

УДК 621.891

## ИЗНОС СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ ПО МЕДИ\*

*Алеутдинова М.И.*<sup>1,2</sup>, к.т.н., научный сотрудник (aleut@ispms.ru)  
*Фадин В.В.*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник (fvv@ispms.ru)  
*Алеутдинов К.А.*<sup>3</sup>, студент

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

<sup>2</sup> Северский технологический институт НИЯУ МИФИ  
(636036, Россия, Томская обл., г. Северск, пр. Коммунистический, 65)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

**Аннотация.** Изучена возможность создания высокопористых композитов состава сталь – графит путем спекания по максимально простой технологии при температуре ниже 1000 °С в электрической печи без вакуума. Основная цель исследования была оценить способность такого композита проявить высокую износостойкость при скольжении по медному контртелу под воздействием электрического тока контактной плотностью более 100 А/см<sup>2</sup>. Порошковая сталь была изготовлена путем восстановления из шлифовального шлама производства подшипников. Композиты имели низкие механические свойства и высокое удельное электрическое сопротивление. Высокая сквозная пористость была показана с помощью оптической металлографии. Триботехническое нагружение композитов было осуществлено по схеме контакта типа вал – колodka со скоростью скольжения 5 м/с и при контактном давлении 0,09 МПа. Было отмечено, что сухое трение этих композитов вызвало появление слоя переноса на поверхности скольжения медного контртела. Это привело к уменьшению электропроводности скользящего электрического контакта и увеличению общей шероховатости поверхности скольжения меди. Пропитка индустриальным маслом пористого каркаса композитов приводила к значительному увеличению удельной поверхностной электрической проводимости контакта и к снижению линейной интенсивности изнашивания по сравнению с этими же характеристиками сухого контакта. Катастрофическое изнашивание в этих условиях начиналось при контактной плотности тока 150 – 200 А/см<sup>2</sup>. Показано, что размещение свинцовой пластины и композита в держатель образца, а также осуществление их совместного скольжения под воздействием электрического тока вызывало дополнительное увеличение электрической проводимости и снижение интенсивности изнашивания до 3 – 11 мкм/км при контактной плотности тока около 250 А/см<sup>2</sup>. Катастрофическое изнашивание в присутствии свинцовой пластины и индустриального масла в зоне контакта начиналось при контактной плотности тока 250 – 300 А/см<sup>2</sup>. Установлено, что любой режим трения не приводил к разрушению поверхности скольжения меди. Зависимость характеристик контакта от концентрации графита не наблюдалась в явном виде. Сделан вывод о перспективности применения восстановленной подшипниковой стали для создания токопроводящих материалов, износостойких под воздействием электрического тока высокой контактной плотности.

**Ключевые слова:** скользящий электрический контакт, поверхностный слой, контактное падение напряжения, удельная поверхностная электрическая проводимость контакта, релаксация напряжений, спеченный композит, поровое пространство, самосмазывающееся трение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-780-786

### ВВЕДЕНИЕ

Высокая износостойкость при скольжении должна быть обеспечена за счет высокой сдвиговой устойчивости структуры поверхностных слоев контактирующих тел. Это условие может выполняться вследствие удовлетворительной релаксации напряжений, возникающих в пятнах контакта. Обычно такая релаксация реализуется путем упругой деформации материала пятна контакта в случае, когда напряжения не превышают предел текучести в зоне трения. Тогда поверхностный слой (ПС) разрушается в условиях многоциклового усталости, что часто достигается за счет его предварительного упрочнения или за счет введения смазки в зону трения, или

другими способами. Однако экстремальное внешнее воздействие на трибосистему должно вызвать неизбежную пластическую деформацию ПС. В этом случае поверхностный слой разрушается и изнашивается в условиях малоциклового усталости, т.е. за счет накопления концентрации структурных дефектов до некоторого критического уровня [1 – 3]. Удовлетворительная релаксация напряжений за счет пластических микросдвигов в окрестности концентраторов напряжений может быть одним из путей уменьшения скорости накопления дефектов в ПС. Это значит, что материал последнего не должен быстро упрочняться, а должен сохранять пластичность в процессе трения. Эти условия могут быть выполнены за счет выбора материалов пары трения, а также за счет создания конструктивных особенностей схемы сопряжения.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 16-48-700434.

