

Б. Г. Гасанов, Е. В. Харченко, Г. Г. Панчвидзе

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКОВЫХ ЖЕЛЕЗОМЕДНОГРАФИТОВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. Рассмотрено влияние химического состава смазочных материалов, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ), на значения коэффициента трения, температуры и линейного износа образцов из порошковых антифрикционных сплавов на основе железа.

Проведенные изыскания показали, что насыщение пористых структур, изготовленных из Fe, Fe + Cu и Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, смазочными составами на основе карбоновых кислот или иных ПАВ с последующим их применением в области контакта трущихся элементов заметно улучшает трибологические характеристики исследуемых порошковых материалов.

В результате экспериментов установлено, что использование смеси минерального масла И-20А и спиртового раствора олеиновой кислоты в качестве смазки приводит к значительному, примерно в 4–6 раз, сокращению периода приработки образцов. Также наблюдается снижение коэффициента трения, который в стабильном режиме не превышает значений 0,01–0,007, после чего система практически переходит в режим работы с минимальным износом.

С помощью метода электронно-зондового микроанализа определены закономерности образования промежуточных слоев, улучшающих триботехнические свойства порошковых материалов на основе железо – медь – графит, а также влияние и состав смазочных материалов, содержащих ПАВ, на микроструктуру поверхностного слоя пар трения.

Ключевые слова: порошковые антифрикционные материалы, промежуточные структуры, триботехнические свойства, поверхностно-активные вещества, самоорганизующиеся системы.

Для цитирования: Гасанов, Б. Г. Повышение трибологических характеристик порошковых железомеднографитовых сплавов / Б. Г. Гасанов, Е. В. Харченко, Г. Г. Панчвидзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 161–175. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_161.

Введение

Современные тенденции в трибоматериаловедении ориентированы на создание новых материалов и инновационных технологий, позволяющих существенно улучшать трибологические характеристики пар трения с целью значительного снижения коэффициента трения, линейного износа и времени приработки поверхностей трущихся пар.

Данный подход отличается от уже известных [1–3] влиянием характеристик материала поверхностей трущихся пар и смазочной среды на способность их взаимодействия в процессе трения и формирования за счет трибосинтеза промежуточных наноструктур, влияющих на трибологические характеристики.

Установлено, что присутствие ПАВ в зоне трения стимулирует селективное анодное растворение определенных элементов, входящих в состав антифрикционных медных сплавов [4–7]. Ключевым фактором является активация направленного переноса массы на контактирующих поверхностях, приводящего к формированию защитных сервовитных слоев и серфинг-пленок [8, 9]. В результате этого процесса атомы активных компонентов переходят в смазку, а в приповерхностном слое медных антифрикционных сплавов происходит обогащение пористыми микровключениями меди [10, 11]. Следовательно, при наличии ПАВ в смазочной среде наночастицы меди активно взаимодействуют с поверхностью контртела, формируя тонкий сервослой, что способствует созданию самоорганизующихся узлов трения [11–13].

В машиностроении широко применяются триботехнические железомеднографитовые материалы, содержащие 1–2 % Cu и 1–1,5 % Gr и отличающиеся высокими механическими свойствами [14]. Исследования показали, что в конструкционных спеченных сталях медь улучшает прессуемость шихты, способствует интенсификации спекания благодаря образованию жидкой фазы и повышает твердость и прочность при совместном добавлении меди и графита [15]. Следует также отметить, что медь не формирует карбиды и поэтому обеспечивает упрочнение феррита, как следствие, эффективность ее влияния на механические свойства сталей возрастает при низких уровнях содержания углерода.

Несмотря на то что спеченные композиты на основе Fe–Gr, Cu–Gr и Fe–Cu–Gr широко применяются в различных отраслях как антифрикционные материалы, физическая природа механизма трибосинтеза наноструктур в узлах трения при их пропитке индустриальными маслами с добавками поверхностно-активных веществ не изучена.

До сих пор мало изучено, как химический состав смазочных материалов с ПАВ, состав компонентов и параметры термической обработки порошковых сплавов Fe–Cu–Gr влияют на трибологические свойства при трении.

В рамках данной работы предполагается изучение трибологических характеристик и создания новых подходов к формированию самоорганизующихся узлов трения на основе системы Fe – Cu - Gr с использованием смазочных композиций, содержащих ПАВ.

Материалы и методика исследований

Трибологические исследования проводили на машине трения собственного производства [17, 18] по схеме «вал – колодка». Для исследований использовались кольцевые заготовки (рис. 1, а), которые получали холодным прессованием из порошковой шихты, содержащей (мас) 1,5–2 % графита (ГЛ-1, ГОСТ 5279–74, ГИИ-А ТУ 1916-109-71-2009), 0–5 % меди (ПМС-1, ГОСТ 4960–2017) и остальное порошок железа ПЖВ 2.200.26 или ПЖРВ 2.200.26 (ГОСТ 9849–86). Заготовки в форме колец подвергались спеканию при температуре 1150 °С в течение двух часов в атмосфере диссоциированного аммиака. После завершения процесса спекания их пористость определялась с использованием гидростатического метода в соответствии с ГОСТ 18898–89.

При испытаниях в качестве контртела применялся ролик, изготовленный из стали 40Х или 45 с поверхностной твердостью HRC в диапазоне 45–58 единиц. Внешний диаметр ролика составляет 20 мм, а шероховатость его рабочей поверхности после шлифовки – в пределах Ra = 1,6–0,8 мкм.

Из спеченных колец с применением специального кондуктора вырезались образцы в виде сегментов, имеющих размеры 6 мм в ширину и 8 мм в длину, с параллельными боковыми сторонами, по типу тормозной колодки (рис. 1, б). В каждом сегменте просверливалось глухое отверстие диаметром 2 мм и глубиной 4 мм для размещения термопары.

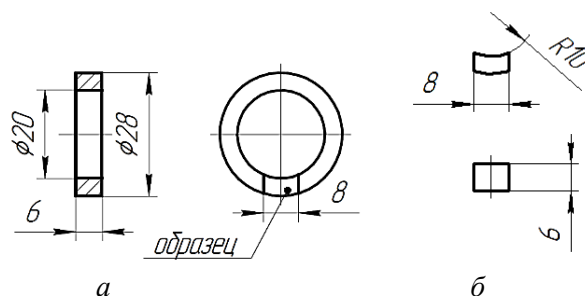


Рис. 1. Образец для испытаний, геометрические размеры

Перед испытанием часть образцов пропитывали минеральным маслом И-20А (ГОСТ 20799–2022) при 90–100 °С в течение 30–180 мин, часть смесью масла И-20А и глицерина (ГОСТ 6824–96) и часть смесью масла И-20А и спиртовыми растворами некоторых карбоновых кислот в различном процентном соотношении или в чистом виде, а также и их смесью. Перед испытанием все образцы смазывали дополнительно из-за относительно малых размеров рабочей поверхности колодки по сравнению с поверхностью ролика. В отдельных случаях смазочные материалы подавали в зону трения с частотой одна капля через каждые 10–20 с посредством установки капельницы на машину трения. Величину прилагаемой силы подбирали таким образом, чтобы давление в области контакта изменялось от 5 до 25 МПа, а скорость скольжения изменяли в пределах 0,5–1,5 м/с.

Ввиду того, что адгезивные характеристики железных порошков и производных от них веществ обусловлены величиной их площади поверхности, ее параметры измерялись с помощью метода БЭТ на анализаторе адсорбции Micromeritics ChemiSorb 2750.

Для изучения микроструктуры поверхностей, подвергнутых трению, применялись металлографический микроскоп Altami MET-1М и сканирующий электронный микроскоп Quanta 200.

