

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-76-87

Влияние добавки железа на структуру и свойства фрикционного порошкового материала на основе меди, работающего в условиях трения со смазкой

© 2022 г. А.Ф. Ильющенко¹, А.В. Лешок¹, Л.Н. Дьячкова¹, В.П. Бирюков²

¹ Институт порошковой металлургии (ИПМ) им. акад. О.В. Романа НАН Беларуси, г. Минск, Респ. Беларусь

² Институт машиноведения (ИМАШ) им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 16.09.21 г., доработана 14.12.21 г., подписана в печать 16.12.21 г.

Аннотация: Машины и механизмы содержат отвечающие за их движение и остановку узлы, использующие фрикционные материалы. К таким узлам относятся маслоохлаждаемые тормоза, гидромеханические коробки передач, муфты. В них применяются преимущественно фрикционные материалы на основе меди, обеспечивающие высокие значения коэффициента трения и износостойкости. Таким материалам присущ эффективный теплоотвод, так как в указанных зонах за незначительный промежуток времени выделяется большое количество тепла. В работе представлены результаты исследований влияния введения железа во фрикционный порошковый материал на основе бронзы БрО6 и БрО12 на его структуру, механические и триботехнические свойства. Показано, что введение железа способствует повышению коэффициента трения фрикционного материала на основе БрО6 с 0,034 до 0,055, а на основе БрО12 – с 0,042 до 0,073. Определено, что предел прочности при сжатии фрикционного материала на основе БрО12 без добавки железа составляет 340 МПа, при введении 10 об.% Fe – 310 МПа, а при 50 об.% Fe – 180 МПа. Это объясняется тем, что при содержании железа более 30 об.% структура материала из каркасной переходит в матричную, температура спекания которой выше температуры, применяемой в работе для спекания фрикционного материала. Установлено, что для фрикционного материала на основе БрО6 в медной фазе имеются как округлые, так и вытянутые включения размером до 2,5 мкм с содержанием в них железа 30–50 %. В материале на основе БрО12 наблюдается большее количество включений железа в медной фазе – их размер более значителен, длина достигает 20 мкм, а содержание железа в них составляет 49–73 %.

Ключевые слова: фрикционный порошковый материал на основе оловянистой бронзы, добавка железа, структура, прочность, коэффициент трения, износ.

Ильющенко А.Ф. – докт. техн. наук, проф., акад. НАН Беларуси, директор Института порошковой металлургии (ИПМ) им. акад. О.В. Романа НАНБ (220005, Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41). E-mail: alexil@mail.belpak.by.

Лешок А.В. – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. ИПМ НАНБ. E-mail: sdilav@tut.by.

Дьячкова Л.Н. – докт. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр., зав. лабораторией ИПМ НАНБ. E-mail: dyachkova@tut.by.

Бирюков В.П. – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. лаборатории «Физические методы упрочнения поверхностей трения» ИМАШ РАН (101000, г. Москва, М. Харитоньевский пер., 4). E-mail: laser-52@yandex.ru.

Для цитирования: Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н., Бирюков В.П. Влияние добавки железа на структуру и свойства фрикционного порошкового материала на основе меди, работающего в условиях трения со смазкой. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2022. Т. 16. № 1. С. 76–87. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-76-87.

Effect of iron addition on the structure and properties of copper-based friction powder material used under friction conditions with lubrication

A.Ph. Ilyushchanka¹, A.V. Liashok¹, L.N. Dyachkova¹, V.P. Biryukov²

¹ Institute of Powder Metallurgy (IPM) n.a. acad. O.V. Roman of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

² Institute of Mechanical Engineering n.a. A.A. Blagonravov of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Received 16.09.2021, revised 14.12.2021, accepted for publication 16.12.2021

Abstract: Machines and mechanisms contain units responsible for their movement and stopping, and such units use friction materials. These units include oil-cooled brakes, hydromechanical transmissions, and clutches. They use mainly copper-

based friction materials providing the high coefficient of friction and wear resistance. These materials feature by effective heat dissipation since a large amount of heat is released in these areas for a short period of time. The paper presents the results of studies into the effect of iron addition into a frictional powder material based on BrO6 and BrO12 bronze on its structure, mechanical and tribotechnical properties. It was shown that the introduction of iron contributes to an increase in the coefficient of friction from 0.034 to 0.055 for the BrO6-based friction material and from 0.042 to 0.073 for the BrO12-based friction material. It was determined that the ultimate compression strength of the BrO12-based friction material is 340 MPa without iron addition, 310 MPa at 10 vol.% of iron, and 180 MPa at 50 vol.% of iron. This is due to the fact that the iron content of more than 30 vol.% results in the change of the frame structure of the material to the matrix one having a sintering temperature higher than the temperature used in the paper for friction material sintering. It was found that for the BrO6-based friction material there are both rounded and elongated inclusions in the copper phase up to 2.5 μm in size with the iron content of 30–50 %. In the BrO12-based material there are more iron inclusions in the copper phase and their size are much larger, the length of inclusions reaches 20 μm , and the iron content in them is 49–73 %.

Keywords: friction powder material based on tin bronze, iron addition, structure, strength, coefficient of friction, wear.

Ilyushchanka A.Ph. – Dr. Sci. (Eng.), prof., academician of National Academy of Sciences of Belarus (NASB), director of the Institute of Powder Metallurgy (IPM) n.a. acad. O.V. Roman of NASB (220005, Belarus, Minsk, Platonova str., 41). E-mail: alexil@mail.belpak.by.

Liashok A.V. – Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of IPM NASB. E-mail: sdilav@tut.by.

Dyachkova L.N. – Dr. Sci. (Eng.), associate prof., leading researcher, head of Laboratory of IPM NASB. E-mail: dyachkova@tut.by.

Biryukov V.P. – Cand. Sci. (Eng.), leading researcher of the Laboratory «Physical methods of friction surface hardening» of the Institute of Mechanical Engineering n.a. A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (101000, Russia, Moscow, Malyi Khariton'evskii per., 4). E-mail: laser-52@yandex.ru.

For citation: Ilyushchanka A.Ph., Liashok A.V., Dyachkova L.N., Biryukov V.P. Effect of iron addition on the structure and properties of copper-based friction powder material used under friction conditions with lubrication. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 1. P. 76–87 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-76-87.

Введение

Фрикционные узлы в машинах и механизмах отвечают за их движение и остановку. Такими узлами являются маслоохлаждаемые тормоза, гидромеханические коробки передач, муфты. Работают они преимущественно в условиях трения со смазкой, а необходимые функции им обеспечивают фрикционные материалы, из которых они изготавливаются. Наличие смазки приводит к снижению коэффициента трения и повышению износостойкости, тем самым увеличивая ресурс работы узла [1, 2].

