

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.762.4:621.318.12
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-114-126



ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВЫХ ЖЕЛЕЗОМЕДНОГРАФИТОВЫХ СПЛАВОВ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДИФфуЗИОННЫЙ МАССОПЕРЕНОС И ТРИБОСИНТЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТРУКТУР В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

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

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия

Аннотация. В работе проведен анализ триботехнических свойства антифрикционных материалов на основе порошковых железомеднографитовых сплавов различного состава в зависимости от термической обработки образцов, применяемого смазочного материала и влияния состава поверхностно-активных веществ (ПАВ) в смазочных композициях на формирование промежуточных структур смазочной пленки в зоне контакта пар трения. С помощью методов электронного зондирования изучены виды промежуточных структур (пленок), а также микроструктура поверхностных слоев образцов железомеднографитовых сплавов. Показано, что для повышения триботехнических свойств порошковых сплавов на основе Fe-Cu-Gr и Fe-Br-Gr целесообразно добавить в смазочные материалы растворы карбоновых кислот или других поверхностно-активных веществ. Установлено, что время приработки пар трения «колодка – вал» в случае использования в качестве смазочных материалов смеси масла И-40 и спиртового раствора олеиновой кислоты у образцов порошковых железомеднографитовых сплавов с пористостью 18-22% уменьшается в 4-6 раз, а коэффициент трения в установившемся режиме в 2,2-2,5 раза и в дальнейшем переходит в безыносный режим работы. Установлено, что закалка после спекания железомеднографитовых композиций, содержащих более 3-5% Cu, активирует трибосинтез промежуточных структур и самоорганизацию в парах трения. Определено влияние концентрации графита на кинетику диффузионного массопереноса меди и коэффициенты взаимной диффузии в порошковых сплавах Fe-Cu-Gr, проанализировано процентное распределение меди в межчастичных контактах в сплаве Fe-5%Cu при различных вариантах термической обработки, что позволяет определить распределение меди в спеченных антифрикционных материалах, прогнозировать их структурообразование и свойства изделий из них.

Ключевые слова: узел трения, триботехнические свойства, трибосинтез, железомеднографитовые порошковые сплавы, химический состав, промежуточные структуры, смазочные материалы, поверхностно-активные вещества, карбоновые кислоты, диффузионный массоперенос

© Гасанов Б.Г., Азаренков А.А., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г., 2023

Для цитирования

Влияние химического состава порошковых железомеднографитовых сплавов и смазочных материалов на диффузионный массоперенос и трибосинтез промежуточных структур в узлах трения / Гасанов Б.Г., Азаренков А.А., Харченко Е.В., Панчвидзе Г.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 114-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-114-126>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF FE-CU-GR POWDER ALLOYS AND LUBRICANTS ON DIFFUSION MASS TRANSFER AND TRIBOSYNTHESIS OF INTERMEDIATE STRUCTURES IN FRICTION UNITS

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

Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia

Abstract. The paper analyzes the tribotechnical properties of antifriction materials based on powder iron-copper-graphite alloys of various compositions depending on the heat treatment of the samples, the lubricant used and the influence of the composition of surface-active substances (surfactants) in lubricant compositions on the formation of intermediate structures of the lubricating film in the contact zone of friction pairs. Electron probing methods were used to study types of the intermediate structures (films), as well as the microstructure of the surface layers of iron-copper-graphite alloy samples. It has been shown that to improve the tribotechnical properties of powder alloys based on Fe-Cu-Gr and Fe-Br-Gr, it is appropriate to add solutions of carboxylic acids or other surfactants into lubricants. It has been established that breaking-in time of friction pairs “block – shaft” in case of using a mixture of I-40 oil and an alcohol solution of oleic acid as lubricants, for the iron-copper-graphite powder alloy samples with a porosity of 18-22% decreases by 4-6 times, and the friction coefficient decreases by 2.2-2.5 times, and the system goes into a wear-free operation mode. It has been established that quenching after sintering of iron-copper-graphite compositions containing over 3-5% Cu activates tribosynthesis of intermediate structures and self-organization in friction pairs. The authors determined the effect of the graphite concentration on kinetics of diffusion mass transfer of copper and on the coefficients of interdiffusion and in Fe-Cu-Gr powder alloys, and analyzed the percentage distribution of copper in interparticle contacts in the Fe-5%Cu alloy in various heat treatment options to determine the distribution of copper in sintered antifriction materials, predict their structure formation and properties of products made from them.

Keywords: friction unit, tribotechnical properties, tribosynthesis, iron-copper-graphite powder alloys, chemical composition, intermediate structures, lubricants, surfactants, carboxylic acids, diffusion mass transfer

For citation

Gasanov B.G., Azarenkov A.A., Kharchenko E.V., Panchvidze G.G. Influence of the Chemical Composition of Fe-Cu-Gr Powder Alloys and Lubricants on Diffusion Mass Transfer and Tribosynthesis of Intermediate Structures in Friction Units. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 114-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-114-126>

Введение

Важным направлением развития порошкового трибоматериаловедения является разработка инновационных технологий, отличающихся от известных способностью снижать коэффициент трения и значительно уменьшать или исключать износ в результате трибосинтеза нанопокровов на контактных поверхностях [1-3]. Для этого необходимо активировать на трущихся поверхностях деталей пары трения избирательного переноса с образованием защитных сервовитных и сёрфинг-пленок [4-7]. Известно, что под действием поверхностно активных веществ (ПАВ) при трении протекает избирательное анодное растворение некоторых компонентов, содержащихся в антифрикционных медных сплавах [8, 9]. Атомы таких компонентов попадают в смазочный материал, а в поверхностном слое антифрикционных сплавов на основе меди повышается концентрация пористых микровключений

меди [10, 11]. При наличии в смазочных материалах поверхностно-активных веществ наночастицы меди легко взаимодействуют с поверхностью контртела, покрывая ее тонким сервослоем, что позволяет создать самоорганизующие узлы трения [10-13].

Физическая природа механизма трибосинтеза наноструктур в узлах трения при использовании наиболее широко применяемых порошковых антифрикционных материалов на основе Fe-Cu-Gr мало изучена. Поэтому актуальны исследования по изучению механизма формирования промежуточных структур при использовании для их пропитки смазочных материалов, содержащих ПАВ.

Целью данной работы является изучение влияния состава ПАВ в смазочных материалах и химического состава порошковых сплавов на основе системы Fe-Cu-Gr на кинетику трибосинтеза промежуточных наноструктур и разработка методов создания самоорганизующихся триботехнических систем.

Материалы и методика исследований

Спеченные кольцевые образцы с остаточной пористостью в пределах 15-25% получали из смеси порошков на основе Fe-Cu, Fe-Br, Fe-Cu-Gr и Fe-Br-Gr с содержанием порошков бронзы и меди в пределах 1-30% и графита 1-10% (мас). Триботехнические испытания проводили на модернизированной машине трения типа МИ-1. Образцы после спекания в защитных газовых средах в интервале 1000-1200°C выдержкой 2-5 ч пропитывали при 90-100°C в течение 30-180 мин маслами И-20 и И-40, спиртовыми растворами некоторых карбоновых кислот и их смесью с указанными маслами.