Микрорентгеноспектральный анализ был выполнен в центре коллективного пользования ЮРГПУ (НПИ) с использованием оборудования LScanVer-1100 и Tescan VEGA II LMU, оснащенного системой микроанализа энергодисперсионного типа INCA ENERGY 450/XT производства OXFORD Instruments Analytical.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования показали, что для образцов из спеченного железа с пористостью 16–22 %, пропитанных маслом И-20А, при нагрузке в 500 Н и скорости скольжения 0,5 м/с, наблюдалось уменьшение коэффициента трения (f) с 0,14 до 0,09 в процессе приработки (рис. 2, а, кривая 1). В то же время износ данных образцов постепенно увеличивался во время испытания, достигнув значения 0,1–0,12 мм после 2 ч работы (рис. 2, б, кривая 1).

При использовании порошка железа, пропитанного смесью масла и глицерина в пропорции 80:20, коэффициент трения снижался значительно сильнее с 0,14 до 0,02–0,015 (см. рис. 2, а, кривая 2). Время приработки при этом было небольшим, не более 8–10 мин. Износ после 2 ч испытаний составил 0,092–0,095 мм (см. рис. 2, б, кривая 2).

Спеченные образцы, изготовленные из шихты с добавлением порошков меди, бронзы и графита, пропитывались смесью масла И-20А и глицерина (20 % по объему). В частности, при добавлении 2 % порошка меди в шихту коэффициент трения стабилизировался в течение получаса (см. рис. 2, а, кривая 3). Износ после двухчасового испытания составил 0,07–0,09 мм (см. рис. 2, б, кривая 3). Время приработки и коэффициент трения спеченных образцов из смеси Fe + 2 % БрОЦС 5-5-5 значительно меньше, чем у образцов из смеси Fe + 2 % Cu (рис. 2, кривая 4). При установившемся режиме трения износ образцов из сплавов Fe + 2 % Cu и Fe + 2 % БрОЦС 5-5, пропитанных смесью глицерина и минерального масла, практически не увеличивался, т.е. реализуется безызнасный режим трения.

При исследовании сплавов Fe с добавлением 2,5 % Cu и 2,0 % Gr в идентичных условиях коэффициент трения f уменьшается с отметки 0,129 до значений в диапазоне 0,006–0,008 (см. рис. 2, а, линия 5). При этом величина линейного износа на начальном этапе приработки не превышала 0,08–0,085 мм (см. рис. 2, б, линия 5).

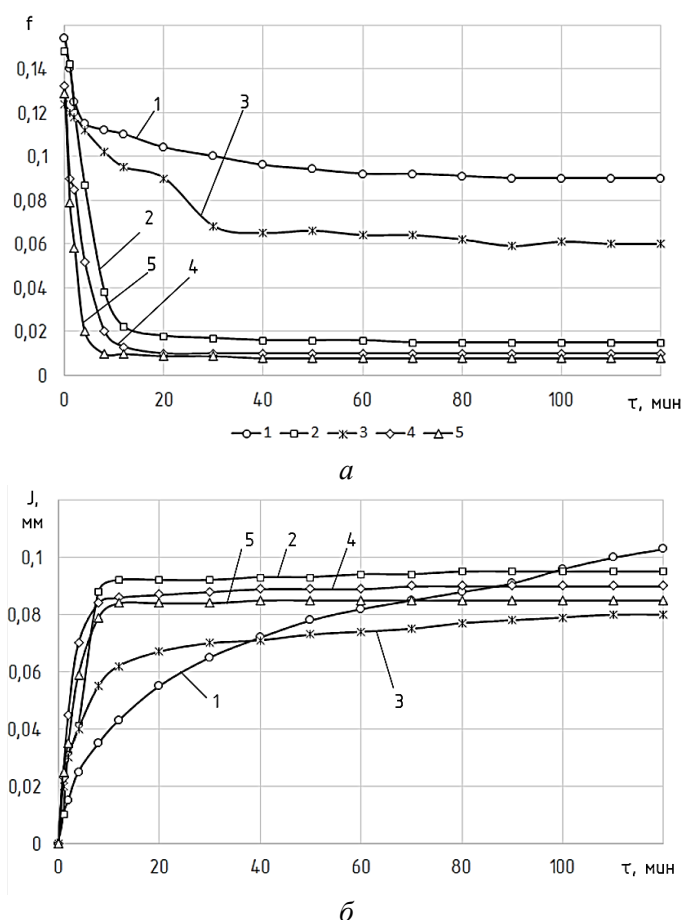


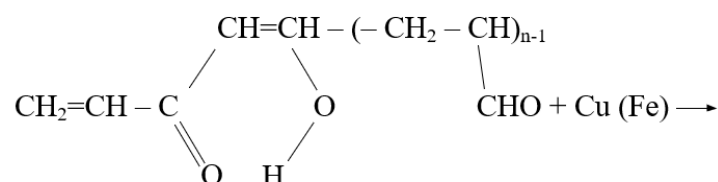
Рис. 2. Зависимости коэффициента трения (а) и линейного износа (б)

от времени испытания спеченных образцов:

- 1 – Fe (смазка И-20А); 2 – Fe (смазка И-20А + 20 % глицерина); 3 – Fe + 2 % Cu;
4 – Fe + 2 % БрОЦС 5-5-5; 5 – Fe + 2 % Cu + 2 % Gr

Результаты исследования показывают значительное уменьшение времени приработки металло-керамики на основе железных порошков с добавлением бронзы или меди, эксплуатируемых в глицериновой среде. Длительность этого этапа снижается в 5–10 раз по сравнению с компактными образцами из стали и медных сплавов при граничном смазывании. Более того, скорость снижения момента трения в процессе приработки у спеченных материалов превосходит аналогичный показатель для сплошных стальных и медных материалов в 15–30 раз. Причину большой разницы во времени приработки спеченных антифрикционных материалов на основе железа в случае добавления в смазочный материал глицерина или других ПАВ можно объяснить более высокой интенсивностью формирования промежуточных структур вследствие большей площади реакционной поверхности и активации физико-химических процессов, возникающих в процессе трения.

В самом начале процесса трения глицерин, подвергаясь трибоактивации, начинает активно окисляться. Этот процесс может привести к образованию альдегидов, в частности акролеина. Впоследствии в области фрикционного контакта эти альдегиды также могут подвергаться окислению и включаться в реакции трибополимеризации с образованием веществ, способных вступать в процессы формирования металлосодержащих соединений [3, 10]. Примерами таких соединений являются комплексы, содержащие двухвалентную медь или железо, образование которых происходит по схеме



Характеристики удельной поверхности трения образцов из спеченных порошковых материалов определяются такими факторами, как форма частиц (морфология), химический состав распределения размеров частиц (гранулометрический состав) исходных порошков металлов и шихты на их основе (рис. 3, *а, в*), режимы и схемы прессования, поверхностная пористость образцов (рис. 3, *б*), распределение компонентов в шихте и материале (рис. 3, *в, з*), механизм массопереноса в процессе трения и др.