Фрикционные материалы используются в узлах трения в виде сегментов для узлов сухого трения и в виде дисков для узлов, работающих со смазкой. В работе [3] приведены способы получения дисков и показано, что наиболее перспективным с точки зрения производительности, возможности варьирования свойств и получения дисков большого диаметра является способ, в котором фрикционный слой получают методом свободной насыпки материала с последующим предварительным его спеканием, уплотнением и окончательным спеканием с целью получения требуемой пористости и структуры.

Наиболее широко для работы в условиях трения со смазкой применяются фрикционные порошковые материалы на основе оловянистой бронзы. Они обладают высокой износостойкостью, теплопроводностью, коррозионной стойкостью [4, 5], однако в процессе эксплуатации не обеспечивают высокое и стабильное значение коэффициента трения, что необходимо для эффективной и стабильной работы фрикционного узла. Улучшение свойств возможно за счет создания гетерогенной структуры путем использования добавок различного состава.

Основной добавкой является порошок природного или искусственного графита различной дисперсности и строения в количестве 25–55 об.%. Графит существенно влияет на коэффициент трения порошковой бронзы, его стабильность и стойкость к формированию задира [6–8].

Для повышения коэффициента трения вводят добавки с твердостью, существенно превышающей твердость металлической основы, — порошки оксидов, карбидов, боридов различного гранулометрического состава [9–12].

Керамические порошки, в зависимости от твердости, оказывают различное влияние на механизм

контактного взаимодействия. Авторы работы [13] показали, что использованная в составе фрикционного материала добавка карбида кремния обеспечивает высокое значение коэффициента трения (до 0,65 при работе без смазки). А введение добавки SiO_2 , по данным [14], позволяет повысить значение коэффициента трения и износостойкость материала на основе меди.

Кроме твердых керамических добавок, в составе фрикционного материала могут применяться добавки, способные образовывать карбиды в процессе спекания. Авторы [15, 16] показали, что добавки титана и железохромистого сплава ПХ-30 в процессе спекания фрикционного медно-графитового материала образуют карбиды титана или хрома, благодаря чему повышается коэффициент трения фрикционного материала, работающего в условиях смазки, до 0,05—0,07.

Введение порошка железа оказывает положительное влияние на физико-механические и триботехнические свойства антифрикционных мате-

риалов на медной основе. Согласно [17], при этом можно повысить нагрузку на материал, рабочую температуру и давление на контактной поверхности [18], прочность, износостойкость и трещиностойкость [19].

Автор работы [20] отмечает, что добавка железа в количестве 4—6 % повышает износостойкость фрикционного материала на основе меди, а в случае использования 6—8 % Fe износостойкость снижается, однако этот эффект не объясняется.

Цель работы — исследование влияния добавки железа на структуру и свойства порошкового фрикционного материала на основе оловянистой бронзы с 6 и 12 % олова, работающего в условиях трения со смазкой.

Методика исследований

Объектом исследования служил фрикционный материал на основе оловянистой бронзы с 6 и 12 мас.% олова с добавкой 30 об.% порошка графита

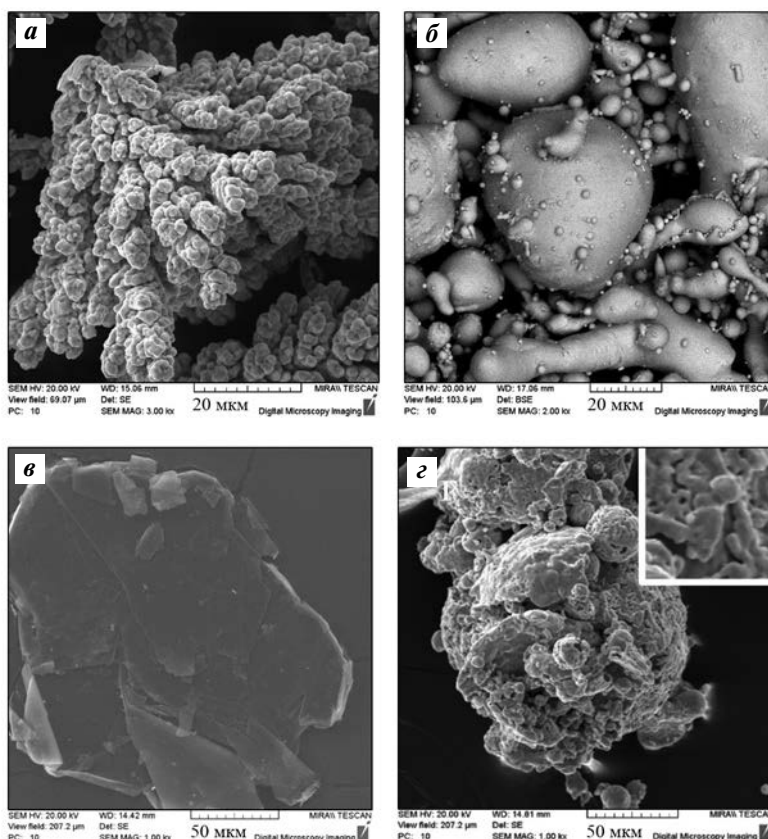


Рис. 1. Форма частиц исходных порошков, используемых для получения фрикционного материала
а — ПМС-1; б — ПО-1; в — ГЭ-1; з — ПЖРВ 3.200

Fig. 1. Particle shape of initial powders used for friction material production
а — PMS-1; б — PO-1; в — GE-1; з — PZhrV 3.200

та элементного (ГОСТ 7478-75). Железо вводили в виде порошка марки ПЖРВ 3.200 в количестве 10—40 об.% с интервалом варьирования 5 %.

Шихту материала получали смешиванием порошков меди марки ПМС-1 (средний размер частиц 80 мкм, рис. 1, а), олова марки ПО-1 ($d = 30$ мкм, рис. 1, б), графита марки ГЭ-1 (с частицами чешуйчатой формы диаметром 100 мкм и толщиной 30—70 мкм, рис. 1, в) и железа марки ПЖРВ 3.200 ($d = 100$ мкм, рис. 1, г) в лопастном смесителе в течение 45 мин.

Для испытаний свойств фрикционных материалов изготавливали образцы дисков по следующей схеме:

- нанесение методом свободной насыпки смеси исходных порошков на поверхность диска из стали 65Г с помощью специальной технологической оснастки;

- предварительное спекание в защитно-восстановительной атмосфере диссоциированного аммиака при температуре 840 °С в течение 50 мин;

- чеканка заготовки фрикционного диска на механическом прессе пуансоном, имеющим профиль в виде сетки, для формования маслоотводящих каналов и пазов и получения необходимой пористости 12—18 % [21];

- спекание под давлением 0,1 МПа при температуре 840 °С в течение 3 ч в атмосфере диссоциированного аммиака.

