

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КОНТРЕЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ЭЛЕКТРОКОНТАКТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

К.А. АЛЕУТДИНОВ<sup>1</sup>, М.И. АЛЕУТДИНОВА<sup>2,3</sup>, В.В. ФАДИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>3</sup>Северский технологический институт НИЯУ МИФИ

E-mail: aleut@ispms.ru

## EFFECT OF COUNTERBODY STRUCTURE ON CHARACTERISTICS OF THE SLIDING ELECTROCONTACT OF METAL COMPOSITES

K.A. ALEUTDINOV<sup>2</sup>, M.I. ALEUTDINOVA<sup>1,3</sup>, V.V. FADIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science

<sup>3</sup>Seversk Technological Institute NRNU «MEPhI»

E-mail: aleut@ispms.ru

***Annotation.** Comparison of some characteristics of electrocontact at sliding metal composites against steel and copper counterbodies with high ( $>100 \text{ A/cm}^2$ ) contact current density was carried out. It is shown that sliding against steel leads to formation of friction induced structure layer and FeO oxide which interferes with adhesive interaction and promotes realization of satisfactory wear resistance. Sliding against copper counterbody is accompanied by strong adhesive wear in case of inability of composites to create «the third body». The industrial composite forms a transfer layer (i.e. «the third body») on a copper counterbody that considerably reduces wear.*

**Введение.** Характер контактного взаимодействия металлических материалов при скольжении с токосъёмом проявляется, в первую очередь, в изменении прочности поверхностных слоёв контактирующих материалов в зависимости от изменения входных параметров трибосистемы. Такими параметрами часто являются структура материалов или параметры внешнего воздействия, например, скорость скольжения, давление, контактная плотность тока и т.п. Низкая начальная шероховатость контртела является необходимым параметром трибосистемы для слабого изнашивания некоторых токосъёмных материалов (углеграфитов и металлографитов).

Износостойкость является интегральным выражением механической прочности поверхностного слоя (ПС). Особый интерес представляет изучение взаимосвязи износостойкости при трении под воздействием электрического тока с контактной плотностью более  $100 \text{ A/cm}^2$ . Усложнить режим трения можно за счёт увеличения шероховатости контртела без применения смазки. В общем случае тяжелый режим трения сопровождается пластической деформацией ПС и его разрушением в режиме малоциклового усталости. Представляет научный интерес испытать в этих условиях металлические композиты на стальной и железной основах. Необходимым этапом изучения триботехнического поведения материалов в этих условиях является определение структурных изменений ПС. Контртелом обычно служит медь или сталь. Токосъёмные материалы, как правило, содержат графит в своей структуре.

Целью настоящей работы является изучение взаимосвязи первичной структуры, структурных изменений поверхностного слоя и функциональных характеристик контакта металлических композитов со сталью и медью при нагружении трением и электрическим током контактной плотностью более  $100 \text{ A/cm}^2$ .

**Материалы и методики эксперимента.** Модельные композиты имели составы по шихте как показано в таблице, где Гр – графит, ШХ15 – сталь ШХ15, переработанная из шлифовальных отходов подшипникового производства. Экспериментальные композиты 1 и 2 спечены в вакууме при 1100 °С в течение 2 часов. Металлографическое изучение поверхностного слоя проведено на оптическом микроскопе Neophot-21. Твердость  $HB$  определена на твердомере Бринелля. Пористость  $P$  измерена методом гидростатического взвешивания. Удельное электросопротивление  $\rho$  определено методом амперметра-вольтметра. Начальные параметры шероховатости ( $R_a=5$  мкм,  $R_z=31$  мкм) поверхности скольжения медного контртела и параметры шероховатости стального контртела ( $R_a=2.9$  мкм,  $R_z=12.3$  мкм) измерены на бесконтактном профилометре MICRO MEASURE 3D station. Контртелом служила медь ( $HB=0.7$  ГПа) и сталь 45 (50 HRC).