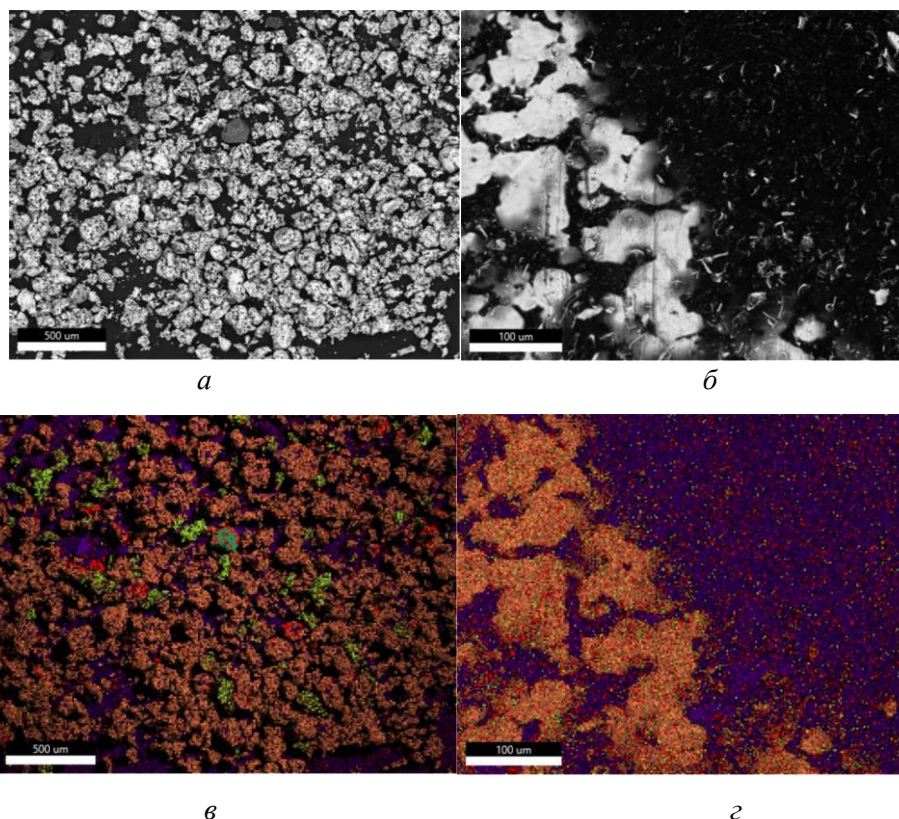


Рис. 3. Морфология частиц (*а*), микроструктура (*б*) и распределение компонентов в смеси (*в*) и на поверхности (*з*) спеченного образца из сплава Fe + 2 % Cu + 2 % Gr

В табл. 1 представлены данные об удельной поверхности порошков железа, полученные с помощью метода БЭТ на основе анализа теплопроводности (рис. 4).

Таблица 1

Значение удельной поверхности для порошков железа

Марка порошка железа	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /г
ПЖВ 2.200.26 (состояние поставки)	1,3472
ПЖРВ 2. 200.26 (состояние поставки)	0,7574
ПЖРВ 2.200. 26, фракция + 100 – 160	0,1394

У восстановленного порошка железа ПЖВ 2.00.26 она составила 1,3472 м²/г, а у распыленного порошка железа ПЖРВ 2.200.26 (фракции + 160 – 100) – 0,1394 м²/г. У спеченной прессовки порошка ПЖРВ 2.200.26 с остаточной пористостью 21 % удельная поверхность порошка, определенная методом БЭТ, не превышает 0,0429 м²/г.

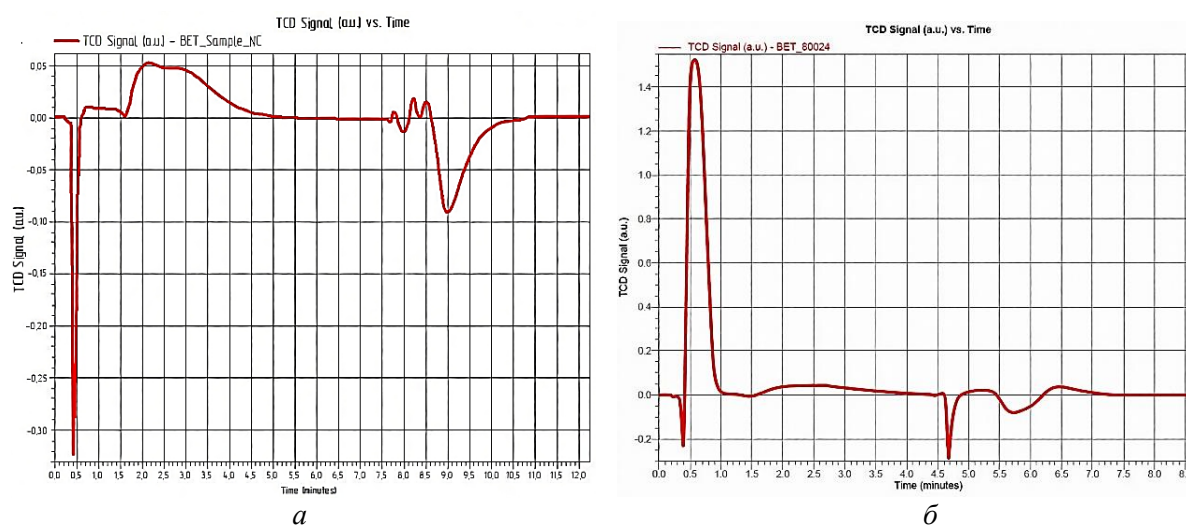


Рис. 4. Сигнал теплопроводности порошков железа:
 а – ПЖВ 2.200.26; б – ПЖРВ 2.200.26 (фракция + 100 – 160)

Более высокая удельная поверхность порошка железа, полученного восстановлением из оксидов железа, обусловлена развитой поверхностью по сравнению с распыленными порошками, у которых значительная часть частиц имеет сферическую конфигурацию (см. рис. 3, в).

Допускаем, что глубина расчетного слоя пропитки спеченных образцов составляет около 0,1 и более (см. рис. 3, б и г), а площадь реакционной поверхности частиц у спеченных образцов пористостью 18–23 % из порошка ПЖРВ 2.200.26 пропорциональна величине $(1 - \alpha_k)$ [19, 20], тогда реакционную поверхность слоя спеченных образцов, пропитанного смесью глицерина и минерального масла, показанных на рис. 3, б, можно определить по следующему выражению:

$$S_{\text{рп}} = S_0(1 - \alpha_k), \quad (1)$$

где S_0 – общая свободная поверхность частиц порошка в рассматриваемом слое.

$$S_0 = S_{\text{уд}} \cdot m_{\text{сл}} = S_{\text{уд}} \cdot V_{\text{об}} \cdot \gamma_{\text{ж}} = 2897,56 \text{ см}^2,$$

где $S_{\text{уд}}$ – удельная поверхность порошка ПЖРВ 2.200.26 (см. табл. 1); $m_{\text{сл}}$ – масса расчетного слоя образца с площадью контакта с роликом 0,4938 см²; $V_{\text{об}}$ – объем расчетного слоя пропитки, см³.

Относительный коэффициент контактной поверхности α_k определяем по следующим формулам [19] и [20]:

$$\alpha_k = \Theta^2 \frac{\ln \beta_0 \Theta}{\ln \beta_0 \beta}; \quad \alpha_k = \frac{\Theta^2 \cdot \Delta \Theta}{\Pi_0}, \quad (2)$$

где Θ – относительная плотность материала; β – его относительный объём; β_0 – насыпной относительный объём шихты; Π_0 – исходная пористость прессовки.