Полученный образец фрикционного диска представлен на рис. 2.

Исследование триботехнических свойств образцов фрикционного диска проводили на машине трения ИМ-58 (ООО «НПО Точприбор»,

г. Санкт-Петербург) по следующим режимам: начальная скорость торможения — 10 м/с; удельная нагрузка — 4,0 МПа; момент инерции маховых масс — 0,56 Н·м·с²; работа трения — 27,5 кДж. В качестве контртела использовали диск из стали 65Г с твердостью 260—320 НВ, шероховатостью рабочей поверхности $R_a = 0,7 \pm 0,8$ и размерами, идентичными размерам фрикционного слоя.

Изучение структуры осуществляли с помощью оптического микроскопа МЕФ-3 (Австрия) и сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения MIRA (Tescan, Чехия), который применялся также для исследования морфологии поверхности трения. Микрорентгеноспектральный анализ (MPCA) проводили с помощью приставки INCA 350 (Oxford Instruments, Великобритания), фазовый состав — на рентгеновском дифрактометре «Ultima IV» (Rigaku, Япония) в $\text{CuK}\alpha$ -излучении.

Результаты и их обсуждение

Структура фрикционного материала

Металлографический анализ показал, что формирование структуры при введении железа зависит от содержания олова в медной основе, железо влияет также на степень однородности медной фазы по олову. Если в материале на основе БрОб без добавки железа содержание олова в медной фазе составляет 5,8—6,9 % (табл. к рис. 3, а), а в случае БрО12 — 12,5—13,1 % (табл. к рис. 3, б), то при введении железа доля олова составляет соответственно 6,4—8,8 % (табл. к рис. 3, в) и 12,8—14,2 % (табл. к рис. 3, г). Отмечается также перераспределение олова в медной фазе: в местах с повышенным содержанием железа количество олова меньше (см. табл. к рис. 3, в и г). Это объясняется замедлением диффузии олова в медь при введении железа.

При содержании олова 6 мас.% частицы железа в материале преимущественно обособлены, внутри их сохраняется пористость, характерная для исходного порошка железа, имеющего губчатую форму (рис. 3, в). В материале с 12 мас.% Sn температура плавления медной основы ниже, чем с 6 % Sn, соответственно скорость диффузии выше и железо диффундирует в медную основу на большую глубину (рис. 3, г). Содержание меди в железной фазе при этом составляет 2—3 %, а в медной основе железо находится в пределах 1,5—2,0 %. При большем содержании добавки количество включений железа в медной фазе выше. Такое же явление наблюдали авторы [22].



Рис. 2. Образец фрикционного диска для проведения испытаний

Fig. 2. Friction disk sample for tests

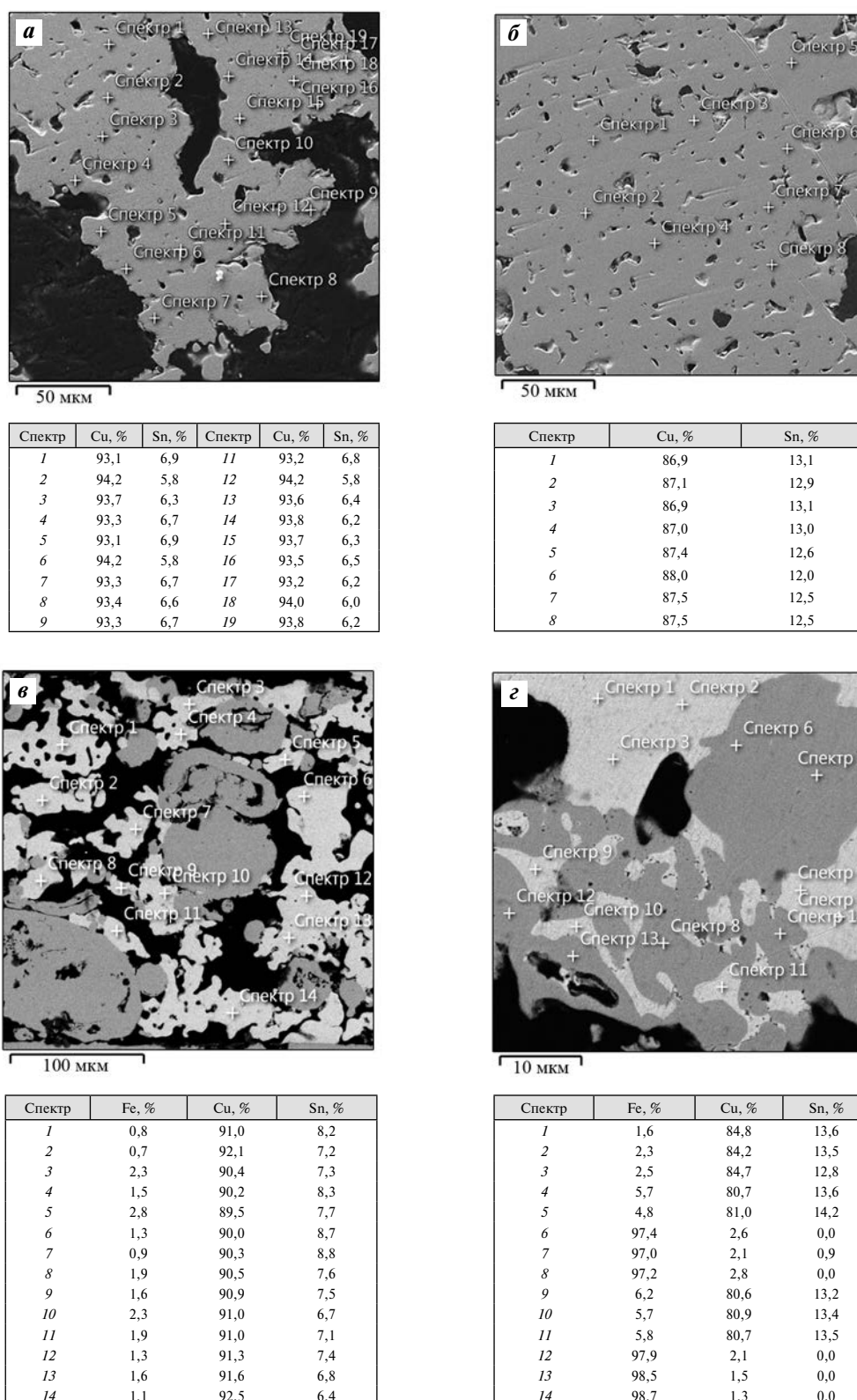


Рис. 3. Распределение олова во фрикционном материале на основе бронзы

а, б – без добавки железа; **в, г** – 30 об.% Fe; **а, в** – BrO6; **б, г** – BrO12