Триботехнические композиционные материалы, как правило, имеют структуру спеченного металлического каркаса, содержащего медь, железо (или сталь) и графит в качестве основных структурных составляющих [4 – 7]. Они применяются часто при сухом и граничном трении по контртелам на основе железа или меди. Иногда граничное трение обеспечивают путем самосмазывания, когда поровое пространство композита заполнено смазкой, которая поступает в зону трения [8, 9]. Экстремальные условия для этих материалов могут быть заданы разными входными параметрами трибосистемы: высокими скоростью скольжения и температурой контакта, недостатком смазки и т.п. Определение численных значений этих факторов внешнего воздействия, приводящих к разрушению и износу материала ПС, а также изучение способов уменьшения износа представляет научный интерес.

Скольжение материала при высокой контактной плотности тока является одним из видов экстремального внешнего воздействия на ПС. Сухое скольжение известных токоъемных материалов осуществляется обычно при контактной плотности тока  $j < 60 \text{ А/см}^2$  [10, 11] по медному контртелу. Скольжение с более высокой величиной  $j$  производится в присутствии смазочных материалов (фторопласта) [12], консистентной графитовой смазки [13, 14] и т.п. Удовлетворительная износостойкость достигается за счет особенностей первичной структуры [12]. Высокая износостойкость в контакте токоъемная пластина – контактный провод при высоких скорости скольжения (более 10 м/с) и плотности тока ( $100 – 200 \text{ А/см}^2$ ) обусловлена присутствием смазки и особенностью сопряжения [14]. Эта особенность заключается в том, что номинальная площадь контакта быстро двигается по пластине и по проводу. Таким образом, материал в зоне контакта находится в экстремальных условиях краткое время и не успевает достичь критического состояния. Однако представляет интерес изучить триботехническое поведение материала в более тяжелых условиях, когда его номинальная площадь постоянно находится под воздействием тока плотностью более  $100 \text{ А/см}^2$  при скольжении по меди. Спеченные материалы состава железо – графит или сталь – графит могут служить как

модельные при исследовании в этом направлении. Эти материалы должны иметь высокую пористость, так как скольжение материалов с низкой пористостью по меди вызывает разрушение ее ПС [15, 16]. Спекание материалов проводится в отсутствии кислорода, как правило, в вакууме. Иногда спекание проводится в графитовых контейнерах, где кислород связывается углеродом и образуется угарный газ СО. В этом случае возможна цементация пористого стального каркаса через газовую фазу [17], что не является желательным для достижения высокой электропроводности контакта. Поэтому представляется целесообразным изменить способ защиты порошкового брикета материала от воздействия кислорода и монооксида углерода, но спекание провести в воздушной среде.

Целью настоящей работы является создание высокопористых композитов на основе порошковой подшипниковой стали, спеченных в воздушной среде, а также изучение возможности достижения их высокой износостойкости при скольжении по меди под воздействием электрического тока контактной плотностью выше  $100 \text{ А/см}^2$  в присутствии смазки.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Порошок подшипниковой стали марки ШХ15 был получен восстановлением из шлифовальных отходов производства шариковых подшипников по методике, представленной в работе [18], и служил основой модельных композитов. Порошковые смеси сталь – Гр (Гр – графит) были спрессованы при давлении 550 МПа и помещены в алундовый тигель. После этого тигель был заполнен порошком керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Порошок графита был расположен сверху порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Тигель был помещен в электрическую печь, где было проведено спекание спрессованных смесей при температуре  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. Металлографическое изучение сечения поверхностного слоя проведено на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 1С. Свойства (твердость НВ по Бринеллю, предел прочности  $\sigma$  при изгибе, удельное электросопротивление  $\rho$ , пористость  $\Pi$ ) спеченных композитов определены по стандартным методикам и представлены в таблице.