Поскольку

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\gamma_{пт}}{\gamma_k}; \quad \beta = \frac{V_{пт}}{V_k}; \quad \gamma_{пт} = \gamma_k(1 - \Pi); \quad V_{пт} = V_k(1 + \Pi); \quad \beta_0 = \frac{V_{нас}}{V_k}; \\ V_{нас} &= \frac{m}{\gamma_{нас}}; \quad V_k = \frac{m}{\gamma_k}; \quad \beta_0 = \frac{m/\gamma_{нас}}{m/\gamma_k} = \frac{\gamma_k}{\gamma_{нас}}; \quad \Delta \Theta = \Theta - \Theta_0; \quad \Theta = 1 - \Pi; \\ \Pi_0 &= 1 - \Theta_0 = 1 - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}; \quad \Theta_0 = \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}; \quad \Delta \Theta = 1 - \Pi - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}, \end{aligned} \quad (3)$$

то при пористости спеченных образцов 18–23 % согласно выражениям (2) и (3) получим

$$\begin{aligned} \alpha_k &= (1 - \Pi)^2 \frac{\ln \gamma_k / \gamma_{нас} \cdot (1 - \Pi)}{\ln \gamma_k / \gamma_{нас} \cdot (1 + \Pi)} \approx 0,347 - 0,468; \\ \alpha_k &= \frac{(1 - \Pi)^2 \cdot \left(1 - \Pi - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}\right)}{1 - \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_k}} \approx 0,400 - 0,484. \end{aligned}$$

Соответственно реакционная площадь поверхности спеченных образцов пористостью 18–23 % (см. рис. 3, б), пропитанных на глубину 0,1, по формуле (1) составит

$$S_{рп} = 2897,56 \cdot (1 - 0,43) = 1651,61 \text{ см}^2.$$

Активная поверхность таких же образцов из антифрикционного материала с шероховатостью $R_a = 1,6\text{--}0,8$ мкм, полученных механической обработкой из компактного материала, составит около 3,2–3,4 см². Следовательно, среднестатистические значения реакционной поверхности спеченных образцов из порошка ПЖРВ 2.200.26 отличаются от беспористых материалов примерно в 480 раз с учетом величины расчетного слоя пропитки.

Если допустить, что реакционная площадь у спеченных образцов, определенная методом БЭТ ($S_{уд} = 0,0429$ м²/г), равна удельной поверхности спеченных образцов из порошка железа ПЖРВ 2.200.26, то реакционная площадь в зоне трибосопряжения порошковых образцов (см. рис. 1, б) с массой активного слоя 0,3876 г составит 94,79 см², что в 57 раз больше, чем образца, полученного обработкой давлением или литьем.

В то же время микро- и субмикроскопические поры, наряду со своеобразной микроструктурой частиц железных и медных порошков, формируют вогнутые и выпуклые участки металлической основы ячеистых антифрикционных материалов, что приводит к модификации химической активности атомов, которая варьируется в зависимости от размера и конфигурации пор, а также открытой поверхности частиц порошкообразных материалов. Это, по-видимому, является также одной из причин снижения времени приработки и интенсивного формирования промежуточных (вторичных структур) в процессе испытания порошковых материалов в среде ПАВ.

Установлено, что в случае разовой смазки олеиновой кислотой перед испытанием спеченных образцов из порошка железа ПЖРВ 2.200.26, пропитанных маслом И-20А (при 90 °С в течение 3 ч), время приработки сокращается, а минимальный коэффициент трения 0,045–0,055 (рис. 5, а, кривая 1) получен после испытания в течение 8 мин.

Значения коэффициента трения у спеченных образцов из смеси Fe + 2,5 % Cu и Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, испытанных при тех же условиях, в установившемся режиме трения колебались в пределах 0,05–0,055 (рис. 5, а, кривые 2 и 3), а линейный износ всех образцов в установившемся режиме не превышал 0,05–0,07 мм.

При смазке указанных выше образцов перед испытанием смесью стеариновой или себадиновой кислот с маслом И-20А (в соотношении 10:90) коэффициент трения в установившемся режиме изменяется в процессе испытания в пределах 0,08–0,095 (рис. 5, б и в) и незначительно отличается от значений коэффициента трения для образцов, пропитанных только маслом И-20А (см. рис. 2, а).

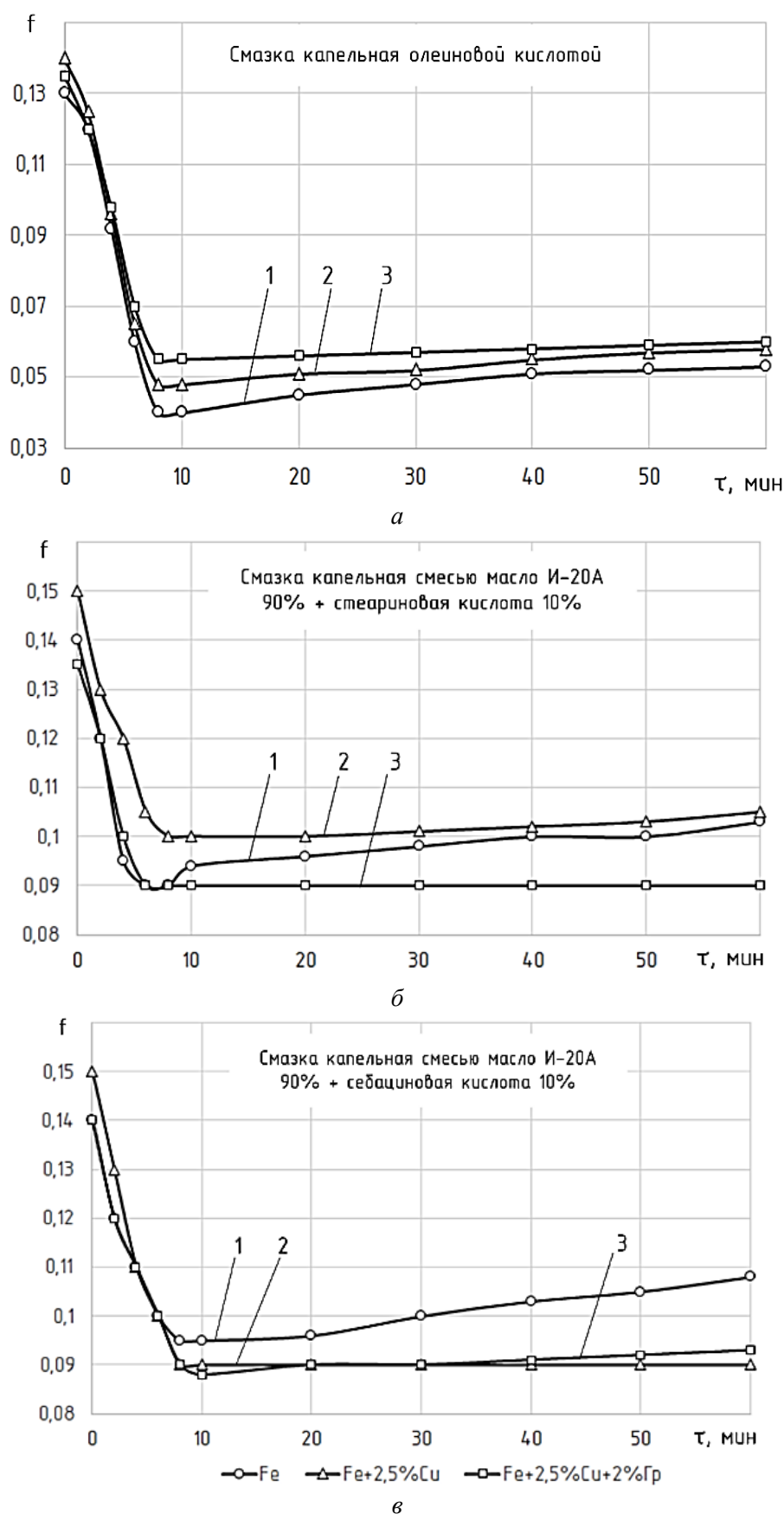


Рис. 5. Коэффициент трения для образцов из Fe (1); Fe + 2,5 % Cu (2); Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr (3) в зависимости от состава смазочного материала:
 а – олеиновая кислота; б – смесь масла И-20А + 10 % стеариновая кислота;
 в – смесь масла И-20А + себациновая кислота

Износ (по линейному типу) у образцов, изготовленных из сплава железа с добавлением 2,5 % Cu и 2 % Gr, предварительно пропитанных маслом И-20А и дополнительно обработанных олеиновой кислотой или составом на базе стеариновой и себадиновой кислот с маслом И-20А перед испытаниями на трение. Показано, что износ снижается в 2–3 раза относительно образцов, пропитанных только маслом И-20А.