Fig. 3. Tin distribution in bronze-based friction material

а, б – without iron addition; **в, г** – 30 vol.% Fe; **а, в** – BrO6; **б, г** – BrO12

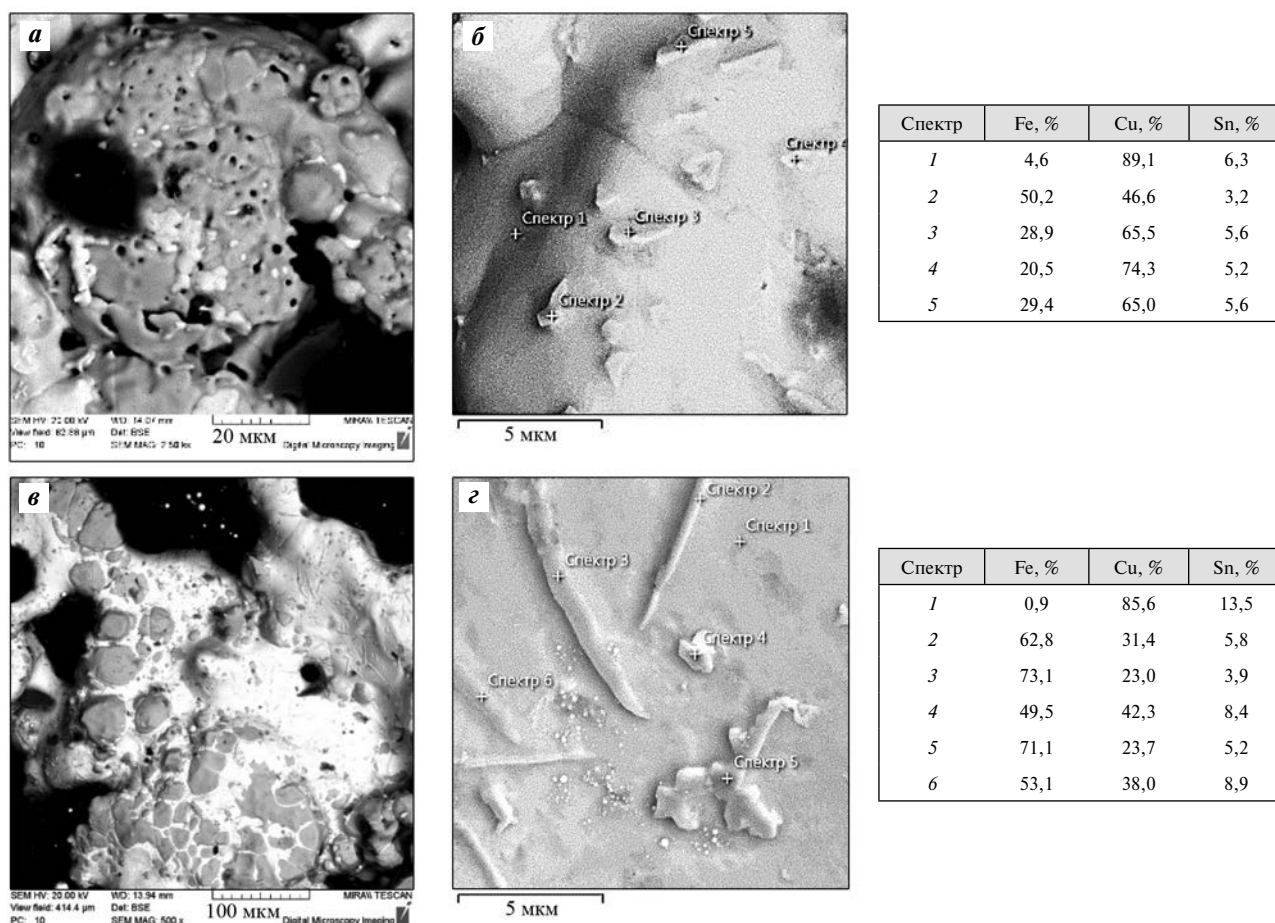


Рис. 4. Фрактограммы изломов фрикционного слоя диска из материала на основе бронзы с 40 об.% железа
а, б – BrO6; в, г – BrO12; а, в – структура; б, г – точечный анализ

Fig. 4. XRD patterns of friction layer fractures for a disk made of bronze-based material with 40 vol.% of iron
а, б – BrO6; в, г – BrO12; а, в – structure; б, г – spot analysis

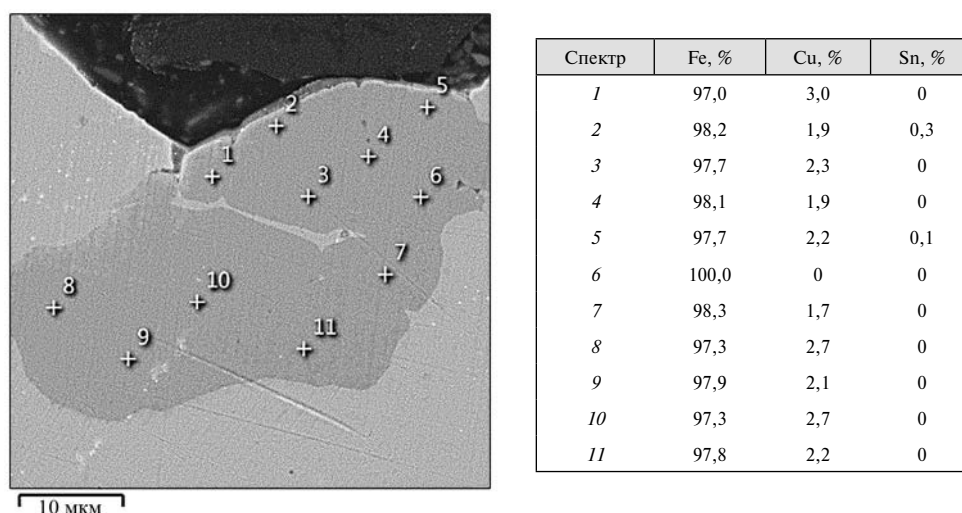


Рис. 5. Точечный анализ железного включения в медной фазе фрикционного материала на основе BrO12 с добавкой 40 об.% железа

Fig. 5. Spot analysis of iron inclusion in the copper phase of BrO12-based friction material with 40 vol.% of iron added

Железо оказывает влияние и на степень однородности медной фазы по олову. Если без добавки железа в материале на основе БрО6 содержание олова в медной фазе изменяется от 5,8 до 6,9 % (табл. к рис. 3, а), а в случае БрО12 — от 12,5 до 13,1 % (табл. к рис. 3, б), то при введении железа изменение содержания олова составляет соответственно 6,4–8,8 % (табл. к рис. 3, в) и 12,8–14,2 % (табл. к рис. 3, г). Это объясняется замедлением диффузии олова в медь при введении железа.

