

05;12

## Изменение электросопротивления контакта металлических композит—сталь под действием трения и электрического тока

© В.В. Фадин, М.И. Алеутдинова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия  
e-mail: aleut@ispms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 11 марта 2010 г.)

Представлены вольт-амперные характеристики скользящего контакта металлических композитов по стали 45 без смазки. Показано, что композиты на стальной основе способны увеличить площадь фактического электроконтакта за счет появления электрочастиц, которые обеспечивают основное протекание тока плотностью до  $300 \text{ A/cm}^2$ . Композиты на основе меди не способны реализовать электроразрядную проводимость вследствие разрушения материала зоны контакта при плотности тока выше  $50 \text{ A/cm}^2$ . Предложен расчет удельного электросопротивления контактирующего слоя металлических композитов. Установлено, что при трении с большой плотностью тока удельное электросопротивление контактирующего слоя приближается к значениям, близким к значению удельного электросопротивления графита. Экспериментально показана принципиальная возможность увеличения площади фактического электроконтакта путем введения расплава Pb–Sn в зону трения и достижения плотности тока в контакте выше  $300 \text{ A/cm}^2$ .

### Введение

Электросопротивление зоны трения является одним из основных параметров, характеризующих работоспособность скользящего электроконтакта. В модели контакта принято, что шероховатость, непроводящий слой окислов, адсорбированные атомы и молекулы из окружающей среды позволяют току проходить через небольшие участки, называемые пятнами стягивания. Уменьшение электросопротивления контакта проводят путем применения консистентных смазок, реализующих эффект Ребиндера. В этом случае образование окислов затруднено и увеличивается фактическая площадь электроконтакта, что снижает электросопротивление зоны трения. Однако применение смазки не всегда допустимо и изучение электросопротивления зоны контакта материалов, подвергаемых нагружению трением и электрическим током без смазки, представляет научный и практический интерес. Для этого необходимо получить представления о начальной предельной плотности тока в контакте и возможности ее увеличения. Применяемые материалы для скользящего электроконтакта на железной или стальной основе имеют удовлетворительную износостойкость без смазки при плотности тока менее  $50 \text{ A/cm}^2$ . Не исключено, что реализация скользящего электроконтакта при более высокой плотности тока возможна путем создания материалов на основе сталей.

Целью настоящей работы является получение сведений о начальном электросопротивлении зоны трения модельных композитов на стальной основе при скольжении с плотностью тока более  $100 \text{ A/cm}^2$  в отсутствие смазки.

### Материалы и методика

Порошковые композиты имели следующий состав по шихте (vol.%): Cu + 10% графит + 70% ШХ15 (композит 1), Cu + 10% графит + 70% Г13 (композит 2), Cu + 10% графит + 40% ШХ15 (композит 3), где ШХ15 — подшипниковая сталь ШХ15, переработанная из шлифовального шлама подшипникового производства, Ш13 — сталь Гадфильда (13% Mn). Образцы спекали в вакууме при температуре  $1100^\circ\text{C}$  в течение 2 h. Удельное электросопротивление композитов определено методом амперметра-вольтметра. Параметр  $R_a$  шероховатости получен на бесконтактном профилометре MICRO MEASURE 3D-station. Триботехнические испытания проведены в условиях скользящего токосъема без смазки при давлении 0.13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1 с модернизированным креплением образца. Нагружение осуществлено по

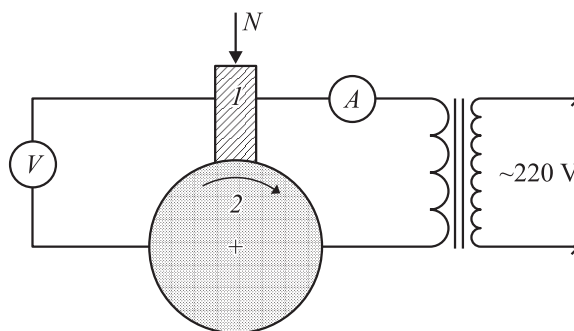


Рис. 1. Схема трибоконтакта „вал–колонка“ (1 — модельный композит, контртело 2 — сталь 45(50 HRC)).

схеме „вал–колодка“ (рис. 1). Путь трения составлял 9 км. Плотность тока  $j$  определена как отношение силы тока  $i$  к номинальной площади трибоконтакта  $s_n$ .

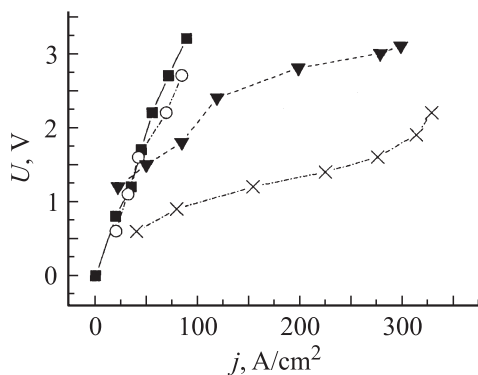
Проведено сравнение свойств модельных композитов с аналогичными данными промышленной щетки марки МГ, имеющей приблизительный состав 70 vol.% Cu + графит (композит 4).