#### Некоторые свойства модельных порошковых композитов и характеристики их скользящего электроконтакта в режиме самосмазывания при отсутствии свинцовой пластины

##### Some properties of model powder composites and the characteristic of their sliding electric contact under self-lubricating mode at lead plate absence

Материал	НВ, МПа	$\sigma$ , МПа	$\rho$ , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\Pi$ , %	$j$ , $\text{А/см}^2$	$r_s^{-1}$ , $\text{см/см}^2$	$I_h$ , $\text{мкм/км}$
Сталь	246	4	91	36	160	123	0
Сталь – 8 % Гр	264	2	106	43	150	130	22
Сталь – 16 % Гр	340	3	109	45	150	136	33
Сталь – 22 % Гр	173	1	118	52	160	150	38

Интенсивность изнашивания и электропроводность скользящего контакта определены в условиях при переменном токе 50 Гц, давлении  $p = 0,09$  МПа, скорости скольжения  $v = 5$  м/с на машине трения СМТ-1 по схеме вал – колодка (рис. 1, а). Композиты были пропитаны индустриальным маслом марки И-20 при комнатной температуре. Контртелом служила медь марки М1 (99,9 % Cu). Дистанция скольжения составляла 9 км при каждой плотности тока. Линейная интенсивность изнашивания определена как  $I_h = h/L$ , где  $h$  – изменение высоты образца на дистанции скольжения  $L$ . Контактная плотность тока определена как  $j = i/A_a$ ; здесь  $i$  – ток, протекающий через номинальную площадь  $A_a$  контакта.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Низкие значения механических свойств и высокое удельное электросопротивление (см. таблицу) обусловлены высокой пористостью и слабой связью между частицами композита, что связано со спецификой его получения (низкая температура спекания, возможное слабое окисление межчастичных контактов в каркасе, низкое давление прессования и т.п.). Видно также (рис. 1, б), что поровое пространство является сквозным во всех композитах, что приводит к их быстрой пропитке маслом.

В настоящей работе учтено, что свинец часто применяется в качестве твердой смазки и структурной составляющей триботехнического композита [4]. Поэтому было предположено, что свинцовая пластина толщиной 1,5 мм способна быть твердой смазкой и вызвать уменьшение износа, если она изнашивается совместно с образцом (рис. 1, а). Низкие механические свойства и высокое электросопротивление являются причиной быстрого изнашивания непропитанных композитов в присутствии свинцовой пластины и без нее. Кроме того, возникает слой переноса на поверхности скольжения меди, что резко снижает электропроводность контакта и увеличивает ее общую шероховатость. Но разрушение поверхности скольжения меди отсутствует. Это значит, что сухое трение этих композитов не может иметь перспективы для дальнейших экспериментов. Пропитанные маслом композиты в присутствии свинцовой пластины и без нее при скольжении с токоъемом не характеризуются заметными структурными изменениями в ПС (рис. 1, б). Визуально наблюдаются участки меди на поверхности скольжения композитов вследствие переноса. Пропитанные композиты формируют удовлетворительный скользящий электроконтакт в случае неполного заполнения порового пространства маслом. Если поровое пространство заполнено маслом полностью, то возникает слой масла и продуктов его деструкции на поверхности скольжения меди, что вызывает резкое уменьшение электропроводности контакта. Максимальное значение удельной поверхностной

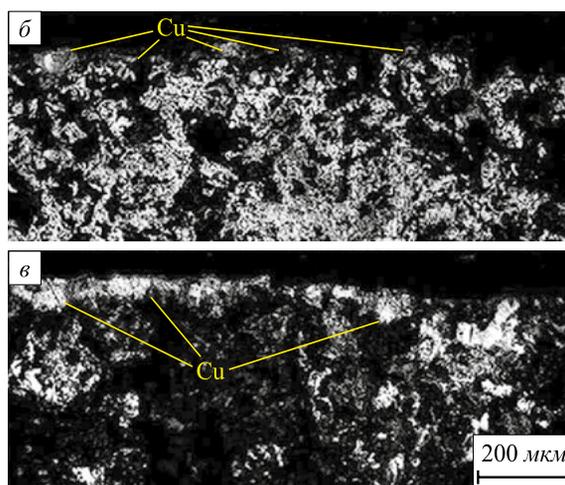
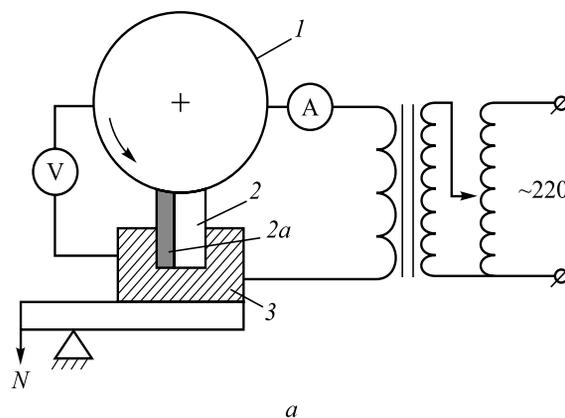