Микроструктуру изучали на металлографическом микроскопе «Altamі MET-1M» и электронном растровом микроскопе Quanta 200. Микро-рентгеноспектральный анализ проводили в центре коллективного пользования ЮРГПУ (НПИ) на установках LScanVer 1100 и Tescan VEGA II LMU, оснащенной системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT производства фирмы OXFORD Instruments Analytical.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования показали, что коэффициент трения f спеченного железа пористостью 15-22%, пропитанных маслом И-20 с добавками глици-

рина (20%), составлял 0,12-0,17, а износ при давлении 5 МПа в процессе приработки в течение 1 ч достигал до 0,2-0,3 мм. В случае пропитки образцов из шихты Fe-2,5%Cu смесью масла И-20 и глицерина коэффициент трения снижается в установившемся режиме с 0,14 до 0,01 (рис. 1, кривая 1), а абсолютный износ материала на стадии приработки в зависимости от химического состава ПАВ составлял 0,15-0,2 мм. В установившемся режиме износ всех образцов не превышал погрешности измерений. В случае введения в шихту порошка бронзы ОЦС 5-5-5 и пропитки образцов смесью глицерина и масла И-20 коэффициент трения стабилизируется при содержании от 2,5 до 5% бронзы. В частности, после испытания образцов, содержащих 2,5% порошка бронзы, в течение 30 мин f снижается с 0,13 до 0,09 (рис. 1, кривая 2), а износ на стадии приработки составляет 0,11-0,12 мм. После дальнейшего испытания в течение 8 ч при давлении до 5 МПа и скорости в пределах 0,3-1,0 м/с при установившемся режиме трения износ исследуемых материалов не наблюдался, то есть реализуется безыносный режим трения. У сплавов Fe+2,5%Cu+2% Gr при испытании в тех же условиях f снижается с 0,12 до 0,06-0,07 (рис. 1, кривая 3), а износ образца на стадии приработки составил 0,09-0,10 мм.

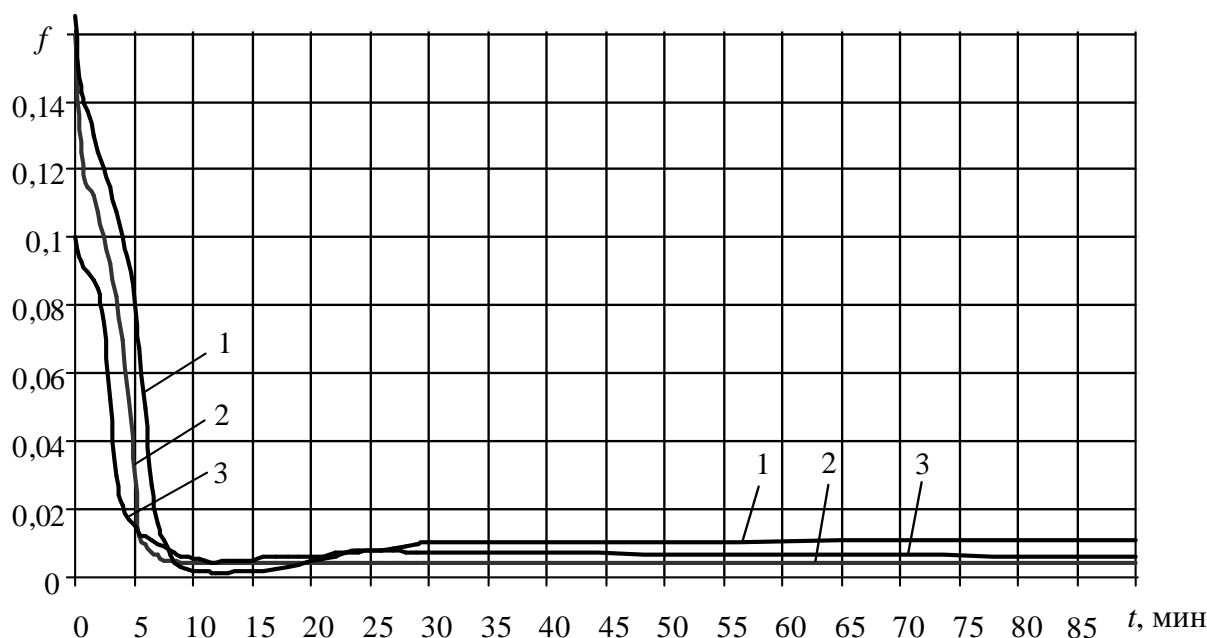


Рис. 1. Влияние времени испытания на коэффициент трения сплавов следующего состава: 1 – Fe+2,5%Cu; 2 – Fe+2,5%BrO5Ts5S5; 3 – Fe+2,5%Cu+2%Gr

Fig. 1. Influence of testing time on the coefficient of friction of the alloys of the following compositions: 1 is Fe+2.5%Cu; 2 is Fe+2.5%BrO5Ts5S5; 3 is Fe+2.5%Cu+2%Gr

При установленном режиме испытания f изменяется в пределах 0,003 до 0,004 с увеличением содержания меди с 2 до 5 мас.%. Однако при добавлении в шихту 9-10% Cu износостойкость заметно ухудшается из-за активного переноса нерастворившихся в железе частиц меди из порошковых сплавов на поверхность стального вала, что приводит к схватыванию частиц меди в порах трения.

Для исследования противоизносных действий смазочных материалов, содержащих карбоновые кислоты, на стадии приработки часть спеченных образцов пористостью в пределах 15-20% пропитывали минеральным маслом И-40 при 90°C в течение 2 ч, а в процессе испытания через каждые 5 мин капельным методом подавая спиртовые растворы олеиновой, себадиновой, стеариновой и других карбоновых кислот в зону контакта «порошковая колодка – вал».

В случае использования в качестве смазочного материала раствора олеиновой кислоты в этиловом спирте (30:70) время приработки образцов при нагрузке 500 Н составило около 10 мин, коэффициент трения снизился с 0,17 до 0,055-0,065 (рис. 2, а), но линейный износ образцов из смеси Fe+2,5%Cu+2% Gr не превышает 0,02 мм (рис. 2, в), что в 3-4 раза меньше, чем при использовании в качестве ПАВ глицерина, и 2-3 раза меньше, чем при испытании пропитанных только индустриальным маслом. При испытании образцов из указанной шихты, не пропитанных маслом И-20, только олеиновой кислотой коэффициент трения после приработки также снижается до 0,05-0,055, но через 2 ч работы он повысился до 0,07, линейный износ не превышал при этом 0,03-0,033 мм.

Исследования показали, что в процессе испытания образцов из сплава Fe+2,5%Cu+2%Gr, пропитанных смесью масла И-40 и спиртового раствора олеиновой кислоты, промежуточные соединения синтезируются быстрее, чем при использовании только масла И-40. Это связано с тем, что в процессе испытания на поверхности спеченных железомеднографитовых композиций, особенно медных частиц, образуется большое количество активных центров, благодаря дефектности их структуры, а также в результате активации трибохимических реакций в сочетании с электрохимическими эффектами, характерными для режима безызносного трения [7-10]. Поэтому продолжительность периода приработки исследуемой пары трения уменьшается в 4-5 раз. Безызносность при использовании в качестве ПАВ ука-

занных карбоновых кислот также связана с образованием на поверхностях пар трения промежуточных структур, таких как сервовитная и сёрфинг-плёнки (рис. 3), которые блокируют возникновение металлических связей между частицами порошков меди и железа со стальной поверхностью вала. Этим можно объяснить в первую очередь снижение коэффициента трения и линейного износа при добавлении в индустриальное масло раствора олеиновой кислоты.

