York: Nova Science Publishers, 2011. Ch. 3. P. 101–128.
13. Чегодаев Д. Д., Наумова З. К., Дунаевская Ц. С. Фторопласты. Л.: ГНТИХЛ, 1960, 192 с.
14. Самороков В. Э., Зелинская Е. В. // *Вестн. ИРГТУ Химия и металлургия*. 2012. № 9. С. 201–205.
15. Раскатов В. М., Чуенков В. С., Бессонова Н. Ф., Вейс Д. А. *Машиностроительные материалы: Краткий справ. 3-е изд. перераб. и доп.* М.: Машиностроение, 1980, 511 с.

REFERENCES

1. Birjukov B. A., Feoktistov Ju. 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. Noise and vibration in frictional joints of machines. *Tribology*, 2008, vol. 1, pp. 81.
3. Panshin Ju. A., Malkevich S. G., Dunaevskaja C. S. *Ftoroplasty* [Fluoroplastics]. Leningrad, Himija Publ., 1978, 232 p.
4. Pugachev A. K. *Pererabotka ftoroplastov v izdelija. Tehnologija i oborudovanie* [Processing of fluoroplastics into products. Technology and equipment.]. Leningrad, Himija Publ., 1987, 168 p.
5. Carlos A. Baez. Diversity in PTFE. *IAPD Magazine*. April/May 2004.
6. Pugachev A. K. Iz istorii sozdaniya otechestvennyh ftoropolimerov [From the history of the creation of domestic fluoropolymers]. *Rossijskij himicheskij zhurnal = Russian Chemical Journal*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 5–6.
7. Ohlopkova A. A., Vinogradov A. V., Pinchuk L. S. *Plastiki, napolnennye ul'tradispersnymi neorganicheskimi soedinenijami* [Plastics filled with ultrafine inorganic compounds]. Gomel', IMMS NANB Publ., 1999, 164 p.
8. Vinogradov A. V., Cielens U. A., Adrianova O. A. Ul'tradispersnye tugoplavkie soedinenija – strukturno-aktivnye napolniteli kristallicheskih polimerov [Ultrafine refractory compounds are structurally active fillers of crystalline polymers]. *Mehaniko-kompozicionnye materialy = Mechanical and composite materials*, 1991, no. 3, pp. 526–530.

9. **Aderiha V. N., Shapovalov V. A., Pleskachevskij Ju. M.** Prochnostnye svojstva, struktura i iznosostojkost' kompozitov PTFJe – tehničeskij uglerod [Strength properties, structure and wear resistance of composites PTFE – carbon black]. *Trenie i iznos = Friction and wear*, 2008, Vol. 29, no. 2, pp. 160–166.
10. **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.
11. **Sergienko V. P., Biran V. V., Senatrev A. N., Ahmetov T. A.** Osobennosti trenija i iznashivaniya ftoropolimernih kompozitov, sodержashhih dispersnye uglerodnye napolniteli [Features of friction and wear of fluoropolymer composites containing dispersed carbon fillers]. *Kompozicionnye materialy = Composite materials*, 1998, Vol. 4, no. 1, pp. 103–107.
12. **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.
13. **Chegodaev D. D., Naumova Z. K., Dunaevskaja C. S.** *Ftoroplasty* [Fluoroplastics]. Leningrad, GNTIHL Publ., 1960, 192 p.
14. **Samorokov V. Je., Zelinskaja E. V.** *Vestnik IrGTU, Himija i metallurgija = Bulletin of ISTU, Chemistry and Metallurgy*, 2012, no. 9, pp. 201–205.
15. **Raskatov V. M., Chuenkov V. S., Bessonova N. F., Vejs D. A.** *Mashinostroitel'nye materialy* [Engineering materials]. *Kratkij spravocnik = Quick Reference*, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 511 p.