Исследование фрактограмм разрушения фрикционного материала на основе БрО6 выявило, что в медной фазе имеются как округлые, так и вытянутые включения размером до 2,5 мкм (рис. 4, а). Вследствие незначительной толщины включений корректно определить их состав не представляется возможным, но, по данным МРСА, содержание железа в них составляет 30–50 %.

В материале на основе БрО12 количество включений железа в медной фазе и их размер значительно больше (рис. 4, б). Длина включений достигает 20 мкм, а содержание железа в них составляет 49–73 %.

Включения железа неоднородны по составу. На границе с медной фазой в них содержится до 3,0 % меди и 0,3 % олова, в центре — до 2 % меди, а олово отсутствует (рис. 5).

Свойства фрикционного материала

Увеличение содержания железа приводит к снижению прочности фрикционного материала (рис. 6). Так, предел прочности при сжатии фрикционного материала на основе БрО12 без добавки

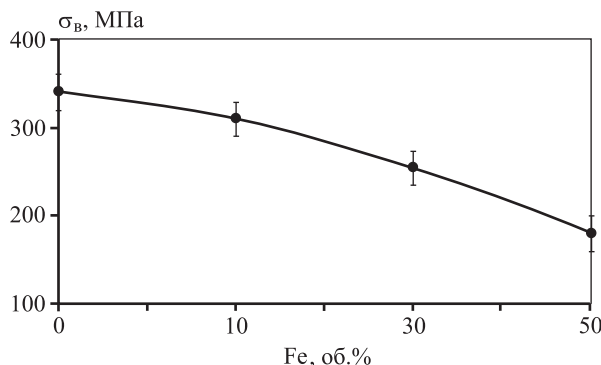


Рис. 6. Влияние содержания железа на предел прочности при сжатии фрикционного материала на основе БрО12

Fig. 6. Effect of iron content on strength limit at BrO12-based friction material compression

железа составляет 340 МПа, при введении 10 об.% Fe — 310 МПа, а при 50 об.% Fe — 180 МПа. Это объясняется тем, что при наличии более 30 об.% железа структура материала из каркасной переходит в матричную, температура спекания которой выше температуры, применяемой в работе для спекания фрикционного материала. Этот эффект приводит к снижению не только прочности фрикционного материала, но и износостойкости, так как при трении меняется характер износа, что будет показано далее.

Введение железа влияет и на триботехнические свойства фрикционного материала (рис. 7). Коэффициент трения фрикционного материала на основе БрО12 с увеличением содержания железа от 10 до 50 об.% возрастает с 0,042 до 0,073, на основе БрО6 — с 0,034 (10 об.% Fe) до 0,055 (40 об.% Fe). Снижение износостойкости материала на основе бронзы происходит при повышении содержания железа, независимо от количества

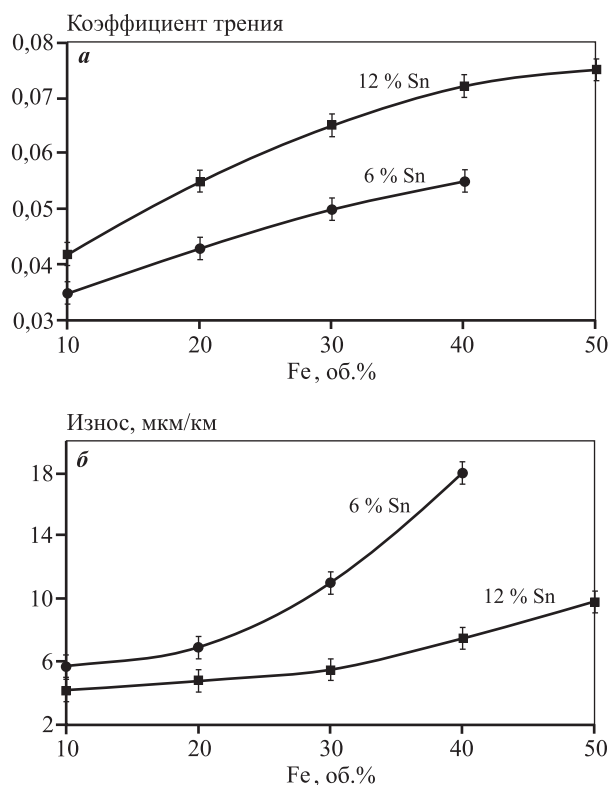


Рис. 7. Влияние содержания железа на коэффициент трения (а) и износ (б) фрикционного материала на основе БрО6 и БрО12

Fig. 7. Effect of iron content on the coefficient of friction (а) and wear (б) of BrO6- and BrO12-based friction material

олова в медной основе. Особенно значительный рост износа наблюдается в материале на основе БрО6. Так, при увеличении доли железа с 20 до 40 об.% износ возрастает с 2 до 6 мкм/км в материале на основе БрО12 и с 6 до 18 мкм/км (практически в 3 раза) в материале на основе БрО6. При 50 об.% железа износ материала на основе БрО12 составил 8 мкм/км, а на основе БрО6 — более 25 мкм/км, т.е. наблюдался катастрофический износ. Это обусловлено, как и в случае прочности, структурой материала — отсутствием прочного межчастичного контакта.

При введении железа во фрикционный материал на основе оловянистой бронзы меняются характер зависимости коэффициента трения от времени фрикционного контакта и механизм изнашивания фрикционного материала и контртела.

В материале без добавки железа в начальный момент фрикционного контакта наблюдается резкое увеличение коэффициента трения, а затем стремительное его снижение (рис. 8, кр. 1), а в случае введения 30 об.% Fe происходит плавное снижение этого показателя (рис. 8, кр. 2). Данный эффект выявляет преимущества материала с добавкой железа, так как обеспечивается плавность работы узла трения, поскольку исключается формирование динамических нагрузок в момент

замыкания и фрикционного контакта и устанавливается стабильность значения коэффициента трения во всем интервале процесса фрикционного взаимодействия.

Колебания коэффициента трения, наблюдаемые на кривых 1 и 2 на рис. 8, вызваны особенностями используемого тензометрического датчика давления и создаваемыми возмущениями в процессе работы стенда. Разница в амплитудах колебания кривых 1 и 2 находится в пределах погрешности измерительного датчика.

Особенности изнашивания

Исследование поверхности износа исследуемых материалов показало, что характер износа медной фазы во фрикционном материале при введении железа в количестве менее 30 об.% не изменяется, имеет место адгезионный износ (рис. 9). Повышенный износ при увеличении добавки железа более 30 об.% объясняется эффектом не только адгезионного характера износа, но и абразивного, возникающего вследствие выкрашивания частиц железа, недостаточно спеченных и не имеющих прочного межчастичного контакта с медной основой, что и подтвердило нецелесообразность введения железа во фрикционный материал в количестве более 30 об.%. Кроме того, в этом случае наблюдается и повышенный износ контртела.