Как следует из рис. 3, на порах и графитовых включениях, расположенных на поверхности трения порошковых образцов, металлосодержащие нанопленки, появившиеся в результате трибодеструкции, легко разрушаются даже при исследовании на РЭМ после испытания образцов. Это можно объяснить тем, что в процессе испытания на них не образуются устойчивые комплексные металлические соединения, связанные с матрицей сплава, а концентрация меди (светлый фон на рис. 3, б) в таких пленках значительно меньше, чем на поверхности частиц материала (темный фон на рис. 3, б).

При увеличении концентрации меди в шихте выше 5,0% и одноразовой пропиткой смесью, содержащей в качестве ПАВ олеиновую кислоту и индустриальное масло, наблюдали кратковременные колебания коэффициента трения после периода приработки. Особенно это проявляется при испытании сплавов, содержащих более 8,0-10,0 мас.% Cu. Для выявления причин колебаний триботехнических свойств материалов на основе системы Fe+Cu+Gr при использовании в качестве смазки исследуемых карбоновых кислот изучали влияние графита и меди на кинетику формирования структуры и протекания диффузионных процессов при спекании образцов с различным содержанием компонентов.

При увеличении концентрации меди в шихте выше 5,0% и одноразовой пропиткой смесью, содержащей в качестве ПАВ олеиновую кислоту и индустриальное масло, наблюдали кратковременные колебания коэффициента трения после периода приработки. Особенно это проявляется при испытании сплавов, содержащих более 8,0-10,0 мас.% Cu. Для выявления причин колебаний триботехнических свойств материалов на основе системы Fe+Cu+Gr при использовании в качестве смазки исследуемых карбоновых кислот изучали влияние графита и меди на кинетику формирования структуры и протекания диффузионных процессов при спекании образцов с различным содержанием компонентов.

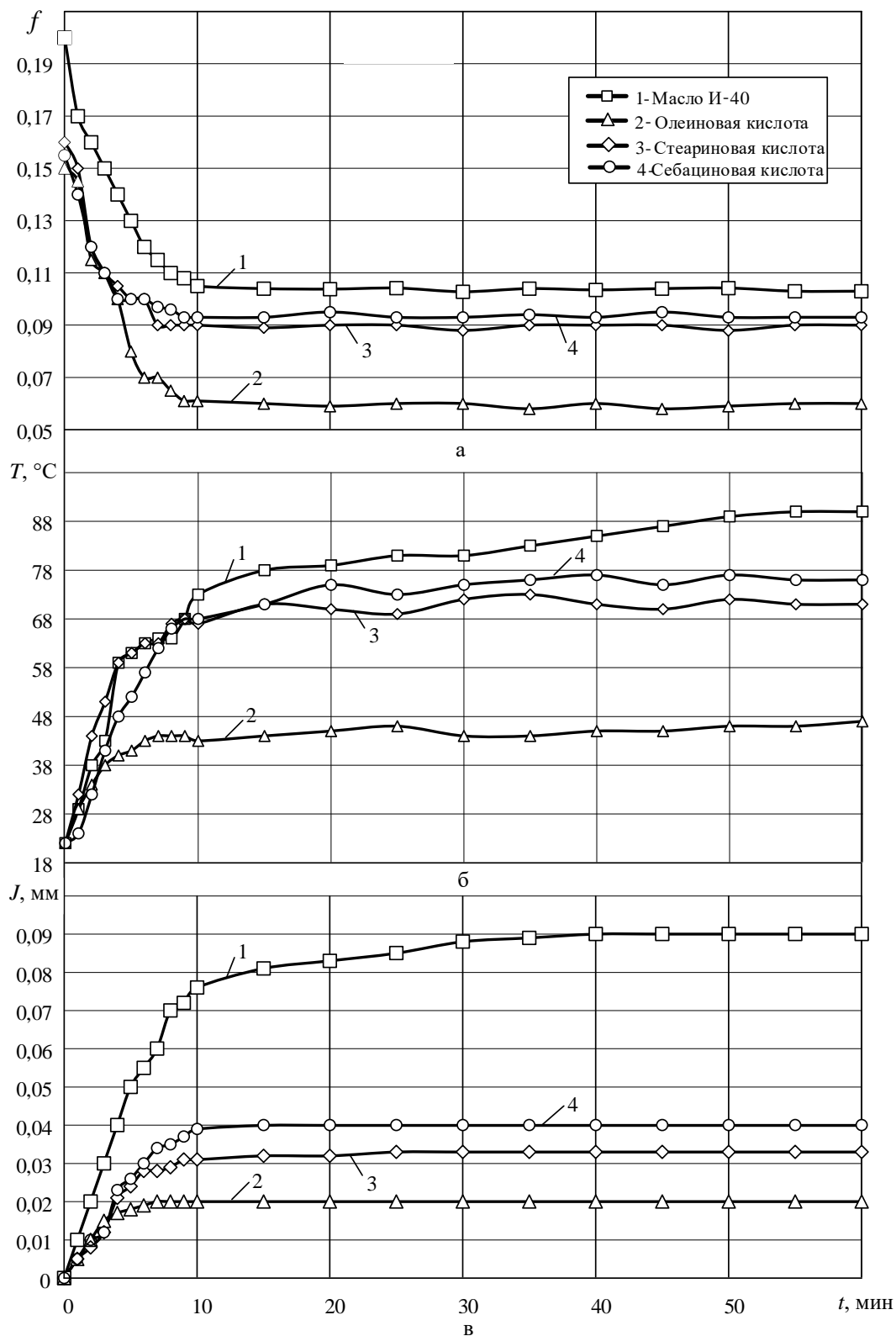
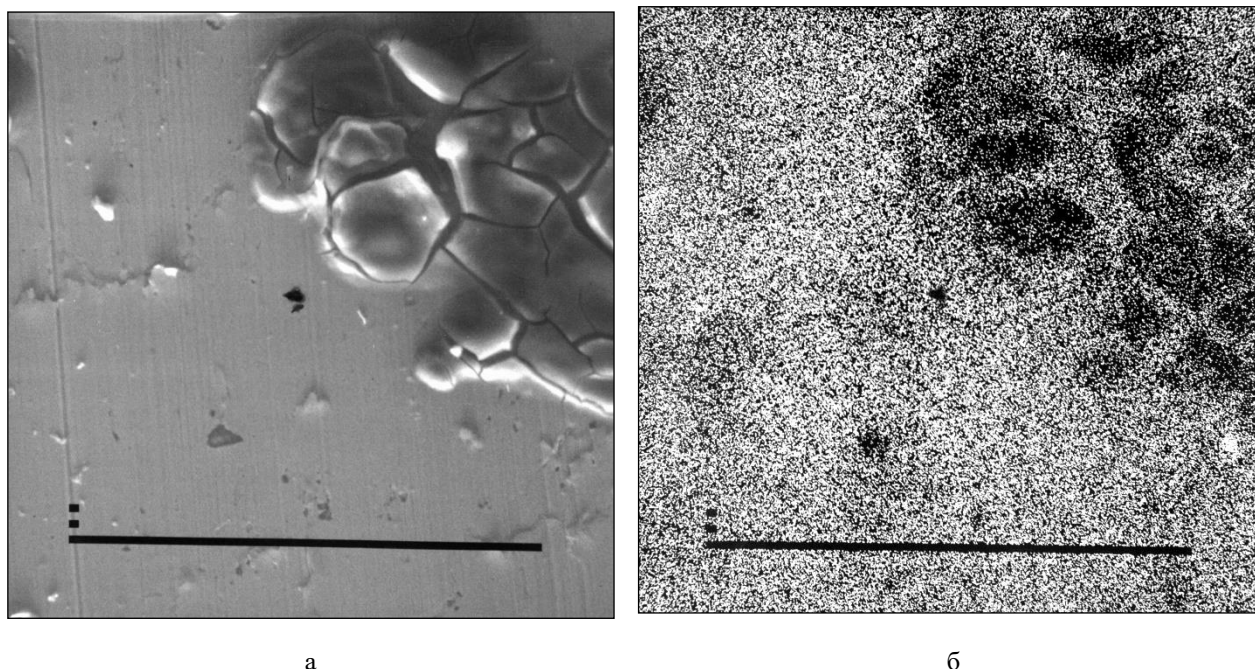