Рис. 1. Принципиальная схема трибосопряжения вал – колодка (а) (1 – контртело (медь М1); 2 – образец-композит; 2а – пластина (Pb); 3 – держатель образца); поверхностный слой и первичная структура of сintered образцов (сталь ШХ15 (б) и композит состава сталь марки ШХ15 – 8 % Gr (в) в сечении, перпендикулярном направлению скольжения при  $j = 150$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 1. Schematic representation of shaft – block tribocoupling (а) (1 – copper counterbody (M1 cooper); 2 – composite specimen; 2а – plate (Pb); 3 – specimen holder); surface layer and primary structure of the sintered specimens in cross-section perpendicular to the sliding direction at  $j = 150$  А/см<sup>2</sup>: б – bearing steel ShKh15, в – composite of bearing steel – 8 % graphite (ShKh15 – 8 %Gr)

электропроводности  $r_s^{-1} = j/U$  (здесь  $U$  – контактное падение напряжения) достигается при отсутствии видимой масляной пленки на поверхности скольжения меди. В этом случае скольжение происходит без образования электроразрядов в зоне контакта. Однако скольжение композитов при отсутствии свинцовой пластины при  $j > 120$  А/см<sup>2</sup> происходит с некоторым разрушением и износом ПС (см. таблицу). Катастрофическое изнашивание наступает при  $j \approx 200$  А/см<sup>2</sup> вследствие быстрого уменьшения количества масла в зоне контакта.

На рис. 2, а видно, что интенсивность изнашивания в присутствии свинца заметно ниже ( $I_h \approx 0$  при  $j \approx 150$  А/см<sup>2</sup>) по сравнению с интенсивностью изнашивания композитов без свинцовой пластины (см. таблицу). Можно видеть также (рис. 2, б), что электропроводность контакта в присутствии свинца также выше

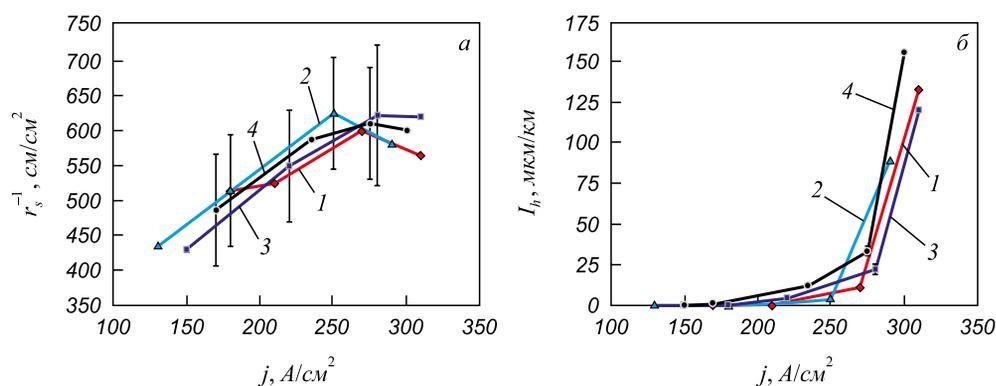


Рис. 2. Влияние контактной плотности тока на интенсивность изнашивания (а) и удельную поверхностную электропроводность (б) электроконтакта композитов на основе подшипниковой стали при скольжении по меди в условиях самосмазывания в присутствии свинцовой пластины:  
1 – ШХ15 + 22 % С; 2 – ШХ15 + 16 % С; 3 – ШХ15 + 8 % С; 4 – ШХ15

Fig. 2. Influence of contact current density on wear intensity (а) and specific surface electric conductivity (б) of electric contact of composites based on bearing steel at sliding against copper under conditions of self-lubrication in the presence of a lead plate:  
1 – ShKh15 + 22 % C; 2 – ShKh15 + 16 % C; 3 – ShKh15 + 8 % C; 4 – ShKh15

по сравнению с величиной  $r_s^{-1}$ , реализованной при скольжении без свинца (см. таблицу). Эти данные позволяют утверждать, что свинец может заметно улучшать характеристики контакта в некоторых случаях.