Еще одна часть спеченных образцов, изготовленных из композиции Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, была обработана посредством пропитки смесью олеиновой кислоты и этилового спирта (в пропорции 30 к 70).

В ходе испытаний под воздействием нагрузки в 500 Н и скорости скольжения 1 м/с этап приработки этих образцов длился от 7 до 10 мин, за это время коэффициент трения уменьшился с первоначальных значений 0,13–0,15 до значения 0,05 (рис. 6, а, кривая 2). Линейный износ (рис. 6, в, кривая 2) остался в пределах 0,017–0,02 мм. Этот показатель в 3–4 раза превосходит результаты по износу, полученные при использовании глицерина как поверхностно-активного вещества (см. рис. 2). Также он в 2–3 раза лучше, чем при стандартном тестировании образцов, пропитанных только индустриальным маслом (рис. 6, в, кривая 1).

При пропитке таких же образцов спиртовым раствором стеариновой или себадиновой кислоты коэффициент трения после приработки в течение 10 мин колебался в пределах 0,08–0,09 (рис. 6, а, кривые 3 и 4), а линейный износ при этом не превышал 0,03–0,04 мм (рис. 6, в, кривые 3 и 4).

Следует отметить, что в случае смазывании капельной подачей растворами себадиновой и стеариновой кислот в спирте исследуемых материалов температура в зоне сопряжения «вал – образец» повышалась после испытания в течение 1 ч до 80–90 °С тогда, как при смазывании раствором олеиновой кислоты она не повышалась выше 45–47 °С (рис. 6, в).

При повышенных концентрациях карбоновых кислот температурное воздействие на смазку приводит к некоторому снижению их адгезии к трущимся поверхностям. Это связано с конечностью адсорбционных центров на стальной основе. Трибологические напряжения сдвига провоцируют изнашивание и отслоение поверхностных продуктов, таких как оксиды и гидроксиды. Кроме того, повышается температура контактной зоны, что, в свою очередь, интенсифицирует хемосорбцию с образованием карбоксилата железа [10].

Сравнительный анализ коэффициентов трения для образцов, выполненных из сплава железа с добавлением 2,5 % Cu и 2 % Gr с последующей пропиткой маслом И-20А в течение капельной подачи в зону трения (на контртело) при испытаниях смеси олеиновой кислоты с этанолом, демонстрирует значительное уменьшение коэффициента трения с 0,09 до 0,008 в стабильном режиме работы.

При предварительной обработке (пропитка в течение 180 мин) образцов составом из масла И-20А и спиртового раствора олеиновой кислоты с последующим нанесением этой композиции капельным методом в зону трения коэффициент трения уменьшается до значений 0,006–0,003. Указанное уменьшение коэффициента трения, как нам представляется, обусловлено устранением из смазочного материала металлических частиц, образующихся в результате износа, что, в свою очередь, благоприятно сказывается на условиях трения. Это приводит к снижению интенсивности изнашивания при использовании данного масла. Некоторое увеличение периода приработки связано с необходимостью дополнительного времени для эвакуации изношенных металлических частиц из зоны трения.

В ходе взаимодействия трущихся поверхностей образца и контртела, когда олеиновая кислота используется в качестве капельной смазки, существует вероятность вымывания молекул поверхностно-активных веществ, которые образуются в процессе трибодеструкции и могут не успеть адсорбироваться на контактирующих поверхностях. Этим можно объяснить умеренное увеличение износа при непрерывном капельном введении олеиновой кислоты (рис. 7, а) и наблюдаемый перенос части медных наночастиц на поверхность скольжения ролика (рис. 7, б и в).

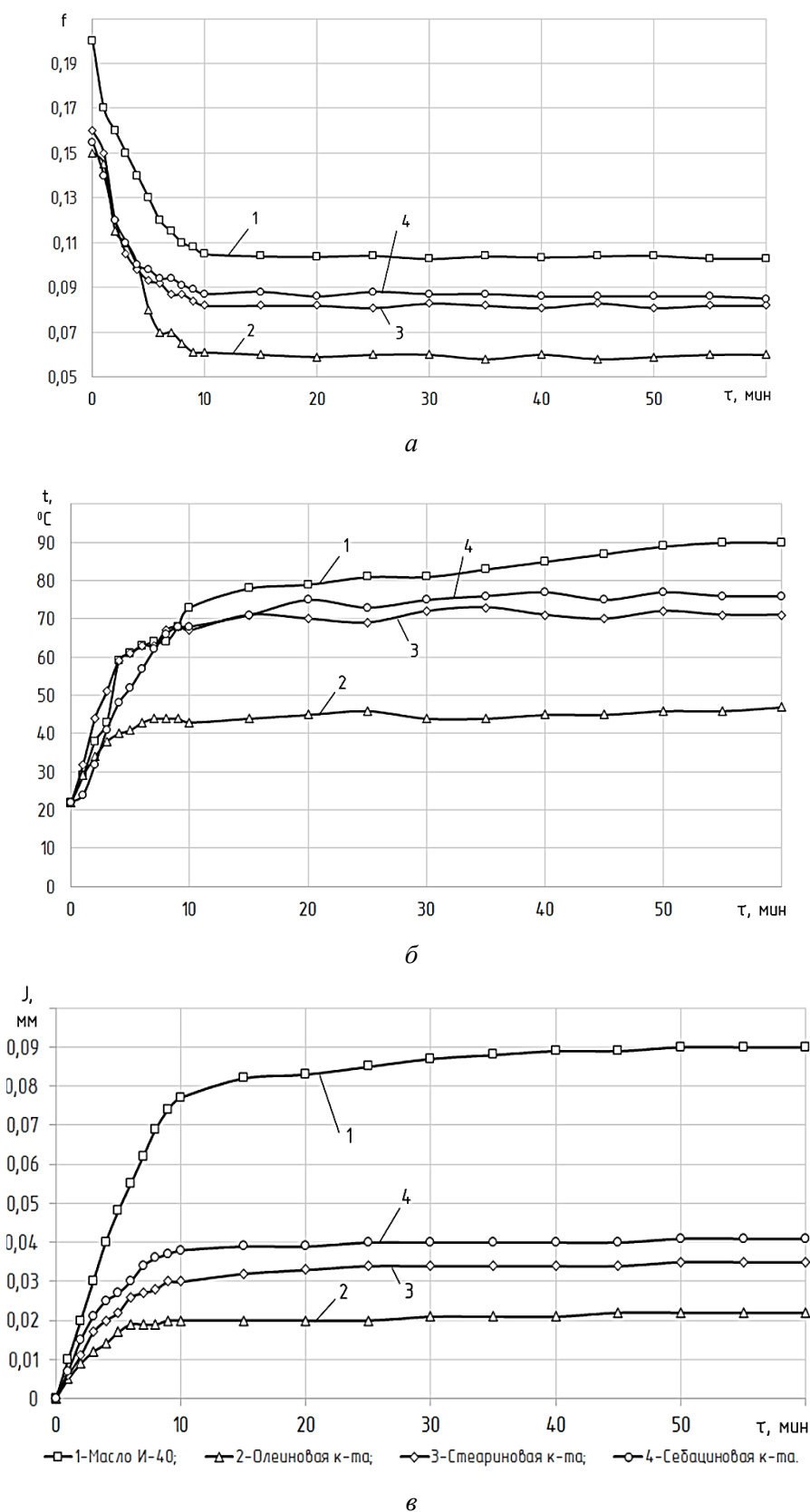


Рис. 6. Влияние состава смазки на значения коэффициента трения (а), температуры (б) и износа (в) образцов, изготовленных из сплава Fe + 2 % Cu + 2 % Gr для различных смазочных материалов:
 1 – минеральное масло И-20 А; 2 – олеиновая кислота; 3 – стеариновая кислота;
 4 – себациновая кислота