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (а), температуры (б) и линейного износа (в) образцов из смеси Fe+2,5%Cu+2% Gr от времени испытания и содержания в смазочных материалах карбоновых кислот: 1 – 0; 2 – олеиновой; 3 – стеариновой; 4 – себациновой

Fig. 2. Variation in the coefficient of friction (а), temperature (б) and linear wear (в) of the samples from a mixture of Fe+2.5%Cu+2% Gr with respect to testing time and content of carboxylic acids in lubricants: 1 is 0; 2 is oleic acid; 3 is stearic acid; 4 is sebacic acid



а

б

Рис. 3. Вид промежуточных структур-пленок, полученные методом электронного зонда поверхности трения сплава Fe+2,5%Cu+2%Гр: а – во вторичных электронах; б – в Cu K α -излучении

Fig. 3. Intermediate structures-films obtained by the electron probe method of the friction surface of alloy Fe+2.5%Cu+2%Gr: a is in secondary electrons, б is in Cu K α radiation

Согласно диаграмме состояния Fe-Cu при температуре 1150°C в γ -железе растворяется 7,5-8 мас.%, а при 20°C – около 0,2 мас.%. Поскольку пористые порошковые материалы отличаются высокой дефектностью, то в спеченных железомедных сплавах растворяется значительно больше меди, чем в литых сталях. Это подтверждают результаты изучения микроструктуры разными методами исследованного железомедного сплава, содержащего 5% Cu, после спекания при 1050 и 1150°C в течение 3 ч. Как видно из **рис. 4, а**, частица меди при твердофазном спекании частично растворилась в железе, а при жидкофазном спекании медные частицы практически полностью растворятся в порошках железа (**рис. 4, б**). По кривым интенсивности распределения меди в образцах, спеченных при 1150°C, можно сделать вывод о том, что средняя концентрация меди в закаленных после спекания образцах составляет около 5% по всему объёму, но атомы меди и железа неравномерно распределены в их частицах. Например, среднее содержание меди в частицах железа не превышает 3-4%.

Было выявлено, что концентрация графита существенно влияет на кинетику диффузионного массопереноса в системе Fe-Cu-Gr. После

жидкофазного спекания и последующего медленного охлаждения (вместе с печью) сплав Fe-5%Cu-2%Gr имеет гетерогенную структуру, состоящую из пересыщенного твёрдого раствора меди в α -железе, отдельных частиц с повышенным содержанием Cu и дисперсных включений меди, выделившихся из твёрдого раствора γ -железа при охлаждении (**рис. 5**). Если после жидкофазного спекания сплава, содержащего 5% меди, провести закалку, то в образцах не обнаружили свободных частиц меди. Однако имеются участки с более высокой концентрацией меди, которые трудно выявить на микроструктурах образцов, полученных во вторичных электронах (**рис. 5, а**), и хорошо различаются в Cu K α -излучении (**рис. 5, б**), так как имеют светлый фон.

Экспериментальные исследования показывают, что на механизм трибосинтеза промежуточных пленок влияет не только состав смазки и антифрикционного материала, но и распределение графита в нем. В присутствии графита частицы железа даже после жидкофазного спекания не везде покрываются пленкой меди. Некоторые частицы меди, окруженные графитом (светлый фон на **рис. 6, б**), практически не растворились в частицах железа.

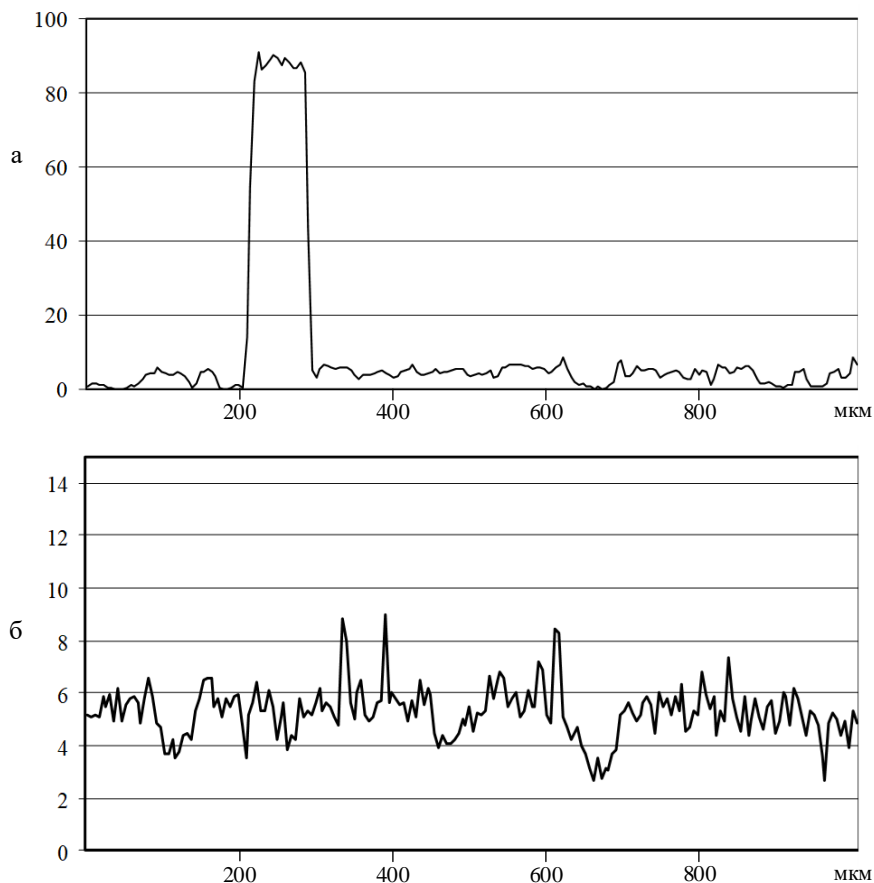


Рис. 4. Распределение Cu, ат. %, в зонах межчастичных контактов в сплаве Fe+5%Cu после твердофазного (а) и жидкофазного спекания и закалки (б)

Fig. 4. Distribution of Cu, at %, in the zones of interparticle contacts in alloy Fe+5%Cu after solid phase (a) and liquid phase sintering and quenching (б)