На поверхности контртела, работающего в паре с материалом без добавки железа, отмечается образование зон с различной морфологией. Области на наружном и внутреннем диаметрах поверхности контртела имеют одинаковую морфологию, характерную для абразивного и адгезионного изнашиваний (рис. 10, а, поз. 1). В центральной части контртела (рис. 10, а, поз. 2) характер изнашивания существенно отличается — формируются нанодисперсная пористость и лакуны, являющиеся дополнительными объемами для смазки, что характерно для изнашивания высокоизносостойких материалов [20, 23].

Введение железа более 30 об.% приводит к преобладанию структурных элементов, характерных для абразивного изнашивания (рис. 10, б).

Микрорентгеноспектральный анализ поверхности трения контртела, работающего в паре с фрикционным материалом с добавкой 40 об.% Fe, выявил отсутствие следов переноса меди и олова из фрикционного материала (рис. 11).

В работе [22] показано, что при работе в паре с

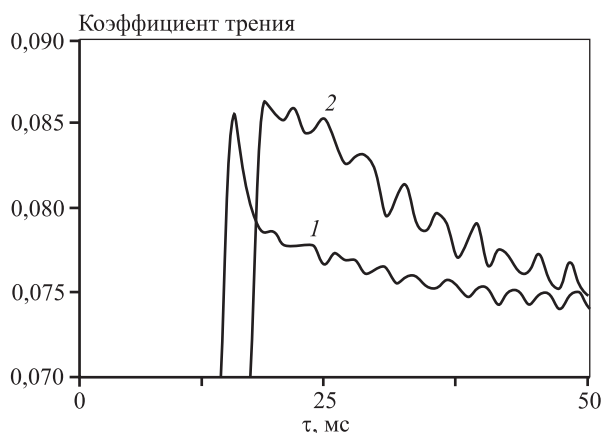


Рис. 8. Влияние введения железа во фрикционный материал на основе БрО12 на характер изменения коэффициента трения во времени в начальный момент фрикционного контакта

1 — без добавки железа; 2 — 30 об.% Fe

Fig. 8. Effect of iron addition to BrO12-based friction material on the coefficient of friction behavior in time at the beginning of frictional contact

1 — without iron addition; 2 — 30 vol.% Fe

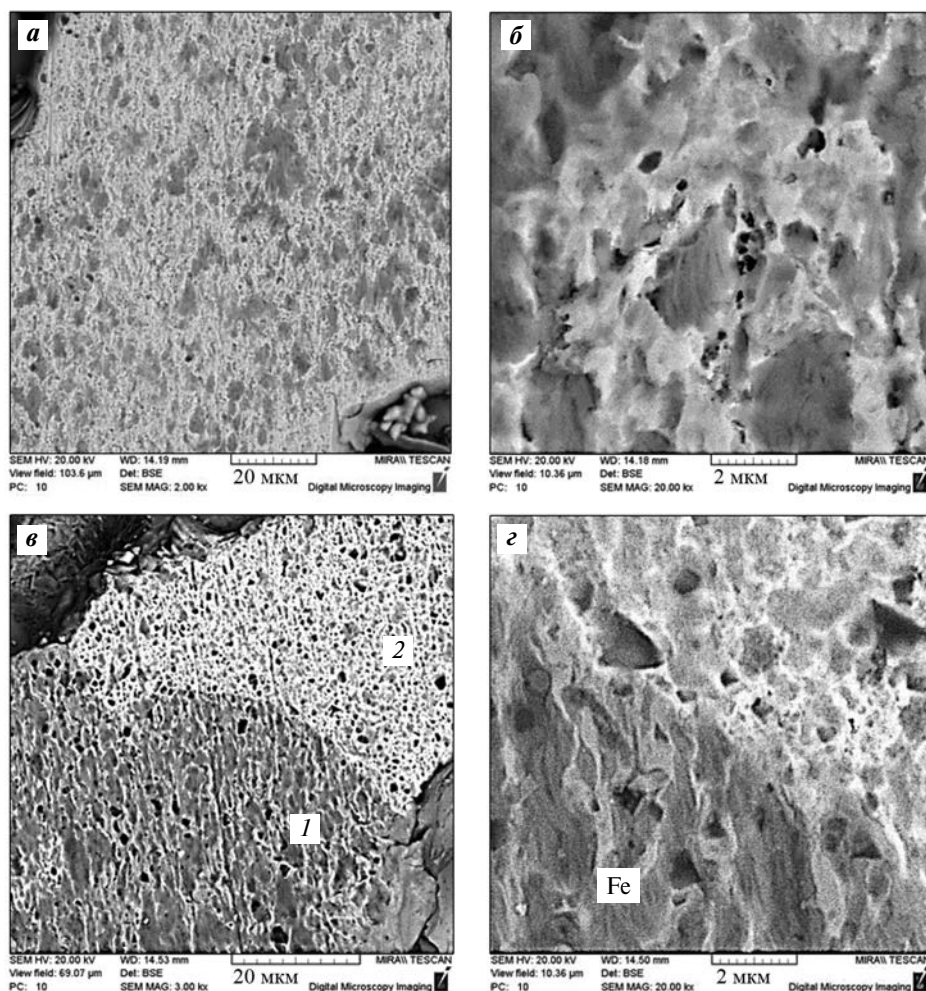


Рис. 9. Морфология поверхности трения фрикционного материала на основе BrO12

a, б — без добавки железа; *в, з* — 30 об.% Fe

1 — область с повышенным содержанием железа, граничащая с железной частицей; *2* — область бронзы BrO12

a, в — увеличение 3000 $\times$; *б, з* — 20000 $\times$

Fig. 9. Friction surface morphology of BrO12-based friction material

a, б — without iron addition; *в, з* — 30 vol.% Fe

1 — area with increased iron content adjacent to iron particle; *2* — BrO12 bronze area

a, в — 3000 $\times$ magnification; *б, з* — 20000 $\times$ magnification

фрикционным материалом на основе бронзы без добавки железа на контртело переносится слой меди и олова.

Наличие слоя меди и олова на контртеле приводит к увеличению количества участков схватывания, а следовательно, к снижению износостойкости фрикционного материала и повышению давления на фрикционную пару до момента заклинивания. Так, введение 20 об.% Fe во фрикционный материал на основе BrO12 с 30 об.% графита ГЭ-1 позволило увеличить давление заедания в 1,2 раза (рис. 12).