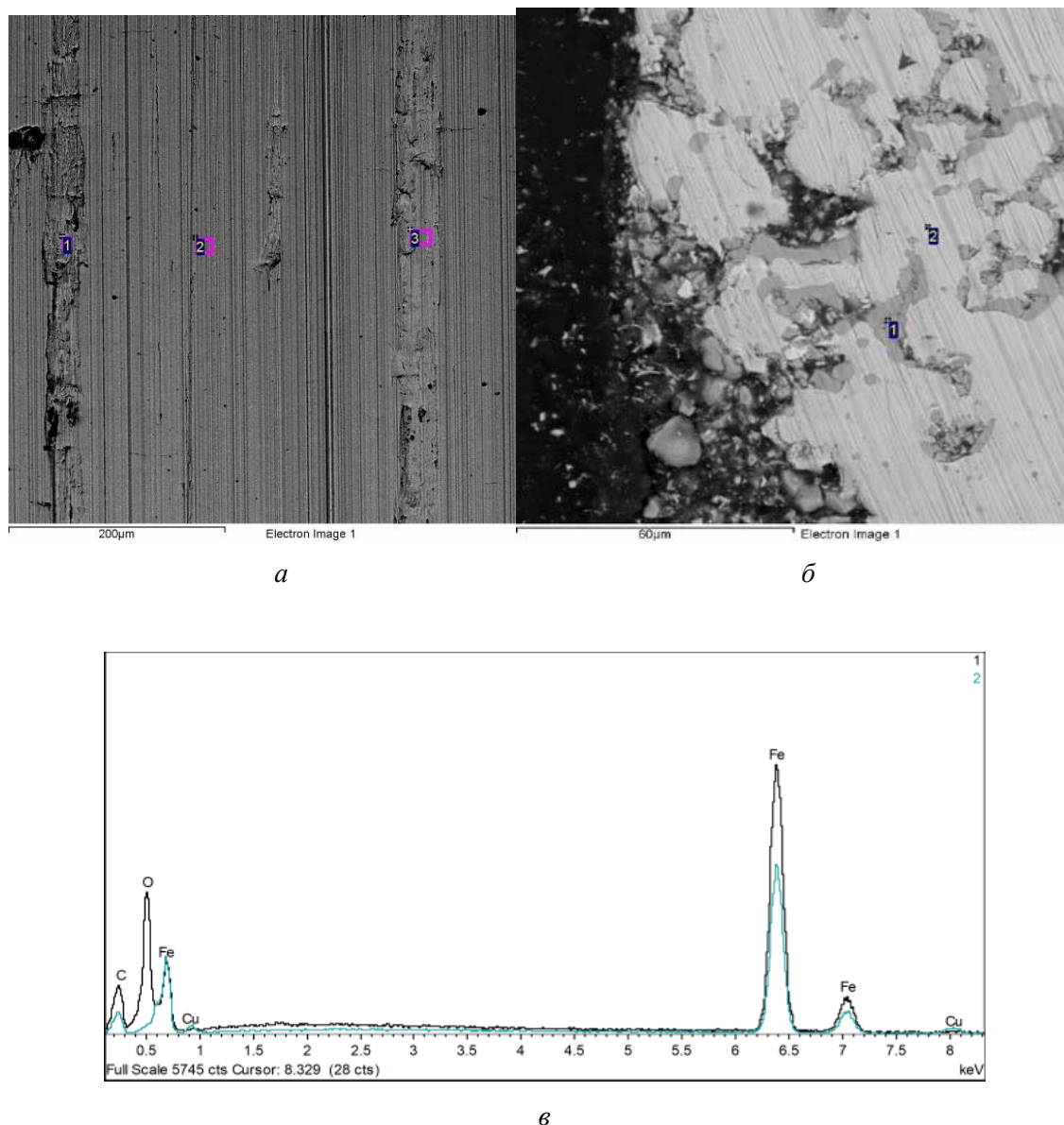


Рис. 7. Микроструктура (а), вид поверхности трения стального ролика (б) и спектр EDX (в) ролика в зоне трения спеченного образца Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, пропитанного олеиновой кислотой

По мере роста содержания олеиновой кислоты в смазочном составе, используемом для обработки (пропитки) образцов, изготовленных из смеси Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr, наблюдается уменьшение коэффициента трения при испытаниях в условиях стабильного режима работы.

В ходе испытания при использовании только масла И-20А коэффициент трения находится в диапазоне $f = 0,085\text{--}0,09$, при добавлении в смазочный состав около 20 % раствора олеиновой кислоты в этиловом спирте (по объему) он также составлял $\sim 0,09$, но при дальнейшем увеличении уровня олеиновой кислоты в составе до 40–60 % $f = 0,006\text{--}0,007$.

Вероятно, наблюдаемый эффект обусловлен образованием добавочного слоя, облегчающего скольжение. Этот слой возникает из-за трибосинтеза новых, переходных слоев, структур или соединений, обогащенных наночастицами меди на поверхности стального ролика (см. рис. 7, б). Это влечет за собой снижение как коэффициента трения, так и интенсивности износа.

Полученные в ходе испытаний значения основных трибологических характеристик для порошкового сплава Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr с предварительной обработкой (пропитка различными смазочными композициями, содержащими карбоновые кислоты) и последующей капельной смазкой смазочными со-

ставами на основе индустриального масла, карбоновых кислот и глицерина представлены в табл. 2. Испытания проводились при нагрузке 500 Н (соответствует давлению 20 МПа) и скорости относительного скольжения 1,0 м/с.

Апробация полученных данных указывает, что наиболее перспективные и значимые показатели трибологических характеристик образцов после пропитки смазочным составом соответствуют минеральному маслу и раствору олеиновой кислоты в этиловом спирте, где содержание последнего варьируется от 40 до 60 % по объёму, в этом случае наблюдается незначительный износ образцов в сочетании с минимальными значениями коэффициента трения.

Повышенная устойчивость к износу связана с тем, что в отличие от индустриального масла И-20А олеиновая кислота в чистом виде слабо смачивает поверхность как стального ролика, так и частиц порошка образца. Это означает, что на старте приработки, когда антифрикционные свойства материала во многом определяются характеристиками используемого смазочного материала, применение одной лишь олеиновой кислоты или ее концентрированной смеси с маслом (свыше 60 %) создает более жесткие условия трения, нежели при использовании чистого масла, как следствие, наблюдается ускоренный износ детали. Однако по мере продолжения работы устройства процессы разложения ПАВ под действием трения и образование вторичных структур приводят к существенному улучшению условий смазывания, что вызывает заметное уменьшение коэффициента трения и переход всей системы в режим минимального износа.

Таблица 2

**Влияние состава смазочных материалов на триботехнические свойства
сплава Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr**

Способ смазки		Коэффициент трения в установившемся режиме f	Линейный износ образца I , мм	Температура в зоне контакта при установившемся режиме трения t , °C
Пропитка	Одноразовая (капельная)			
Без пропитки	И-20А	0,01–0,095	0,115–0,120	90
И-20А	Олеиновая кислота 100 %	0,055–0,060	0,015–0,017	47
И-20А	И-20А 90 % + стеариновая кислота 10 %	0,090–0,095	0,060–0,065	71
И-20А	И-20А 90 % + себадиновая кислота 10 %	0,090–0,095	0,060–0,070	76
Салициловая кислота 30 % + спирт 70 %	И-20А 90 % + салициловая кислота 10 %	0,058–0,07	0,040–0,050	54
Пальмитовая кислота 30 % + спирт 70 %	И-20А 90 % + пальмитовая кислота 10 %	0,105–0,110	0,060–0,070	72
Гликолевая кислота 30 % + спирт 70 %	И-20А 90 % + гликолевая кислота 10 %	0,100–0,110	0,035–0,040	60
Олеиновая кислота 30 % + спирт 70 %	Олеиновая кислота 100 %	0,040–0,060	0,012–0,015	49
Гликолевая кислота 30 % + спирт 70 %	Олеиновая кислота 100 %	0,021–0,027	0,015–0,018	33
Гликолевая кислота 20 % + спирт 50 % + глицерин 30 %	Олеиновая кислота 67 % + глицерин 33 %	0,006–0,008	0,010–0,012	33

Частицы порошка железа в состоянии поставки и спеченные изделия из них характеризуются наличием оксидных и гидроксидных пленок на их поверхностях, это способствует поглощению (адсорбции) молекул жирных кислот поверхностью материала. В ходе фрикционного взаимодействия происходит частичный распад молекул жирных кислот с образованием карбоксилат-анионов ($R-COO^-$) и катионов водорода (H^+). Высвобождающиеся катионы стимулируют химические реакции с атомами железа на поверхности, и карбоксилат-анионы связываются с атомами железа, формируя соединения – карбоксилат

железа. Исследования показывают, что карбоновые кислоты способны формировать бидентатные связи, где атомы кислорода карбоксильной группы взаимодействуют с атомами железа [21].