Таблица –1 Механические и физические свойства металлических композитов

Свойства / состав, об.%	$HB$ , ГПа	$P$ , %	$\rho$ , $\mu\Omega \cdot m$	$\alpha_{Cu}$ , нМ	$\alpha_{Fe}$ , нМ	$\alpha_{Feo}$ , нМ	$\alpha_{Cu}$ , нМ	$\alpha_{\alpha-Fe}$ , нМ
1. Cu-10%Гр-70% Fe	1220	10	0.16	0.3615	0.2866	0.4300	0.3618	0.2869
2. Cu-10%Гр-70% ШХ15	1722	12	0.24	0.3618	0.2867	0.4296	0.3617	0.2869
3. ИЛГТ	610	15	0.16	0.3615	0.2867	0.4280	0.3616	0.2868
контртело				Сталь 45			Медь М1	

Испытания композитов на износ проведено в условиях скользящего электроконтакта без смазки при переменном токе (50 Гц), при давлении 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1. Испытания осуществлены по схеме «вал-колодка» (рис.1). Путь трения при каждом испытании составлял 9 км. Линейная интенсивность изнашивания определена как  $I_h=h/L$ , где  $h$  – изменение высоты образца на пути трения  $L$ . Контактная плотность тока  $j$  определена как  $j=i/A_a$ , где  $i$  – ток, протекающий через номинальную площадь контакта  $A_a=10$  мм<sup>2</sup>. Для сравнения приведены аналогичные свойства неспеченного промышленного композита ИЛГТ (об.%, Cu-42% Fe-7% Pb-2% Zn-11% графит), применяемого как токосъемная вставка троллейбуса.

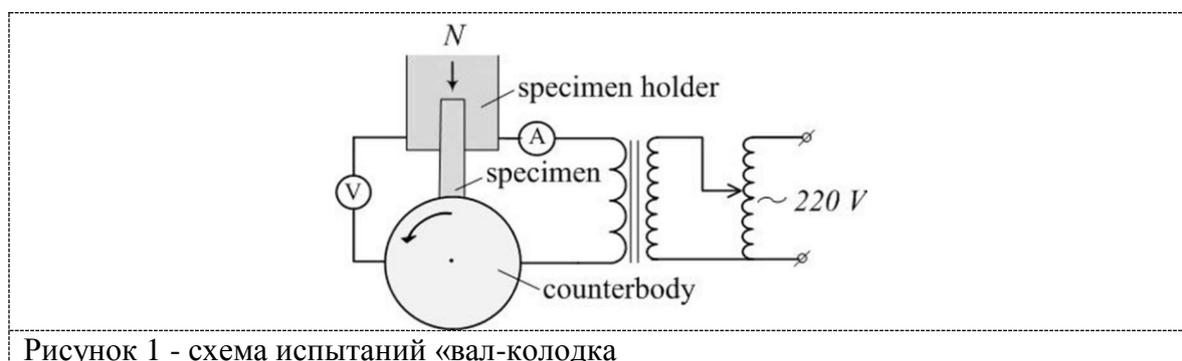


Рисунок 1 - схема испытаний «вал-колодка»

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Наиболее явно характер контактного взаимодействия проявляется в токовой зависимости интенсивности изнашивания  $I_h$  и удельной поверхностной электропроводности контакта  $r_s^{-1}=j/U$  ( $U$  – контактное падение напряжения). Видно, что электропроводность  $r_s^{-1}$  контакта и ин-

тенсивность изнашивания  $I_h$  композитов увеличивается при увеличении плотности тока  $j$  (рис.2) при скольжении по стали. Видно также, что композит 1, содержащий незначительное количество легирующих элементов и фаз, формирует контакт с более высокой электропроводностью и с более низкой  $I_h$ . При некоторой  $j$  наблюдается резкое увеличение  $I_h$ , что соответствует началу катастрофического изнашивания. Одновременно уменьшается  $r_s^{-1}$ .