Закключение

В результате проведенных исследований влияния добавки железа на структуру и свойства порошкового фрикционного материала на основе оловянистой бронзы с 6 и 12 % олова, работающего в условиях трения со смазкой, установлено, что введение железа влияет на однородность распределения олова в медной фазе. Так, при содержании олова 6 мас.% его доля в медной фазе изменяется от 5,8—6,9 % без железа до 6,4—8,8 % при его введении, а при 12 мас.% Sn — соответственно

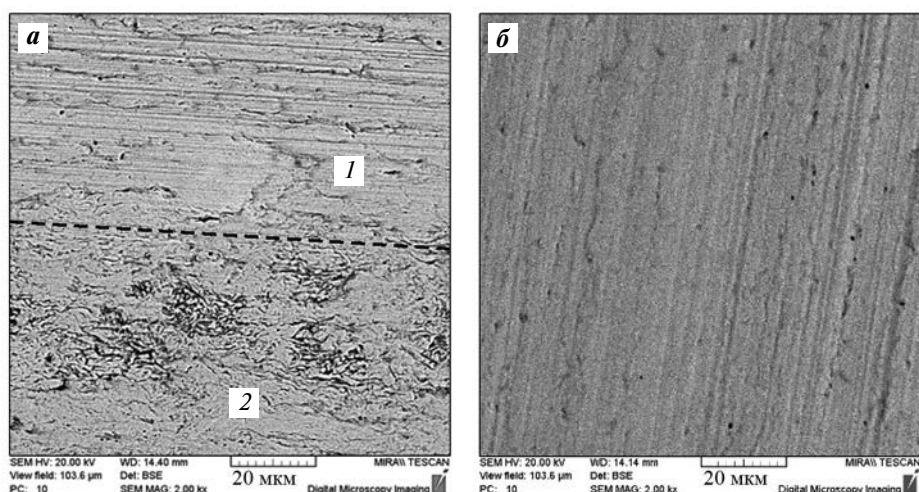


Рис. 10. Морфология поверхности износа контртела, работающего с фрикционным материалом на основе BrO12

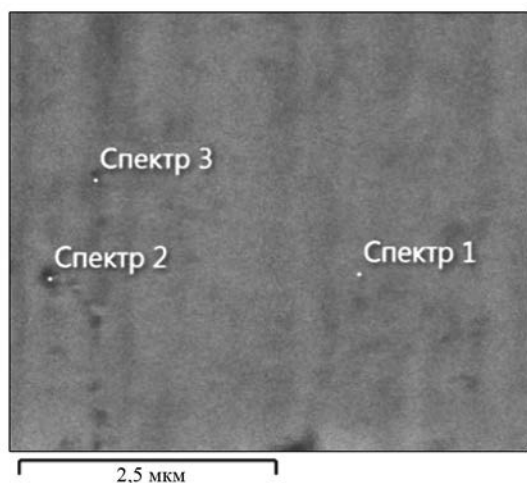
a – без добавки железа; *б* – 40 об.% Fe

1 – зона абразивного изнашивания; *2* – зона адгезионного изнашивания

Fig. 10. Wear surface morphology of the counterbody running in contact with BrO12-based friction material

a – without iron addition; *б* – 40 vol.% Fe

1 – abrasive wear area; *2* – adhesion wear area



Спектр	C, %	Fe, %
1	17,7	82,3
2	20,3	79,7
3	11,5	88,5

Рис. 11. Микрорентгеноспектральный анализ поверхности износа контртела, работающего с фрикционным материалом на основе BrO12 с добавкой 30 об.% Fe

Fig. 11. Electron microprobe analysis of the wear surface of the counterbody running in contact with BrO12-based friction material with 30 vol.% Fe addition

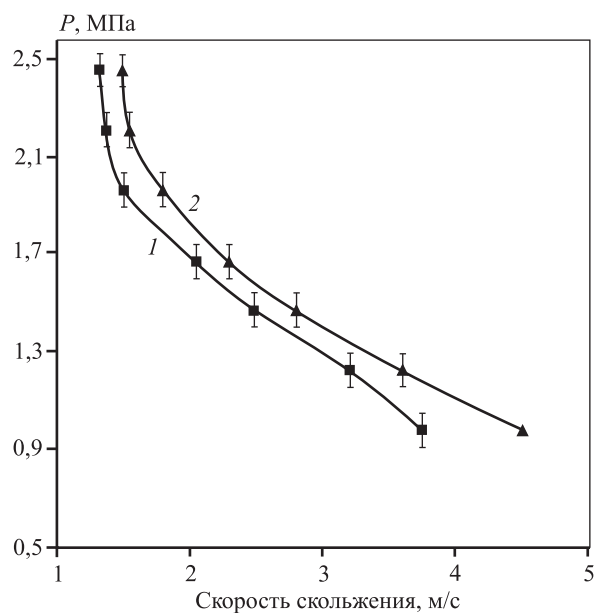


Рис. 12. Влияние введения железа во фрикционный материал на основе BrO12 с 30 об.% графита на процесс схватывания в условиях смазки

1 – без добавки железа; *2* – 20 об.% Fe

Fig. 12. Effect of iron addition to BrO12-based friction material with 30 vol.% of graphite on binding process under lubrication conditions

1 – without iron addition; *2* – 20 vol.% Fe

от 12,5—13,1 до 12,8—14,2 %. Включения железа неоднородны по составу, форме и размерам. На границе с медной фазой содержание меди составляет 3,0 %, олова — 0,3 %, а в центре фиксируется до 2 % меди при отсутствии олова, при этом включения имеют как округлую, так и вытянутую форму размером до 2,5 мкм в БрО6 и 20 мкм в БрО12 при содержании железа в них 30—50 и 51—73 % соответственно.

Коэффициент трения фрикционного материала на основе БрО12 с увеличением содержания железа от 10 до 50 об.% возрастает с 0,042 до 0,073, а на основе БрО6 — с 0,034 (10 об.% Fe) до 0,055 (40 об.% Fe). При повышении содержания железа наблюдается снижение износостойкости материала. Так, в материале на основе БрО6 при увеличении содержания железа с 20 до 40 об.% износ увеличивается практически в 3 раза (с 6 до 18 мкм/км), а при его количестве более 40 об.% происходит катастрофический износ (>18 мкм/км); в материале на основе БрО12 износ увеличивается с 2 до 6 и 8 мкм/км соответственно.

Установлено, что поверхности изнашивания контртела, работающего в паре с фрикционным материалом, содержащим до 30 об.% добавки железа, по наружному и внутреннему диаметрам имеют одинаковую морфологию, характерную для абразивного и адгезионного изнашиваний. В центральной области контртела характер изнашивания существенно отличается — формируются нанодисперсная пористость и лакуны, являющиеся дополнительными объемами для смазки, что характерно для изнашивания высокоизносостойких материалов. Введение железа более 40 об.% приводит к преобладанию абразивного изнашивания.