Соответственно оптимальные условия смазки, характеризующиеся минимальным износом образцов и низким коэффициентом трения (см. табл. 2), достигаются путем дозированной подачи смазочного состава смеси 40–60 % олеиновой кислоты и индустриального масла И-20А непосредственно в зону трения. Благодаря лучшей смачивающей способности масло на начальной стадии вытесняет ПАВ с трущихся поверхностей, тем самым уменьшая износ в период приработки, а далее, по мере формирования полярных молекул ПАВ в результате трибодеструкции, они заменяют молекулы масла на поверхности трения. Этот процесс обеспечивает снижение коэффициента трения до наблюдаемых величин и переход к режиму трения с минимальным износом (безызностный режим).

Заключение

Установлено, что ключевое воздействие на реакционную активность спеченных антифрикционных материалов на базе железа и изделий из них оказывает удельная площадь поверхностей частиц порошков в зоне трения, что ведет к сокращению периода приработки и стимулирует образование вторичных структур в ходе трения в среде ПАВ.

Введение карбоновых кислот в состав смазочных материалов сокращает время приработки образцов из сплава Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr с пористой структурой (18–22 %), пропитанных смесью масла И-20А и олеиновой кислоты в спиртовом растворе, до 8–10 мин. Отсутствие ПАВ увеличивает продолжительность этого этапа до 30–40 мин, при этом образцы из компактных сплавов на основе бронзы или чугуна требуют в 5–8 раз больше времени для приработки в сравнении с исследуемыми порошковыми материалами.

При пропитке пористых порошковых образцов из железомеднографитовых материалов и дозированной (точечной) подаче в зону трения смазочного состава на основе 60–70 % масла И-20А с добавлением спиртового раствора олеиновой кислоты значительно уменьшается износ в период приработки и в установившемся режиме работы значения коэффициента трения не выходят за пределы 0,004–0,006. Это позволяет использовать раствор олеиновой кислоты в этаноле для пропитки пористых втулок подшипников скольжения для порошковых антифрикционных материалов на основе Fe + 2,5 % Cu + 2 % Gr и их смазки смесью масла и олеиновой кислоты непосредственно перед монтажом на вал с целью получения высоких трибологических характеристик.

Список литературы

- 1 **Бурлакова, В. Э.** Трибоэлектрохимия эффекта безызностности / В. Э. Бурлакова // Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2005. – 209 с. – ISBN 5-7890-0323-0.
- 2 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника (износ и безызностность) / Д. Н. Гаркунов // Москва : Издательство МСХА, 2001. – 616 с. – ISBN 5-94327-004-3.
- 3 Трибоэлектрохимия эффекта безызностности при трении. Механизм формирования граничных слоев на стали в самоорганизующейся трибосистеме «медь – глицерин – сталь» / А. С. Кужаров, В. Е. Бурлакова, Е. Г. Зодошенко [и др.] // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 6. – С. 768–778. – ISSN 5-7890-0323-0.
- 4 **Кужаров, А. С.** Концепция безызностности в современной трибологии / А. С. Кужаров // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 23–31. – ISSN 978-88-908185-09.
- 5 **Поляков, С. А.** Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе // Долговечность трущихся

References

- 1 **Burlakova, V. E.** Triboelectrochemistry of the wear-free effect / V. E. Burlakova // Rostov-on-Don : DSTU Publishing Center, 2005. – 209 p. – ISBN 5-7890-0323-0.
- 2 **Garkunov, D. N.** Tribotechnics (wear and wear-free) / D. N. Garkunov // Moscow : Publishing House of the Moscow Agricultural Academy, 2001. – 616 p. – ISBN 5-94327-004-3.
- 3 Triboelectrochemistry of the wear-free effect during friction. Mechanism of boundary layer formation on steel in the self-organizing tribosystem "copper – glycerin – steel" / A. S. Kuzharov, V. E. Burlakova, E. G. Zodoshenko [et al.] // Friction and Wear. – 1998. – Vol. 19, No. 6. – P. 768–778. – ISSN 5-7890-0323-0.
- 4 **Kuzharov, A. S.** The concept of wearlessness in modern tribology / A.S. Kuzharov // University News. North-Caucasian region. Technical sciences. – 2014. – No. 2. – P. 23–31. – ISSN 978-88-908185-09.
- 5 **Polyakov, S. A.** Theoretical analysis of the basic mechanisms of the evolution of tribosystems at selective transfer // Durability of rubbing machine

деталей машин : сборник трудов. – Москва : Машиностроение, 1988. – С. 3–26.

6 **Kajita, S.** Friction Modification by Shifting of Phonon energy Dissipation in Solid Atoms / S. Kajita, M. Tohyama, H. Washizu // Tribology Online. – 2015 (10). – No. 2. – P. 156–161.

7 **Заславский, Ю. С.** Трибология смазочных материалов / Ю. С. Заславский. – Москва : Химия, 1991. – 240 с.

8 **Бурлакова, В. Е.** Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения / В. Е. Бурлакова, Е. Г. Дроган // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 24–30. – DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30.

9 **Кужаров, А. С.** Особенности эволюционного перехода трибологической системы латунь – глицерин – сталь в режим безызностного трения / А. С. Кужаров, Р. М. Марчак // Доклады РАН. – 1997. – Т. 354, № 5. – С. 642–644.

10 Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly / V. E. Burlakova, A. A. Milov, E. G. Droган [et al.] // Journal of Surface Investigation : X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018. – Vol. 12, No. 6. – P. 1108–1116.

11 Mechanical properties and size effects of self-organized film / V. E. Burlakova, A. I. Tyurin, E. G. Droган [et al.] // Journal of Tribology. – 2019. – Vol. 141, Iss. 5. – P. 1–7.

12 Characterization and nano-mechanical properties of tribofilms using Cu nanoparticles as additives / H. L. Yu, Y. Xu, P. J. Shi [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 203, No. 1–2. – P. 28–34.

13 **Кужаров, А. С.** Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса / А. С. Кужаров // Эффект безызносности и триботехнологии. – 1992. – № 2. – С. 3–14.

14 **Гасанов, Б. Г.** Порошковые антифрикционные материалы и смазки для самоорганизующихся узлов трения / Б. Г. Гасанов, А. А. Азаренков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. Спецвыпуск. – С. 118–123. – ISSN 1560-3644.

15 **Дорофеев, Ю. Г.** Конструкционные порошковые материалы и изделия / Ю. Г. Дорофеев, Л. Г. Мариненко, В. И. Устименко. – Москва : Металлургия, 1986. – 144 с.

16 **Ермаков, С. С.** Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 319 с.