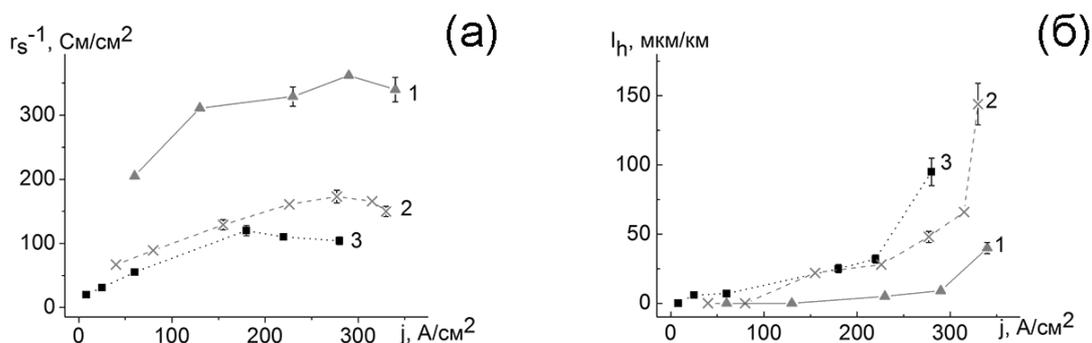


Рисунок 2 - токовая зависимость удельной поверхностной электропроводности  $r_s^{-1}$  контакта (а) и интенсивность изнашивания  $I_h$  (б) композитов Cu-10%Гр-70% Fe (1), Cu-10%Гр-70% ШХ15 (2) и ИЛГТ (3) при скольжении по стальному контртелу

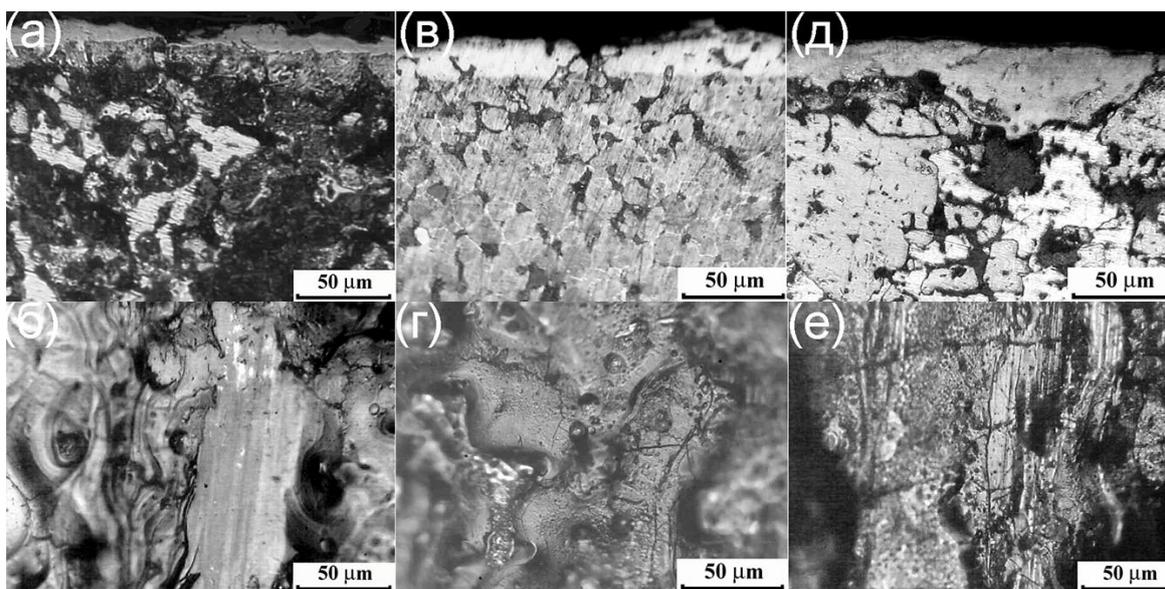


Рисунок 3 - поперечное сечение и изображение поверхности трения композитов Cu-10% Гр-70% Fe (а,б), Cu-10% Гр-70% ШХ15 (в,г), ИЛГТ (д,е) после скольжения с плотностью тока более  $150 \text{ A/cm}^2$  по стали 45

Скольжение по стальному контртелу вызывает появление слоя вторичных структур (BC) белого цвета (рис.3). Следует отметить, что толщина этого слоя увеличивается до значений более 20 мкм при увеличении плотности тока. Поверхность трения может иметь признаки образования вязкой жидкости. Но иногда при этом

она имеет слабые следы адгезионного взаимодействия или пластического отгеснения неровностями поверхности контртела (рис.3).