Полученные сведения (рис. 2, а, б) не дают возможности наблюдать в явном виде влияние концентрации графита на характеристики контакта. Видно лишь, что скольжение с контактной плотностью  $j < 150$  А/см<sup>2</sup> не приводит к заметному разрушению ПС композитов, так как  $I_h \approx 0$  мкм/км. Начало катастрофического изнашивания наблюдается при  $j \approx 300$  А/см<sup>2</sup> (рис. 2, а, б) и также не зависит от концентрации графита. Катастрофическое изнашивание начинается вследствие повышения средней температуры контакта до уровня, когда масло интенсивно испаряется, не обеспечивает удовлетворительную смазку и зона контакта нагревается до температуры более 700 °С (наблюдается визуально). Этот процесс проявляется появлением отрицательного наклона кривой  $r_s^{-1}(j)$  и резкого возрастания величины  $I_h$ .

Низкие механические свойства представленных композитов обусловлены низкой прочностью межчастичных контактов, но в них локализуется деформация. Это характерно для порошковых материалов при любых видах нагружения, в частности при нагружении трением. Отсюда следует, что низкая величина  $I_h$  при  $j < 300$  А/см<sup>2</sup> может указывать на возникновение низких напряжений в межчастичных контактах (а также в ПС) и на их легкую релаксацию путем упругой деформации. Низкие напряжения в ПС обусловлены наличием смазок (графитом, свинцом, маслом). Низкая прочность межчастичных контактов не способствует проявлению их высокой пластичности и даже легкой недостаток масла в зоне контакта приводит к повышению температуры, появлению малоциклового усталости и релаксации напряжений путем разрушения межчастичных контактов. Поэтому резкий переход из режима

нормального трения с низкой величиной  $I_h$  в катастрофическое изнашивание обусловлен слабостью межчастичных контактов и компенсировать их слабость не способны оставшиеся смазки (свинец и графит). Отсутствие влияния концентрации графита на характеристики контакта и на резкий переход к катастрофическому изнашиванию можно объяснить этой слабостью контактов в стальном каркасе.

Отсутствие слоя переноса на поверхности скольжения медного контртела является важным условием достижения удовлетворительной электропроводности контакта, его устойчивости и надежности в процессе трения. Ранее было отмечено [19], что высокая электропроводность скользящего электроконтакта металл – стальное контртело соответствует низкой интенсивности изнашивания. Относительно низкая величина  $I_h$  композита (и соответственно высокая  $r_s^{-1}$ ) в присутствии свинца (рис. 2, а, б) и более высокая  $I_h$  (соответственно низкая  $r_s^{-1}$ ) при его отсутствии (см. таблицу) показало, что эта закономерность может выполняться также в скользящем электроконтакте металл – медное контртело. Однако не следует обобщать эту закономерность на скользящие электроконтакты других металлических систем, так как для этого необходим более значительный объем данных. Можно утверждать, что максимальная величина  $r_s^{-1}$  может быть достигнута, в первую очередь, оптимальными пределами скорости изменения количества масла в зоне трения, что контролируется структурой порового пространства и температурой контакта. Поровое пространство следует получать с удовлетворительной перколяцией пор (рис. 1, б). Оптимальная пористость должна быть определена для каждого конкретного контакта. Температура контакта должна быть низкой, чтобы уменьшить испарение и выгорание масла в зоне контакта и, тем самым, обусловить удовлетворительную смазку и низкое значение  $I_h$ . Уве-

личение контактного давления до некоторого предела должно приводить к повышению величины  $r_s^{-1}$  и к вероятному уменьшению температуры контакта. Кроме того, максимум  $r_s^{-1}$  зависит от правильного выбора состава композита. Не исключено, что величина  $r_s^{-1}$  может быть увеличена (и уменьшено значение  $I_h$ ) за счет роста температуры спекания в рассмотренных условиях, что должно повысить прочность металлического каркаса. Но взаимосвязь этих факторов и характеристик  $r_s^{-1}$ ,  $I_h$  должна быть изучена в отдельных работах.