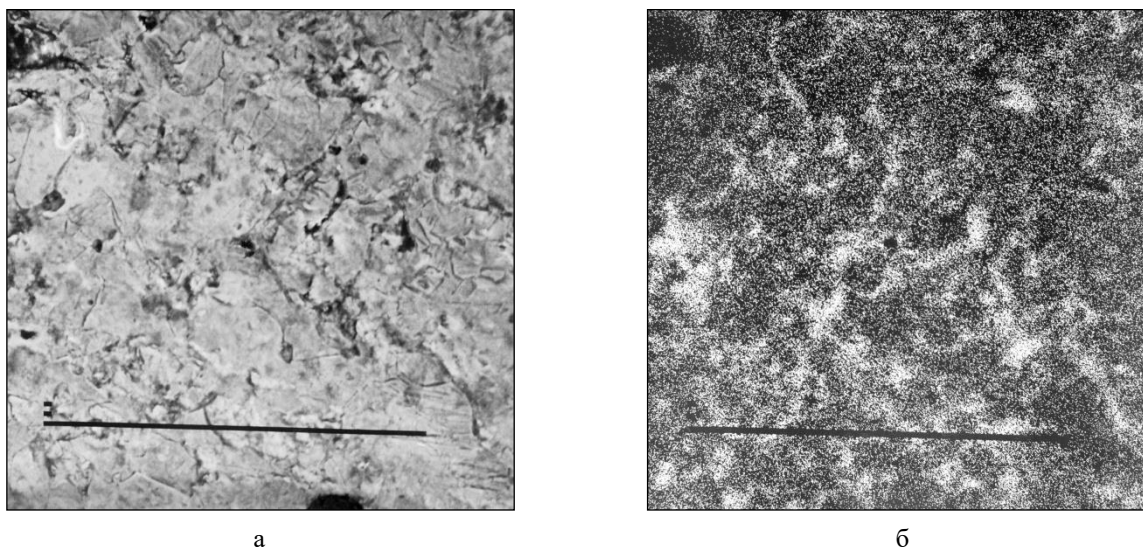
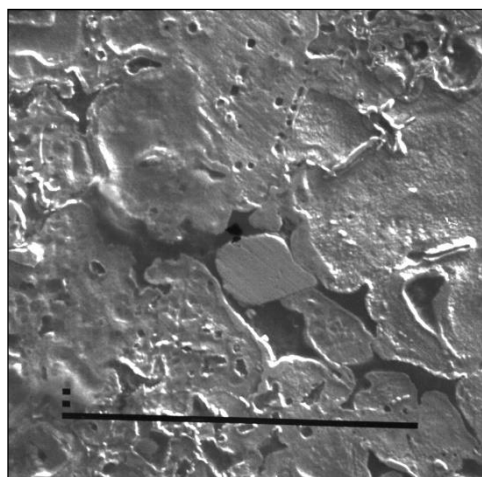
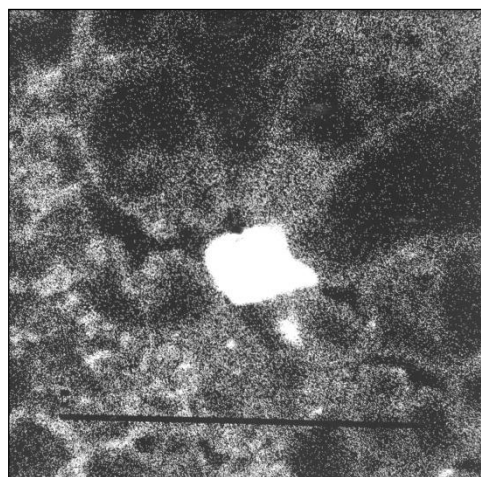


Рис. 5. Микроструктуры образцов из сплава Fe+5%Cu+2%Gr, закаленных в воде после спекания при 1150°C, снятые: а – во вторичных электронах; б – в Cu K_α-излучении

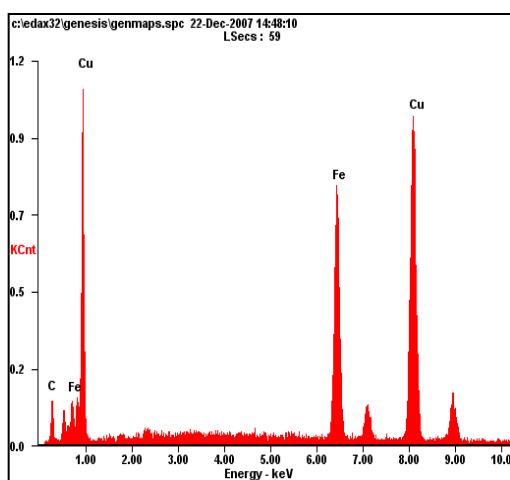
Fig. 5. Microstructures of the Fe+5%Cu+2%Gr alloy samples quenched in water after sintering at 1150°C taken: a is in secondary electrons; б is in Cu K_α radiation



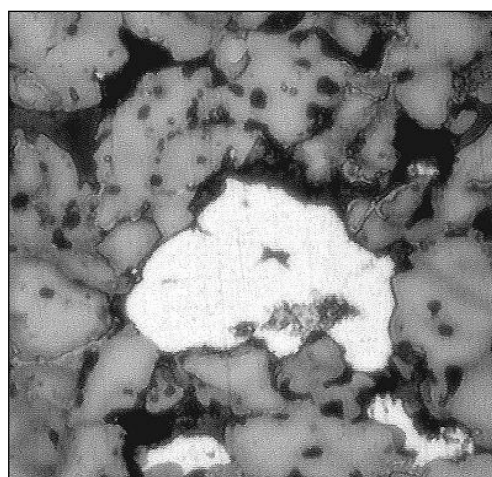
а



б



в



г

Рис. 6. Микроструктуры и распределение компонентов в закаленном сплаве Fe+5%Cu+2%Гр после жидкофазного спекания, снятые: а – во вторичных электронах; б – в Cu K_α-излучении; в – на спектрометре; г – на оптическом микроскопе

Fig. 6. Microstructures and the distribution of components in quenched alloy Fe+5%Cu+2%Gr after liquid phase sintering taken: а is in secondary electrons; б is in Cu K_α radiation; в is on the spectrometer; г is under the optical microscope

Экспериментально было установлено, что износостойкость спеченных и закаленных после спекания образцов из шихты, содержащего 2% Гр и 2-4% Cu, практически не отличается. Однако коэффициент трения в установившемся режиме трения у закаленных образцов составляет 0,06, что незначительно отличается по сравнению со спеченными образцами ($f = 0,04 - 0,045$). В случае повышения содержания меди в шихте более 5% у закаленных после спекания образцов коэффициент трения и интенсивность износа заметно ниже в процессе приработки. Однако продолжительность периода приработки незначительно отличается в обоих случаях, разница не

превышает погрешности измерений и составляет в среднем 8-9 мин. Нужно отметить, что в установившемся режиме коэффициент трения закаленных после спекания образцов колебался в пределах 0,06-0,065.

На рис. 7 показано влияние концентрации меди в шихте на линейный износ образцов, полученных из смеси Fe-Cu-Гр, содержащей 2% графита, после пропитки в течение 1 ч при 90°C смесью промышленного масла И-40 и раствора олеиновой кислоты в спирте в пропорции 1:1.