Характеристики контакта и пластичность поверхностного слоя в значительной степени зависят от фазового состава ВС. Рентгеновским фазовым анализом показано, что ВС содержат ОЦК-железо, медь а также оксид FeO (таблица 1). Другие окислы отсутствуют. Видно, что значения параметров решётки этих фаз близки к известным значениям, отмеченных в таблицах ASTM X-ray Standard.

Скольжение этих же композитов по меди также приводит к тому, что электропроводность  $r_s^{-1}$  контакта и интенсивность изнашивания  $I_h$  увеличивается при увеличении плотности тока  $j$  (рис.4). Видно, что скольжение композитов 1 и 2 происходит с высокой интенсивностью изнашивания  $I_h$  и с низкой электропроводностью  $r_s^{-1}$  в интервале  $j= 0-50 \text{ A/cm}^2$ . Промышленный композит ИЛГТ изнашивается медленнее при более высоких  $j$  и при более высоких  $r_s^{-1}$ .

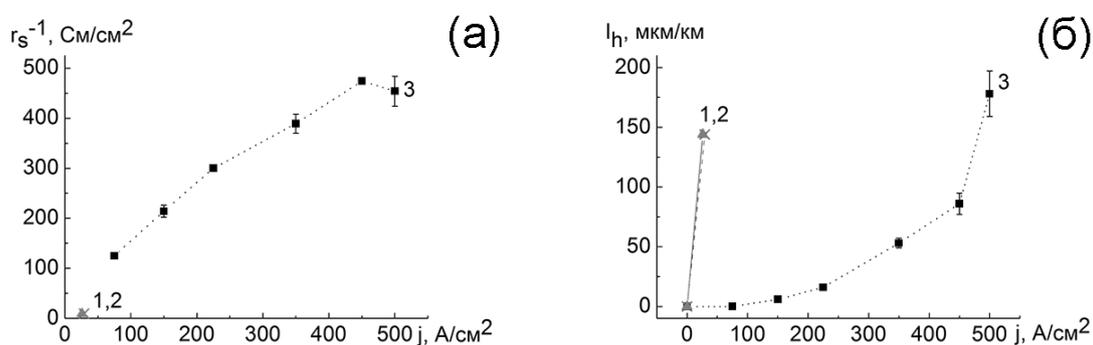


Рисунок 4 - токовая зависимость удельной поверхностной электропроводности  $r_s^{-1}$  контакта (а) и интенсивность изнашивания  $I_h$  (б) композитов Cu-10%Gr-70% Fe (1), Cu-10%Gr-70% ШХ15 (2) и ИЛГТ (3) при скольжении по медному контртелу

Скольжение композитов 1 и 2 по меди происходит в условиях сильного адгезионного взаимодействия (рис.5а,в). Видны следы меди, выванной из контртела и размазанной по поверхности трения. Видны также частицы меди, вырванные из контртела и прикреплённые к поверхности трения вследствие переноса (рис.5б,г). Кроме того, наблюдаются участки глубокого проникновения перенесённой меди в пористый каркас композитов 1 и 2. Структурные изменения поверхностного слоя композитов 1 и 2 в виде образования слоя вторичных структур (ВС) отсутствуют после скольжения по меди (рис.5б,г). Явные признаки однотипного адгезионного взаимодействия композитов 1 и 2 с медным контртелом хорошо видны на рис.6а. Композит 3 формирует слой вторичных структур на поверхности контртела (рис.5д), где видны также большие участки меди. Этот слой не является результатом структурных изменений первичного материала (рис.5е), но появляется после многократного переноса продуктов изнашивания с одной поверхности на другую. Аналогичный слой переноса наблюдается на сопряжённой поверхности медного контртела (рис.6б). Рентгеновским фазовым анализом показано, что окислы на поверхности раздела композит/медь отсутствуют и отражения наблюдаются только от меди и железа.