17 **Патент № 2823582 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006/01).** Автономный узел трения для испытательного оборудования на трение

parts : Collection of works. – Moscow : Mashinostroenie, 1988. – P. 3–26.

6 **Kajita, S.** Friction modification by shifting of phonon energy dissipation in solid atoms / S. Kajita, M. Tohyama, H. Washizu // Tribology Online. – 2015 (10). – No. 2. – P. 156–161.

7 **Zaslavsky, Yu. S.** Tribology of lubricants / Yu. S. Zaslavsky. – Moscow : Khimiya, 1991. – 240 p.

8 **Burlakova, V. E.** The effect of the concentration of organic acid in the lubricant on the tribological characteristics of a friction pair / V. E. Burlakova, E. G. Droган // Vestnik of Don State Technical University. – 2019. – Vol. 19, No. 1. – P. 24–30. – DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30.

9 **Kuzharov, A. S.** Features of the evolutionary transition of brass-glycerin-steel tribological system to the endless friction mode / A. S. Kuzharov, R. M. Marchak // Reports of the Russian Academy of Sciences. – 1997. – Vol. 354, No. 5. – P. 642–644.

10 Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly / V. E. Burlakova, A. A. Milov, E. G. Droган [et al.] // Journal of Surface Investigation : X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018. – Vol. 12, No. 6. – P. 1108–1116.

11 Mechanical properties and size effects of self-organized film / V. E. Burlakova, A. I. Tyurin, E. G. Droган [et al.] // Journal of Tribology. – 2019. – Vol. 141, Iss. 5. – P. 1–7.

12 Characterization and nano-mechanical properties of tribofilms using Cu nanoparticles as additives / H. L. Yu, Y. Xu, P. J. Shi [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 203, No. 1–2. – P. 28–34.

13 **Kuzharov, A. S.** Physical and chemical bases of lubricating action in the mode of selective transfer / A. S. Kuzharov // Effect of wearlessness and tribotechnology. – 1992. – No. 2. – P. 3–14.

14 **Gasanov, B. G.** Powder antifricition materials and lubricants for self-organizing friction units / B. G. Gasanov, A. A. Azarenkov // University News. North-Caucasian region. Technical sciences. – 2004. Special issue. – P. 118–123. – ISSN 1560-3644.

15 **Dorofeev, Yu. G.** Constructive powder materials and products / Yu. G. Dorofeev, L. G. Marinenko, V. I. Ustimenko // Moscow : Metallurgy, 1986. – 144 p.

16 **Ermakov, S. S.** Powder steels and products / S. S. Ermakov, N. F. Vyaznikov // Leningrad : Mashinostroenie, 1990. – 319 p.

17 **Patent No. 2823582 Russian Federation, IPC G01N 3/56 (2006/01).** Autonomous friction unit for friction and wear testing equipment :

и износ : № 2024109067 : заявл. 04.04.2024 : опубл. 24.07.2024 / Б. Г. Гасанов, А. А. Азаренков, Е. В. Харченко ; заявитель Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – 8 с.

18 **Патент № 2823909 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2006/01).** Машина трения для сравнительных испытаний антифрикционных материалов : № 2024109068 : заявл. 04.04.2024 : опубл. 30.07.2024 / Б. Г. Гасанов, А. А. Азаренков, Е. В. Харченко ; заявитель Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – 8 с.

19 **Жданович, Г. М.** Сопротивление порошковых материалов / Г. М. Жданович. – Минск : Бест-принт, 1999. – 340 с.

20 **Бальшин, М. Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. Ю. Бальшин. – Москва : Металлургия, 1972. – 335 с.

21 **Simič, R.** Adsorption mechanisms for fatty acids on DLC and steel studied by AFM and tribological experiments / R. Simič, M. Kalin // Applied Surface Science, 2013. – Vol. 283. – P. 460–470.

No. 2024109067 : declared. 04.04.2024 : published 24.07.2024 / B. G. Gasanov, A. A. Azarenkov, E. V. Kharchenko ; applicant South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov. – 8 p.

18 **Patent No. 2823909 Russian Federation, IPC G01N 3/56 (2006/01).** Friction machine for comparative tests of antifricition materials : No. 2024109068 : declared 04.04.2024 : published 30.07.2024 / B. G. Gasanov, A. A. Azarenkov, E. V. Kharchenko ; applicant South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M. I. Platov. – 8 p.

19 **Zhdanovich, G. M.** Resistance of powder materials / G. M. Zhdanovich. – Minsk : Best-print, 1999. – 340 p.

20 **Balshin, M. Yu.** Scientific foundations of Powder Metallurgy and Fiber Metallurgy / M. Yu. Balshin // Moscow : Metallurgy, 1972. – 335 p.

21 **Simič, R.** Adsorption mechanisms for fatty acids on DLC and steel studied by AFM and tribological experiments / R. Simič, M. Kalin // Applied Surface Science, 2013. – Vol. 283. – P. 460–470.

B. G. Gasanov, E. V. Kharchenko, G. G. Panchvidze

IMPROVING THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POWDERED IRON-COPPER-GRAPHITE ALLOYS

Abstract. The effect of the chemical composition of lubricants containing surfactants on the coefficient of friction, temperature, and linear wear of iron-based powder antifricition alloys is shown.

The conducted research has shown that saturation of porous structures made of Fe, Fe + Cu and Fe + 2.5% Cu + 2% Gr with lubricants based on carboxylic acids or other surfactants (surfactants), followed by their application in the area of contact of rubbing elements, significantly improves the tribological characteristics of the studied powder materials. The experiments demonstrated that the use of a mixture of mineral oil I-20A and an alcohol solution of oleic acid as a lubricant lead to a significant reduction in the break-in period of the samples, by approximately 4-6 times. In addition, there is a decrease in the coefficient of friction, which does not exceed 0.01-0.007 in a stable mode, after which the system practically switches to a mode of operation with minimal wear.

Using the electron probing microanalysis, the features of the formation of intermediate structures improving tribological properties of powder materials based on iron-copper-graphite, as well as the influence and composition of lubricants containing surfactants on microstructure of the surface layer of friction pairs were determined.

Keywords: powdered antifricition materials, intermediate structures, tribological properties, surfactants, and self-organizing systems.

For citation: Gasanov, B. G. Improving the tribological characteristics of powdered iron-copper-graphite alloys / B. G. Gasanov, E. V. Kharchenko, G. G. Panchvidze // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 161–175. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_161.

Сведения об авторах**Гасанов Бадрудин Гасанович**

Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, Новочеркасск,
кафедра «Автомобили
и транспортно-технологические
комплексы»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: gasanov.bg@gmail.com

Харченко Евгений Вячеславович

Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, Новочеркасск,
кафедра «Автомобили
и транспортно-технологические
комплексы»,
старший преподаватель,
e-mail: hariton_n@mail.ru

Панчвидзе Георгий Гелаевич

Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М. И. Платова, Новочеркасск,
кафедра «Автомобили
и транспортно-технологические
комплексы»,
аспирант,
e-mail: gelapan15@yandex.ru

Information about the authors**Gasanov Badrudin Gasanovich,**

South-Russian State Polytechnic University (NPI)
named by M. I. Platov, Novocherkassk,
Chair "Automobiles and Transport-Technological
Complexes",
Doctor of Engineering Science, Professor,
e-mail: gasanov.bg@gmail.com

Kharchenko Evgeniy Vyacheslavovich

South-Russian State Polytechnic University (NPI)
named by M. I. Platov, Novocherkassk,
Chair "Automobiles and Transport-Technological
Complexes",
Senior Lecturer,
email: hariton_n@mail.ru.

Panchvidze Giorgiy Gelaevich

South-Russian State Polytechnic University (NPI)
named by M. I. Platov, Novocherkassk,
Chair "Automobiles and Transport-Technological
Complexes",
Postgraduate Student,
e-mail: gelapan15@yandex.ru