В общем случае получение композитов с заданными особенностями первичной структуры (выбор фазового состава, сквозная минимальная пористость, удовлетворительная прочность межчастичных и межфазных границ и т.п.) является часто трудной задачей. Представленные начальные сведения позволяют утверждать, что восстановленная сталь марки ШХ15 способна быть основой износостойких композитов, предназначенных для скользящего токосъема с плотностью тока  $j > 100$  А/см<sup>2</sup> в смазке. В настоящей работе эта износостойкость обусловлена в значительной степени особенностью конструкции трибосопряжения, а именно, присутствием свинцовой пластины. Не исключено, что свинец в виде пластины может быть более эффективным для увеличения износостойкости, чем свинец в структуре композита. Увеличение контактного давления более 0,09 МПа должно привести к увеличению износостойкости и плотности тока, соответствующим катастрофическому изнашиванию. Обычно скользящий токосъем по медному контртелу осуществляют при контактом давлении 0,02 МПа, но в некоторых экспериментах давление поднимают до 0,2 МПа [20]. Видно, что спеченные композиты состава подшипниковая сталь – графит являются вполне перспективной основой для создания токосъемных материалов, проявляющих удовлетворительную износостойкость при скольжении с контактным давлением более 0,09 МПа, плотностью тока более 100 А/см<sup>2</sup> в присутствии смазочных материалов, представленных выше.

## Выводы

Порошковая сталь, переработанная из шлифовального шлама производства подшипников, может служить основой для создания композитов, спеченных в электрических печах без применения вакуума. Спекание при температуре менее 1000 °С приводит к формированию слабой межчастичной связи в стальном каркасе и к низкой механической прочности композита состава сталь – графит. Высокая (более 35 %) сквозная пористость композита легко пропитывается нефтяным маслом и допускает скольжение композита по схеме сопряжения вал – колодка в режиме самосмазывания под воздействием электрического тока контактной плотностью более 100 А/см<sup>2</sup>. Композиты состава сталь – графит, несмотря на низкую объемную

прочность, способны осуществлять скользящий электроконтакт с интенсивностью изнашивания, близкой к нулю, при контактной плотности тока до 150 А/см<sup>2</sup>. Это указывает на их высокую прочность поверхностного слоя в определенных условиях. Катастрофическое изнашивание композитов начинается при контактной плотности тока около 300 А/см<sup>2</sup> вследствие повышения средней температуры контакта и выгорания масла в контактном пространстве. Любой режим скольжения этих композитов не приводит к увеличению шероховатости поверхности скольжения медного контртела.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. – Самара: изд. Самар. гос. техн. ун-та, 2008. – 387 с.
2. Rynio C., Hattendorf H., Klöwer J., Eggeler G. The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear // *Wear*. 2014. Vol. 315. P. 1 – 10.
3. Wang X., Wei X., Hong X., Yang J., Wang W. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 280. P. 381 – 387.
4. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
5. Порошковая металлургия и пыльные покрытия: Учеб. для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. Ma X.C., He G.Q., He D.H., Chena C.S., Hua Z.F. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system // *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 1087 – 1092.
7. He D.H., Manory R.A. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors // *Wear*. 2001. Vol. 249. P. 626 – 636.
8. Зозуля В.Д. Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – Киев: Наукова думка, 1989. – 287 с.
9. Zhang W., Zhang D., Le Y., Li L., Ou B. Fabrication of surface self-lubricating composites of aluminum alloy // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 255. P. 2671 – 2674.
10. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2006. 672 p.
11. Senouci A., Zaidi H., Frene J., Bouhoucha A., Paulmier D. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel // *Applied Surface Science* 1999. Vol. 144-145. P. 287 – 291.
12. Argibay N., Sawyer W. G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density // *Wear*. 2012. Vol. 274-275. P. 229 – 237.
13. Kwok C.T., Wong P.K., Man H.C. and Cheng F.T. Sliding wear and corrosion resistance of copper-based overhead catenary for traction systems. *IJR // International Journal of Railway(Korea)*. 2010. Vol. 3. No. 1. P. 19 – 27.
14. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
15. Алеутдинов К.А., Алеутдинова М.И., Фадин В.В. Влияние структуры контртела на характеристики скользящего электроконтакта металлических композитов. – В кн.: Сб. трудов Международной конференции «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 231 – 236.
16. Kovalchenko A.M., Blau P.J., Qu J., Danyluk S. Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated conditions // *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 2998 – 3006.
17. Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Алеутдинов К.А. Структура и изнашивание порошковой подшипниковой стали при сколь-