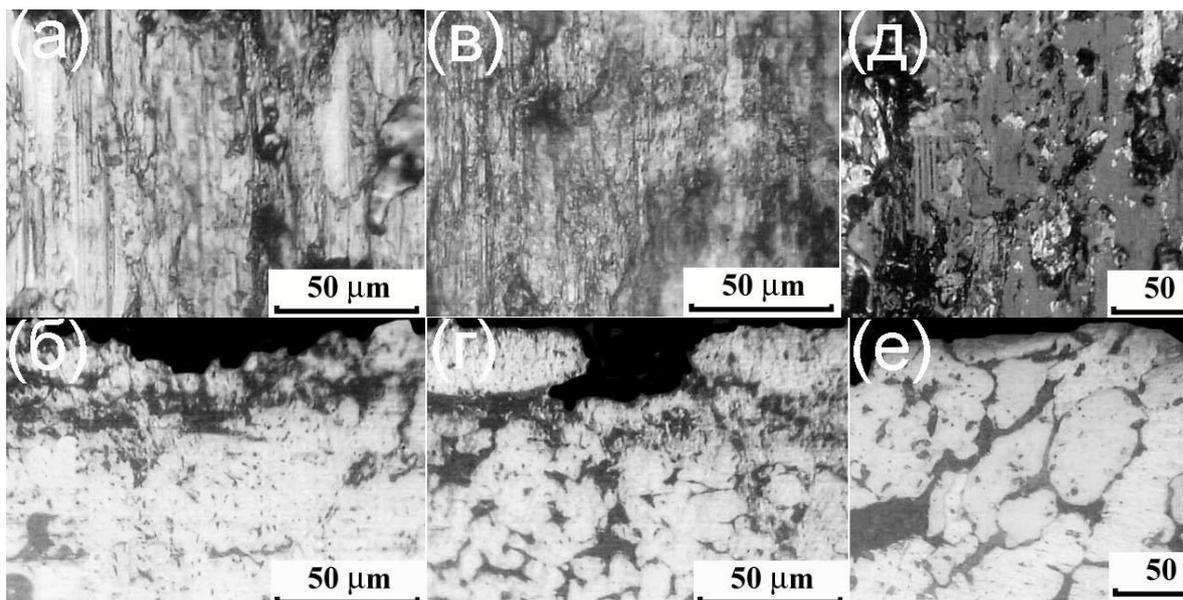


Рисунок 5 - изображение поверхности трения композитов и его поперечное сечение композитов Cu-10% Gr-70% Fe (а,б), Cu-10% Gr-70% ШХ15 (в,г) после скольжения с плотностью тока менее  $100 \text{ A/cm}^2$  и поперечное сечение и изображение поверхности трения композита ИЛГТ (д,е) после скольжения по медному контртелу с плотностью тока более  $100 \text{ A/cm}^2$