Литература/References

1. Шарипов В.М. Проектирование механических, гидромеханических и гидрообъемных передач тракторов. М.: МГТУ МАМИ, 2002.
Sharipov V.M. Design of mechanical, hydromechanical and hydrostatic tractors' transmissions. Moscow: MGTU MAMI, 2002 (In Russ.).
2. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2004.
Sharipov V.M. Design and calculation of tractors. Moscow: Mashinostroenie, 2004 (In Russ.).
3. Jen T.-C., Nemecek D.J. Thermal analysis of a wet-disk clutch subjected to a constant energy engagement. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 1757—1769.
4. Ost W., Baets P. De, Degrieck J. The tribological behaviour of paper friction plates for wet clutch application investigated on SAE and pin-on-disk test rigs. *Wear*. 2001. Vol. 249. P. 361—371.
5. Ma W.L., Lu J.J. Effect of sliding speed on surface modification and tribological behavior of copper—graphite composite. *Tribol. Lett.* 2011. Vol. 41. P. 363—370.
6. Kato H., Takama M., Iwai Y., Washida K., Sasaki Y. Wear and mechanical properties of sintered copper—tin composites containing graphite or molybdenum disulfide. *Wear*. 2003. Vol. 255. P. 573—578.
7. Ghorbani M., Mazaheri M., Afshar A. Wear and friction characteristics of electrodeposited graphite—bronze composite coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2005. Vol. 190. P. 32—38.
8. Kestursatya M., Kim J.K., Rohatgi P.K. Wear performance of copper—graphite composite and a leaded copper alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003. Vol. 339. P. 150—158.
9. Katsuyoshi K. Wet sintered friction material, manufacture therefor, and wet friction engagement plate: Pat. JPH0861406A (JP). 1996.
10. Wet copper-sintered friction material, its production, and friction plate using the same: Pat. JP2000096037A (JP). 2000.
11. Katsuyoshi K., Yoshie K. Sintered friction material, composite copper alloy powder used therefor and their production: Pat. JPH08253826A (JP). 1996.
12. Fumio I., Tadashi K., Asabe K., Osamu K. Sintered friction material for high-speed rail: Pat. WO2012133513A1 (JP). 2012.
13. Si Lina, Liu Cheng, Hongjuan Yan, Yanjie Wang, Ye Yang, Shuting Zhang, Yuyan Zhang. The influences of high temperature on tribological properties of Cu-based friction materials with a friction phase of SiO₂/SiC/Al₂O₃. *AIP Advances*. 2021. Vol. 11. Iss. 2. Paper 025335. P. 1—9. <https://doi.org/10.1063/5.0040220>.
14. Haohao Z., Xu R., Weiwei Z., Yong W., Siqi Z., Zhikang H. Tribological behavior of copper—graphite composites reinforced with cu-coated or uncoated SiO₂ particles. *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 2—12. DOI: 10.3390/ma11122414.
15. Лешок А.В., Ильющенко А.Ф., Дьячкова Л.Н., Пинчук Т.И. Триботехнические свойства порошкового фрикционного материала на основе меди с добавкой порошка железо-хромистого сплава. *Трение и износ*. 2021. Т. 42. № 1. С. 5—12.
Liashok A.V., Ilyushchanka A.Ph., Dyachkova L.N., Pinchuk T.I. Tribotechnical properties of powder friction material based on copper with the addition of iron-chromium alloy powder. *Trenie i iznos*. 2021. Vol. 42. No. 1. P. 5—12 (In Russ.).

16. Лешок А.В., Ильющенко А.Ф., Дьячкова Л.Н., Пинчук Т.И. Триботехнические свойства порошкового фрикционного материала на основе меди с добавкой порошка титана. *Трение и износ*. 2021. Т. 42. No. 2. С. 128—135.
Liashok A.V., Ilyushchanka A.Ph., Dyachkova L.N., Pinchuk T.I. Tribotechnical properties of powder friction material based on copper with the addition of titanium powder. *Trenie i iznos*. 2021. Vol. 42. No. 2. P. 128—135 (In Russ.).
17. Федорченко И.М. Современные фрикционные материалы. Киев: Наук. думка, 1975.
Fedorchenko I.M. Modern friction materials. Kiev: Naukova Dumka, 1975 (In Russ.).
18. Материалы антифрикционные порошковые на основе меди. Марки. ГОСТ 26719-85. М.: Госстандарт СССР, 1985.
Antifriction powder materials based on copper. Marks. GOST 26719-85. Moscow: Gosstandart SSSR, 1985 (In Russ.).
19. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наук. думка, 1980.
Fedorchenko I.M., Pugina L.I. Sintered composite antifriction materials. Kiev: Naukova Dumka, 1980 (In Russ.).
20. Дьячкова Л.Н. Получение антифрикционных композиционных порошковых инфильтрованных материалов на основе железа для тяжело нагруженных узлов трения: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Минск: НПО порошковой металлургии, 2013.
Dyachkova L.N. Production antifriction composite powder infiltrated materials based on iron for heavily loaded friction units: Abstract of a thesis of the dissertation of Dr. Sci. (Eng.). Minsk: Sci. Ind. Association of Powder Metallurgy, 2013 (In Russ.).
21. Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н., Алексеенко Н.А. Особенности изнашивания порошкового фрикционного материала на основе меди в условиях граничного трения. *Трение и износ*. 2019. No. 6. С. 654—660.
Ilyushchanka A.Ph., Liashok A.V., Dyachkova L.N., Alekseenko N.A. Features of powder friction material wear based on copper under conditions of boundary friction. *Trenie i iznos*. 2019. No. 6. P. 654—660 (In Russ.).
22. Ильющенко А.Ф., Дмитрович А.А., Лешок А.В. Исследование микропрофиля поверхности диска стального, работающего в различных узлах трения в паре с металлокерамическим фрикционным материалом МК-5. *Материалы, технологии, инструменты*. 2014. Т. 19. No. 1. С. 26—31.
Ilyushchanka A.Ph., Dmitrovich A.A., Liashok A.V. Research of the microprofile of the surface of a steel disk operating in various friction units paired with a cermet friction material MK-5. *Materialy, tekhnologii, instrumenty*. 2014. Vol. 19. No. 1. P. 26—31 (In Russ.).
23. Дьячкова Л.Н., Фельдштейн Е.Э., Витязь П.А. Влияние содержания железа на трибологические характеристики спеченных оловянисто-железистых бронз. *Трение и износ*. 2018. No. 3. С. 173—178.
Dyachkova L.N., Feldshtein E.E., Vityaz P.A. On the effect the iron content on the tribological properties of sintered tin-iron bronze. *Trenie i iznos*. 2018. No. 3. P. 173—178 (In Russ.).