жени с током по меди в присутствии смазки // Перспективные материалы. 2017. № 11. С. 55 – 63.

18. Алеутдинова М.И., Борисов М.Д., Фадин В.В., Кочепасов И.И., Колубаев А.В. Структура и механические свойства порошковых материалов на основе подшипниковой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 2. С. 31 – 34.
19. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Potekaev A.I., Kulikova O.A. The surface layer states in metallic materials subjected to dry sliding

and electric current // Russian Physics Journal. 2017. Vol. 60 (5). P. 908 – 914.

20. Чичинадзе А.В., Хованский В.Н., Преженцева Н.П. Некоторые особенности расчетно-экспериментальной оценки триботехнических характеристик сильноточных скользящих электрических контактов // Трение и износ. 1992. № 13 (1). С. 138 – 144.

Поступила 23 августа 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 780–786.

## WEAR OF SINTERED COMPOSITES BASED ON BEARING STEEL AT BOUNDARY FRICTION WITH CURRENT COLLECTION AGAINST COPPER

M.I. Aleutdinova<sup>1,2</sup>, V.V. Fadin<sup>1</sup>, K.A. Aleutdinov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University, Seversk, Tomsk Region, Russia

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Abstract.** The possibility of creating a composite of steel-graphite by sintering using the simplest technology has been studied at temperature lower than 1000 °C in the electric furnace without vacuum. The main research aim was to estimate ability of such composite to show high wear resistance at sliding against copper counterbody under the influence of electric current with a contact density higher than 100 A/cm<sup>2</sup>. Powder steel has been obtained by recycling of grinding wastes of bearing production. Composites had low mechanical properties and high specific electric resistance. The high through porosity was shown by optical metallography. Tribotechnical loading of composites has been carried out according to the contact scheme “pin-on-ring” with a sliding velocity of 5 m/s and with a contact pressure of 0.09 MPa. It has been noted that dry friction of these composites has caused transfer layer emergence on the sliding surface of copper counterbody. As a result there was reduction of sliding electric contact conductivity and increase in the general copper sliding surface roughness. Impregnation by industrial oil of composites porous framework led to significant increase in specific surface contact electric conductivity and to linear wear intensity decrease comparing with the same characteristics of dry contact. Catastrophic wear under these conditions began at the contact current density of 150 – 200 A/cm<sup>2</sup>. It has been shown that the placing of lead plate and composite in the specimen holder and implementation of their joint sliding under the influence of electric current caused additional contact electric conductivity increase and wear intensity decrease to values of 3 – 11 μm/km at the contact current density about 250 A/cm<sup>2</sup>. Catastrophic wear in the presence of a lead plate and industrial oil in contact zone began at the contact current density of 250 – 300 A/cm<sup>2</sup>. Contact characteristics dependence on graphite concentration was not evidently observed. It has been established that every friction mode did not lead to copper sliding surface deterioration. It was concluded that the use of the restored bearing steel has the perspective for creation of current collection materials demonstrating high wear resistance under the influence of electric current of high contact density.

**Keywords:** sliding electric contact, surface layer, contact voltage drop, specific contact electric conductivity, stress relaxation, sintered composite, pores space, self-lubricating friction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-780-786

### REFERENCES

1. Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoi povrezhdaemosti i razrusheniya poverkhnostnykh sloev: monografiya* [Kinetics of fatigue damage-

ability and destruction of surface layers]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2008, 387 p. (In Russ).