Анализ экспериментальных результатов показал, что в случае добавления в шихту порошка меди от 5 до 10% линейный износ I при давлении

10 МПа спеченных образцов возрастает интенсивно с 0,08 до 0,56 мм, тогда как у образцов, содержащих 10% Cu и закаленных после спекания, величина I не превышает 0,18-0,2 мм (рис. 7, кривые 1 и 2). Кроме этого время приработки закаленных образцов, содержащих более 5% Cu не превышает 13-15 мин, а у спеченных материалов такого же состава оно составляет около 50-60 мин. Такое влияние содержания меди в сплавах на износостойкость и прирабатываемость можно объяснить тем, что после твердофазного спекания структура материала отличается большим содержанием частиц свободной меди, которые имеют низкую твердость и стимулируют микросхватывание с включениями меди, перенесенными в процессе приработки на поверхность вала из стали У8. При наличии свободной меди в спеченных железомеднографитовых композициях повышается температура в зоне трения, что влияет на синтез промежуточных структур из комплексных соединений и снижает износостойкость антифрикционных материалов.

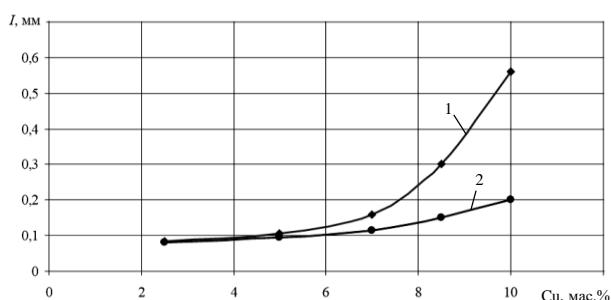


Рис. 7. Зависимости линейного износа образцов в течение 90 мин от концентрации меди в системе Fe-Cu-2%Gr после: 1 – спекания; 2 – спекания и закалки

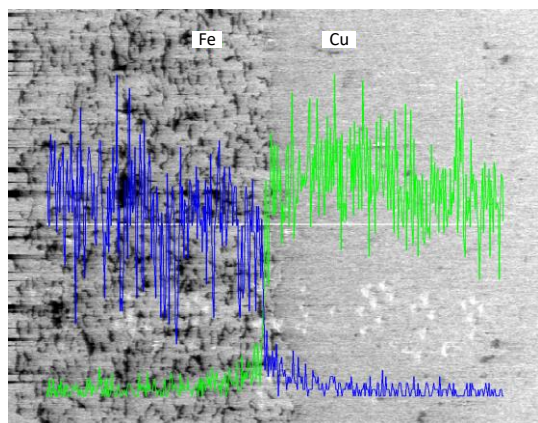
Fig. 7. Variation in linear wear of the samples during 90 min with respect to the concentration of copper in Fe-Cu-2%Gr after: 1 is sintering; 2 is sintering and quenching

Как это показано на рис. 5, в случае закалки непосредственно после спекания в структуре антифрикционного материала отсутствуют свободные включения меди, так как она практически растворяется в γ -железе и заполняет микропоры на поверхности частиц железа. Поэтому твердость матрицы закаленных сплавов, содержащих более 4-5% Cu, значительно выше, чем у спеченных материалов с аналогичной концентрацией меди, соответственно, износостойкость закаленных образцов заметно больше, чем у спеченных образцов без закалки.

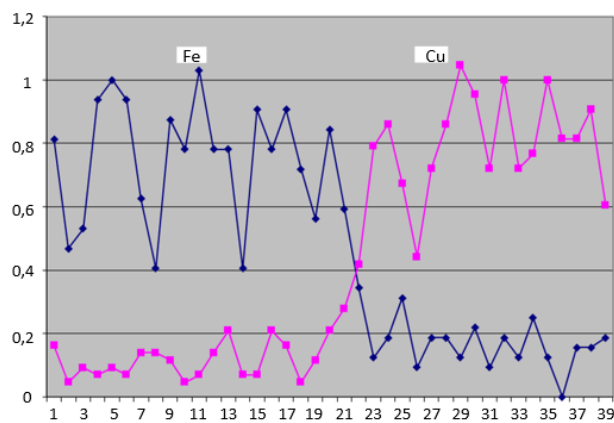
Было выявлено, что при добавлении в смазочный материал карбоновых кислот температура поверхности пар трения на начальном этапе испытания повышается достаточно интенсивно, что активирует триботехнический синтез промежуточных структур (типа сёрфинг-пленок). В условиях установившегося режима трения температура в зоне контакта пар трения при добавлении олеиновой кислоты не превышает 40-45°C (см. рис. 2, б), что обеспечивает стабильность формирования и устойчивость синтезированных пленок, а также объясняет интенсивное снижение коэффициента трения и переход на безыносный режим трения системы. Следовательно, триботехнические свойства порошковых железомеднографитовых композиций с увеличением содержания меди повышаются, с одной стороны, в результате возрастания микротвердости матрицы, а с другой – активацией трибосинтеза промежуточных структур при добавлении в смазочный материал карбоновых кислот, активирующих синтез антифрикционных пленок в процессе трения.

Для исследования влияния химического состава на кинетику диффузионных процессов в системе Fe-Cu-Gr при спекании использовали биметаллические образцы с различным содержанием графита в слоях железа и меди. На рис. 8 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа в зоне диффузии (1 мм) межслойных границ образцов, спеченных при 1150°C в течение 3 ч, содержащих 5% Gr в одном случае в слое железа, а в другом – в слое меди.

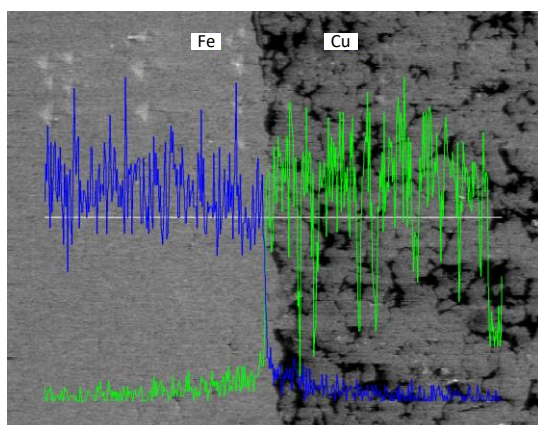
Было установлено, что углерод практически не растворяется в меди. Поэтому на рис. 8 показаны только спектры распределения меди и железа в межслойной границе двухслойных цилиндрических образцов, построенные по характеристическим линиям (рис. 8, а и в) и по количественным показателям их концентрации в исследуемых точках (рис. 8, б и г). Выявлено, что атомы меди и железа достаточно активно диффундируют через межслойные границы и компоненты взаимно растворяются в частицах их порошков. Нужно отметить, что атомы Cu диффундируют в слой из порошка железа без добавок графита на глубину до 110-120 мкм (рис. 8, а и б), тогда как в паре Cu-Fe+5%Gr содержание Cu на расстоянии 10 мкм от начальной границы не превышает 10-15 ат.%, а глубина ее диффузии менее 80-90 мкм (рис. 8, в и г).