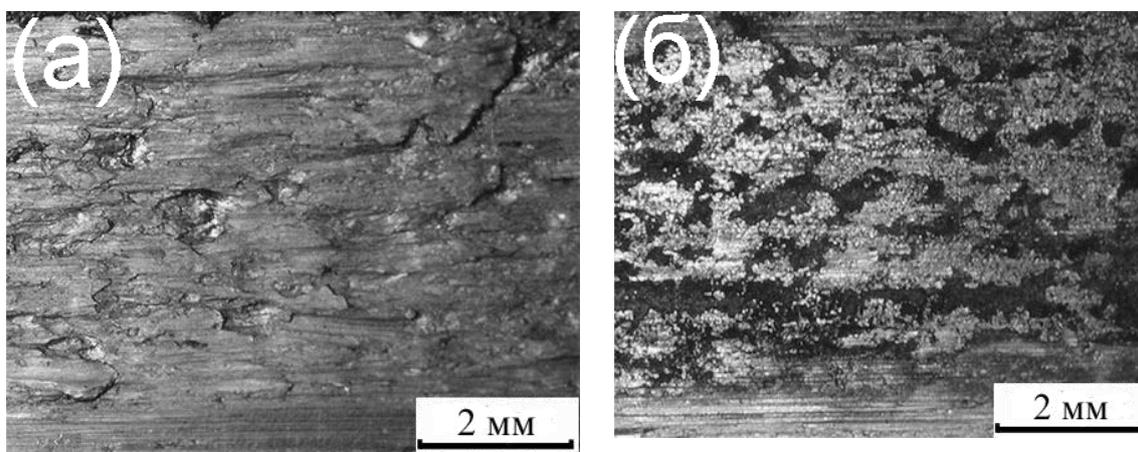


Рисунок 6 - изображение изношенной поверхности медного контртела после скользящего электроконтакта с композитами 1 и 2 (а) и композитом 3 (б)

Известно, что обеспечение внешнего трения в скользящем контакте является одним из условий достижения высокой износостойкости материалов пары трения. Для этого необходимо появление «третьего тела» в зоне контакта. В настоящей работе оксид FeO, возникающий при скольжении по стали, является основой «третьего тела» между контактными поверхностями и служит барьером для адгезии [1]. Однако многие окислы имеют высокую твердость и обеспечивают абразивное изнашивание. Оксид FeO появляется во вторичных структурах композита ИЛГТ в меньшем количестве, чем во вторичных структурах композитов 1 и 2. Кроме того,

ВС композита ИЛГТ содержат свинец и большое количество углерода [2]. Но более низкая механическая прочность вторичных структур композита ИЛГТ и их слабая связь с первичной структурой приводит к их относительно быстрому абразивному разрушению частицами оксида FeO, т.е. к низкой  $I_h$  (рис.2). Вторичные структуры композитов 1 и 2 заметно прочнее, хорошо сохраняют оксид FeO в своей структуре и слабо подвержены абразивному и адгезионному изнашиванию.

Отсутствие образования «третьего тела» при скольжении по меди композитов 1 и 2 приводит к слабому проявлению внешнего трения и осуществляется, в основном, режим внутреннего трения в виде адгезионного изнашивания обоих контактирующих материалов. Наиболее простой способ создания «третьего тела» в контакте композитов 1 и 2 с медью – ввести смазку в контактное пространство. Но это должно быть темой отдельной работы. Композит ИЛГТ способен создавать «третье тело» в виде слоя переноса, способного релаксировать напряжения в зоне контакта за счёт пластических сдвигов в масштабе зерна. Это приводит к сдвиговой устойчивости в масштабе ПС, что проявляется как относительно высокая износостойкость при плотности тока более  $100 \text{ А/см}^2$  без смазки.

**Заключение.** Скольжение металлических композитов по стальному контртелу под воздействием электрического тока приводит к образованию слоя вторичных структур, содержащих оксид FeO. Кроме того, оксид FeO является основой «третьего тела», снижает адгезионное взаимодействие в контакте и замедляет процесс изнашивания. Промышленный композит ИЛГТ, имея структуру порошковой прессовки, испытывает абразивное воздействие частицами оксида FeO и относительно быстро изнашивается. Неспособность некоторых материалов формировать «третье тело» при скольжении по медному контртелу приводит к интенсивному адгезионному изнашиванию обоих контактирующих материалов. Промышленный композит ИЛГТ формирует слой переноса на контртеле, который выполняет роль «третьего тела», что способствует реализации относительно высокой прочности поверхностного слоя в процессе скольжения и достижению относительно высокой износостойкости.

*Работа выполнена по проекту III.23.2.4 программы III.20.2 фундаментальных исследований СО РАН и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-700434*

#### **Список литературы**

1. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombatov V.S. Friction and Wear Calculation Methods. Pergamon Press, New York, 1982. –297 p.
2. Алеутдинова М.И., Фадин В.В. Взаимосвязь характеристик контакта и элементного состава поверхностного слоя металлических композитов после трения с током // Материаловедение. – 2013. – №3. –С. 31-36.