2. Rynio C., Hattendorf H., Klöwer J., Eggeler G. The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear. *Wear*. 2014, vol. 315, pp. 1–10.
3. Wang X., Wei X., Hong X., Yang J., Wang W. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel. *Applied Surface Science*. 2013, vol. 280, pp. 381–387.
4. Fedorchenko I.M., Pugina L.I. *Kompozitsionnye spechennyye antifriktsionnye materialy* [Composite sintered antifriction materials]. Kiev: Naukova dumka, 1980, 404 p. (In Russ).
5. Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. etc. *Poroshkovaya metallurgiya i napylnyye pokrytiya: Ucheb. dlya vuzov* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p. (In Russ).
6. Ma X.C., He G.Q., He D.H., Chena C.S., Hua Z.F. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system. *Wear*. 2008, vol. 265, pp. 1087–1092.
7. He D.H., Manory R.A. Novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors. *Wear*. 2001, vol. 249, pp. 626–636.
8. Zozulya V.D. *Ekspluatatsionnye svoystva poroshkovykh podshipnikov* [Operational properties of powder bearings]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 287 p. (In Russ).
9. Zhang W., Zhang D., Le Y., Li L., Ou B. Fabrication of surface self-lubricating composites of aluminum alloy. *Applied Surface Science*. 2008, vol. 255, pp. 2671–2674.
10. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology*. Boca Raton: CRC Press, 2006, 672 p.
11. Senouci A., Zaidi H., Frene J., Bouchoucha A., Paulmier D. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel. *Applied Surface Science*, 1999, vol. 144-145, pp. 287–291.
12. Argibay N., Sawyer W. G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density. *Wear*, 2012, vol. 274-275, pp. 229–237.
13. Kwok C.T., Wong P.K., Man H.C., Cheng F.T. Sliding wear and corrosion resistance of copper-based overhead catenary for traction systems. *IJR. International Journal of Railway (Korea)*. 2010, vol. 3, no. 1, pp. 19–27.
14. Berent V.Ya. *Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta* [Materials and properties of electric contacts in devices of railway transport]. Moscow: Intekst, 2005, 408 p. (In Russ).
15. Aleutdinov K.A., Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Influence of counterbody structure on characteristics of sliding electric contact of metal composites. In: *Sb. trudov Mezhdunarodnoi konferentsii “Materialy i tekhnologii novykh pokolenii v sovremennom materialovedenii”* [Coll. of papers of the Int. Conf. “Materials and Technologies of New Generations in Modern Materials Science”]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2016, pp. 231–236. (In Russ).

16. Kovalchenko A.M., Blau P.J., Qu J., Danyluk S. Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated conditions. *Wear*. 2011, vol. 271, pp. 2998–3006.
17. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Aleutdinov K.A. Structure and wear of powder bearing steel at lubricant sliding with current collection on copper. *Perspektivnye materialy*. 2017, no. 11, pp. 55–63. (In Russ).
18. Aleutdinova M.I., Borisov M.D., Fadin V.V., Kochepasov I.I., Kolybayev A.V. Structure and mechanical properties of powder materials on base of bearing steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 2, pp. 31–34. (In Russ).
19. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Potekaev A.I., Kulikova O.A. The surface layer states in metallic materials subjected to dry sliding and electric current. *Russian Physics Journal*. 2017, vol. 60 (5), pp. 908–914.
20. Chichinadze A.V., Khovanskii V.N., Prezhentseva N.P. Some features of settlement and experimental assessment of tribotechnical

characteristics of large current sliding electric contacts. *Trenie i iznos*. 1992, no. 13(1), pp. 138–144 (In Russ).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, no. 16-48-700434.

**Information about the authors:**

**M.I. Aleutdinova**, *Cand. Sci. Eng., Research Associate*  
(aleut@ispms.ru)

**V.V. Fadin**, *Cand. Sci. Eng., Assist. Professor, Senior Researcher*  
(fvv@ispms.ru)

**K.A. Aleutdinov**, *Student*

Received August 23, 2018