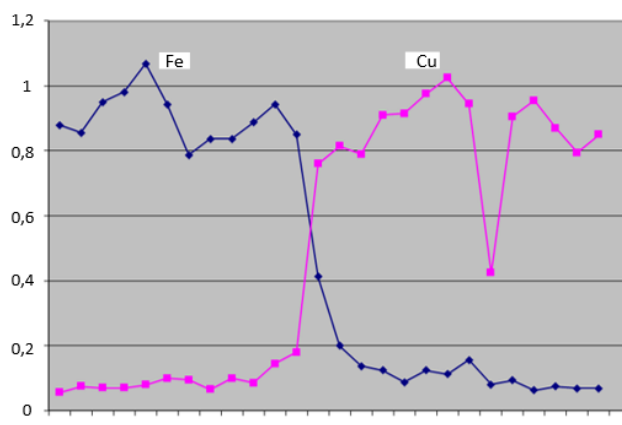
а



б



в



г

Рис. 8. Распределение меди и железа на межслойных границах диффузионных пар:

а, б – Fe+5%Гр-Cu; в, г – Fe-Cu+5%Гр

Fig. 8. Distribution of copper and iron at interlayer boundaries of diffusion pairs:

а, б is Fe+5%Gr-Cu; в, г is Fe-Cu+5%Gr

Из этого следует, что при добавлении в шихту графита частицы железа частично плакируются слоем графита, что влияет на коэффициенты взаимной диффузии меди и железа. Поскольку медь является графитизирующим элементом, то тонкий слой графита на частицах железа может также блокировать диффузию меди в частицы железа. Поскольку поверхность частиц железа хорошо смачивается жидкой медью, то при отсутствии графита в результате действия капиллярных сил (сил поверхностного натяжения) в процессе жидкофазного спекания жидкие включения Cu интенсивно растекаются по свободным сообщающимся порам и поверхности частиц железа. В результате этого концентрация и глубина диффузии атомов меди в слой железа существенно больше, чем в слой железа с добавками графита.

Как видно из рис. 8, медь и железо в порошковых сплавах растворяются друг в друге неравномерно, что исключает использование методов

Мотано или Любова и Максимова для определения коэффициентов их взаимной диффузии в пористых системах (\tilde{D}_n). Поэтому экспериментальные концентрационные кривые сглаживали широко используемыми способами.

Результаты расчетов коэффициентов \tilde{D}_n позволяют сделать вывод о том, в диффузионной паре Cu-Fe без добавления в шихту графита коэффициент взаимной диффузии в слоистых образцах пористостью в пределах 18-20% с повышением содержания меди в шихте с 10 до 50 ат.% интенсивно снижается с $27 \cdot 10^{-12}$ до $11 \cdot 10^{-11}$ м²/с, а далее практически не изменяется (рис. 9, кривая 1). Следовательно, с увеличением концентрации Cu объемная доля железа в шихте снижается, соответственно, уменьшается доля диффузионного массопереноса по поверхности частиц железа, зависящего не только от свободной поверхности пор, но и от ее дефектности.

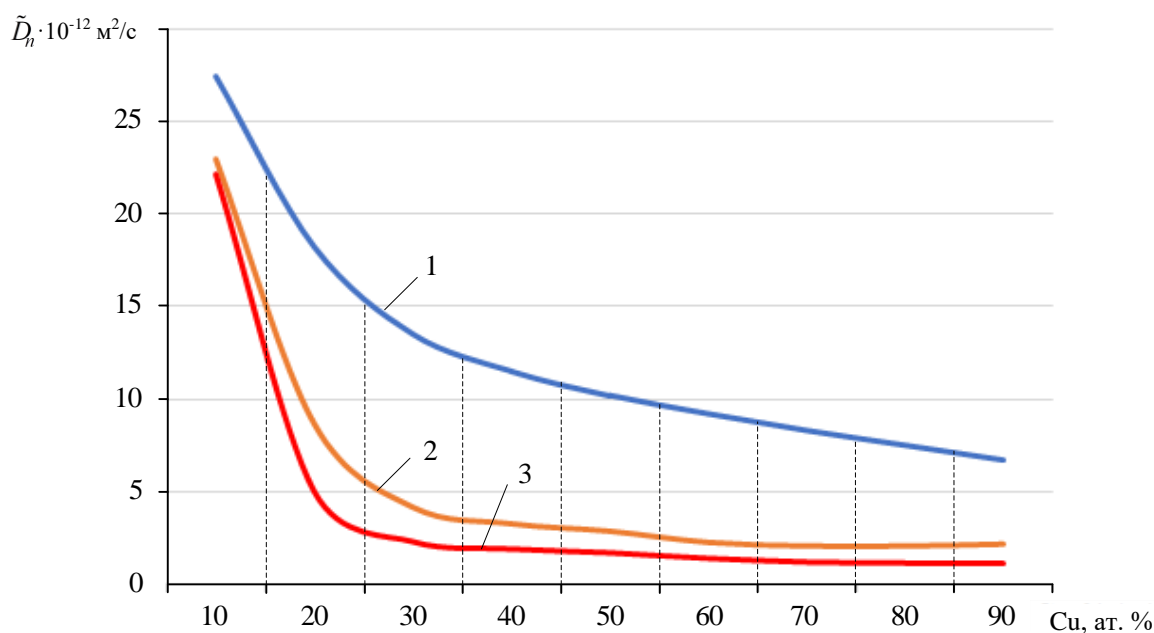


Рис. 9. Значения коэффициентов взаимной диффузии от концентрации Cu системы Fe+Gr-Cu при содержании в слое из порошка железа графита, мас. %: 1 – 0; 2 – 2,5; 3 – 5

Fig. 9. Coefficients of mutual diffusion from the Cu concentration of Fe+Gr-Cu at content in the layer of iron graphite powder, % wt.: 1 is 0; 2 is 2.5, 3 is 5

Расчеты показали, что в беспористой системе Fe-Cu при температуре 1050°C химический коэффициент диффузии (гетеродиффузии) железа в медь D_{Fe}^{Cu} составляет $7,1 \cdot 10^{-14}$ м²/с, а меди в железе – $D_{Cu}^{Fe} = 2,5 \cdot 10^{-15}$ м²/с; при температуре 1150°C коэффициенты $D_{Fe}^{Cu} = 8,2 \cdot 10^{-13}$ м²/с, $D_{Cu}^{Fe} = 1,2 \cdot 10^{-13}$ м²/с. Подставляя приведенные значения химических коэффициентов диффузии в уравнение Даркена ($D_c = D_{Fe}^{Cu} \cdot C_{Fe} + D_{Cu}^{Fe} \cdot C_{Cu}$), определяли коэффициент взаимной диффузии при 1150°C для беспористых систем Fe-Cu при различных концентрациях меди (C_{Cu}) и железа (C_{Fe}). Например, для сплава, содержащего 20% меди, расчетное значение коэффициента диффузии составил $D_c = 6,8 \cdot 10^{-13}$ м²/с.

Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод о том, что в пористых системах Fe-Cu аналогичного состава коэффициенты взаимной диффузии на полтора, два порядка выше, чем в беспористых сплавах.

В случае добавления в порошок железа 5% графита коэффициент взаимной диффузии существенно ниже, чем в паре без графита при любой концентрации меди (рис. 9, кривые 2 и 3). Например, при содержании 5% графита в шихте из порошков железа \tilde{D}_n снижается почти в 10

раз. Это связано с тем, что при приготовлении шихты в конусном смесителе частицы порошков железа обволакиваются графитом, уменьшая площадь металлического контакта между их частицами железа. Кроме этого, графит, по видимому, снижает коэффициент поверхностного натяжения железа и меди.

Нужно отметить, что величины \tilde{D}_n , приведенные на рис. 9, можно использовать для качественной оценки процесса массопереноса при спекании исследованных порошковых систем, а также определить концентрацию меди в твердом растворе в γ -железе в неравновесных системах при различных режимах спекания сплавов на основе Fe-Cu-Gr.

Заключение

1. Отличительной особенностью порошковых сплавов на основе Fe-Cu-Gr и Fe-Br-Gr является существенное снижение времени приработки в парах трения в случае введения в состав пропитываемых смазочных материалов карболовых кислот. В частности, время приработки у образцов из этих сплавов с пористостью 18-22% составляло 6-8 мин, тогда как без ПАВ оно превышает 30-40 мин. Для компактных сплавов (бронз, чугунов и др.) время приработки в 10-15 раз больше, чем у порошковых материалов.

2. Закалка после спекания железомеднографитовых композиций несколько повышает коэффициент трения, значительно снижает время приработки и износ антифрикционных порошковых материалов на основе железа с добавками меди до 8-10%, незначительно снижает износ для материалов с содержанием меди менее 5% и практически не влияет на время их приработки.

3. Показано влияние графита в порошковых сплавах Fe-Cu-Gr на механизмы диффузионного массопереноса меди, что позволяет определить распределение меди в спеченных антифрикционных материалах и прогнозировать их структурообразование и свойства изделий из них. Выявлено, что графит блокирует диффузию меди в частицы железа и способствует увеличению содержания свободной меди, отрицательно влияющей на триботехнические свойства материала.

Список источников

1. Кужаров А.С. Концепция безызносности в современной трибологии // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2014. № 2. С. 23-31.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
3. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности при трении. Механизм формирования граничных слоев на стали в самоорганизующейся трибосистеме «медь – глицерин – сталь» / Кужаров А.С., Бурлакова В.Е., Зодошенко Е.Г., Марчак Р., Кравчик К. // Трение и износ. 1998. Т.19. №6. С. 768-778.
4. Clasen C., Ravehpour H.P. and McRinley G.H. Bridging Tribology and Microrheology of Thin Films // Appl. Rheol. 2010, vol. 20, p. 45049.
5. Поляков С.А. Теоретический анализ основных механизмов эволюции трибосистем при избирательном переносе // Долговечность трущихся деталей машин: сб. тр. М.: Машиностроение, 1988. С. 3-26.
6. Kajita S., Tohyama M., Washizu H. Friction Modification by Shifting of Phonon energy Dissipation in Solid Atoms // Tribology Online. 2015, vol. 10, no. 2, pp. 156-161.
7. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. М.: Химия, 1991. 240 с.
8. Бурлакова В.Е., Дроган Е.Г. Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т.19. №1. С. 24-30.
9. Кужаров А.С., Марчак Р. Особенности эволюционного перехода трибологической системы латунь – глицерин – сталь в режим безызносного трения // Докл. РАН. 1997. Т. 354. №5. С. 642-644.
10. Kragelsky I.V., Alisin V.V. Friction wear lubrication: tribology handbook. Elsevier. 2016. P. 263.
11. Гасанов Б.Г., Азаренков А.А. Порошковые антифрикционные материалы и смазки для самоорганизующихся узлов трения // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2004. Спецвыпуск. С. 118-123.
12. Курбаткин И.И., Кудряшов А.Е. Трибологические характеристики антифрикционных сплавов и процессы массопереноса при работе контактных пар в подшипниках скольжения // Трение и износ. 2011. Т. 36. №6. С. 579-584.
13. Кужаров А.С. Физико-химические основы смазочного действия в режиме избирательного переноса // Эффект безызносности и триботехнологии. 1992. №2. С. 3-14.

References

1. Kuzharov A.S. The concept of wearlessness in modern tribology. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [News of Higher Educational Institutions: North Caucasian Region. Series: Engineering Sciences]. 2014;(2):23-31. (In Russ.)
2. Garkunov D.N. *Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost)* [Tribotechnology (wear and wearlessness). Moscow: Publishing House of Moscow Agricultural Academy, 2001, 616 p. (In Russ.)
3. Kuzharov A.S., Burlakova V.E., Zodoshenko E.G., Marchak R., Kravchik K. Tribo-electrochemistry of the effect of wearlessness during friction. The mechanism of formation of boundary layers on steel in a self-organizing tribosystem “copper – glycerin – steel”. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 1998;19(6):768-778. (In Russ.)
4. Clasen C., Ravehpour H.P., McRinley G.H. Bridging tribology and microrheology of thin films. *Appl. Rheol.* 2010;20:45049.
5. Polyakov S.A. A theoretical analysis of main mechanisms of the evolution of tribosystems during selective transfer. *Dolgovechnost trushchikhsya detaley mashin: sb. trudov* [Durability of rubbing machine parts: collected papers]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, p. 3-26. (In Russ.)
6. Kajita S., Tohyama M., Washizu H. Friction modification by shifting of phonon energy dissipation in solid atoms. *Tribology Online.* 2015;10(2):156-161.
7. Zaslavsky Yu.S. *Tribologiya smazochnykh materialov* [Tribology of lubricants]. Moscow: Khimiya, 1991, 240 p. (In Russ.)
8. Burlakova V.E., Drogan E.G. Influence of the concentration of organic acid in the composition of the lubricant on the tribological characteristics of a friction pair. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Don State Technical University]. 2019;19(1):24-30. (In Russ.)
9. Kuzharov A.S., Marchak R. Peculiarities of the evolutionary transition of the brass-glycerin-steel tribological system to the wear-free friction mode. *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences]. 1997;354(5):642-644. (In Russ.)

10. Kragelsky I.V., Alisin V.V. Friction wear lubrication: tribology handbook. Elsevier, 2016, p. 263
11. Gasanov B.G., Azarenkov A.A. Powder antifriction materials and lubricants for self-organizing friction units. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [News of Higher Educational Institutions: North Caucasian Region. Series: Engineering Sciences]. 2004;(special issue):118-123. (In Russ.)
12. Kurbatkin I.I., Kudryashov A.E. Tribological characteristics of antifriction alloys and mass transfer processes during the operation of contact pairs in plain bearings. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2011;36(6):579-584. (In Russ.)
13. Kuzharov A.S. Physical and chemical bases of the lubricating action in the selective transfer mode. *Effekt bezyznosnosti i tribotekhnologii* [Effect of wearlessness and tribotechnology]. 1992;(2):3-14. (In Russ.)

Поступила 20.02.2023; принята к публикации 26.04.2023; опубликована 27.06.2023
Submitted 20/02/2023; revised 26/04/2023; published 27/06/2023

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: gasanov.bg@gmail.com. ORCID 0000-0001-7610-4541

Азаренков Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: hazikus@mail.ru. ORCID 0000-0003-0687-6751

Харченко Евгений Вячеславович – старший преподаватель, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: hariton_n@mail.ru. ORCID 0000-0003-1884-6437

Панчвидзе Георгий Гелаевич – аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. Email: gelapan15@yandex.ru.

Badrudin G. Gasanov – DrSc (Eng.), Professor, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: gasanov.bg@gmail.com. ORCID 0000-0001-7610-4541

Andrey A. Azarenkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: hazikus@mail.ru. ORCID 0000-0003-0687-6751

Evgeniy V. Kharchenko – Senior Teacher, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: hariton_n@mail.ru. ORCID 0000-0003-1884-6437

Giorgiy G. Panchvidze – postgraduate student, Platov South Russian State Polytechnic University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia. Email: gelapan15@yandex.ru.