## Результаты и их обсуждение

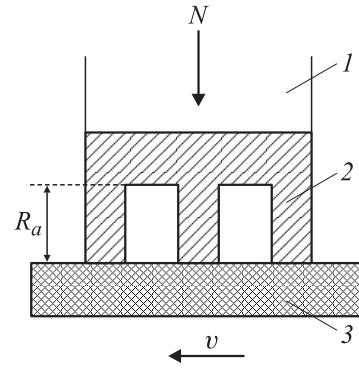
Плотность тока сильно влияет на характер контактного взаимодействия, поэтому влияние плотности тока на электропроводность зоны трения следует определить в первую очередь.

Из рис. 2, а видно, что при плотности тока более 50 А/см<sup>2</sup> электросопротивление зоны контакта композитов на основе сталей ниже, чем электросопротивление зоны трения композитов на основе меди. Наклон вольт-амперной характеристики (ВАХ) стальных композитов уменьшается при увеличении плотности тока выше 50 А/см<sup>2</sup> вследствие возникновения электроразрядной проводимости. Это означает, что электросопротивление зоны трения стальных композитов уменьшается при увеличении плотности тока. Композиты 3 и 4, имеющие медную основу, реализуют скользящий электроконтакт только через пятна фактического (непосредственного) контакта и переходят в состояние катастрофического изнашивания до возникновения электроразрядной проводимости.

Протекание тока перпендикулярно поверхности трения через пятна фактического контакта и через воздушный промежуток в виде разрядов между пятнами фактического контакта позволяет представить общее электросопротивление  $r$  контакта в виде параллельного соединения сопротивлений  $r_1$  (сопротивление на пятнах фактического контакта) и  $r_2$  (сопротивление совокупно-



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика контакта металлических композитов при отсутствии смазки в зоне трения: × — Cu + 10% графит + 70% ШХ15 (композит 1), ▼ — Cu + 10% графит + 70% Г13 (композит 2), ■ — Cu + 10% графит + 40% ШХ15 (композит 3), ○ — 70 vol.% Cu + графит (композит 4).



**Рис. 3.** Модельная схема скользящего электрического контакта: 1 — образец, 2 — слой структурных изменений, 3 — контртело;  $R_a$  — параметр шероховатости образца.

сти электроразрядов). Поэтому можно записать

$$r^{-1} = r_1^{-1} + r_2^{-1}. \quad (1)$$

Сопротивление  $r_1$  без учета шероховатости является сопротивлением стягивания  $r_{cr}$ , т.е.  $r_{cr} = 0.25(\rho_{sl} + \rho_{cb})/an$ , где  $\rho_{sl}$  и  $\rho_{sb}$  — удельное электросопротивление слоя структурных изменений и контртела ( $\rho_{cb} = 0.22 \mu\Omega \cdot m$ ) соответственно;  $a$  — средний радиус пятна контакта, мм;  $n$  — количество пятен контакта [1]. Подставив в формулу сопротивления стягивания радиус  $a$  из выражения площади фактического контакта  $s_1 = \pi a^2 n$ , можно записать:  $r_{cr} = 0.25(\rho_{sl} + \rho_{sb})(\pi/n)^{0.5} s_1^{-0.5}$ . Определение количества пятен контакта  $n$  и сопротивления  $r_1$  связано с построением опорной кривой профиля поверхности трения и относительно большим объемом математических выкладок, содержащих приближения [2]. Для предварительной оценки значения  $\rho_{sl}$  знание точного значения  $n$  необязательно, поэтому можно принять, что контакт происходит минимум в трех точках ( $n = 3$ ), т.е.  $(\pi/n)^{0.5} \approx 1$ . Тогда сопряжение образца и контртела можно представить как контакт трех выступов поверхности трения композита (образца) и гладкой поверхности контртела (рис. 3). В этом случае, учитывая электросопротивление трех выступов, можно записать

$$r_1 = 0.25(\rho_{sl} + \rho_{cb})s_1^{-0.5} + \rho_{sl}R_a/s_1, \quad (1a)$$

где  $R_a$  — параметр шероховатости, равный высоте выступа. Представляется логичным принять, что в пятнах фактического контакта происходит пластическая деформация, упрочняющая материал поверхностного слоя и вызывающая в нем структурные изменения при трении. В этом случае площадь фактического контакта  $s_1 = N/HB_{sl}$  [3], где  $N$  — нагрузка на образец,  $HB_{sl}$  — твердость по Бринеллю поверхностного слоя, имеющего структурные изменения. В окончательном виде сопротивление  $r_1$  непосредственного контакта можно записать

$$r_1 = 0.25(\rho_{sl} + \rho_{cb})\sqrt{\frac{HB_{sl}}{N}} + \rho_{sl}R_a \frac{HB_{sl}}{N}, \quad (2)$$

Физические и механические характеристики электроконтакта и композитов

Свойство	Композит			
	1	2	3	4
$\rho, \mu\Omega \cdot m$	0.25	1	0.15	0.16
$HB, GPa$	2	1.67	0.57	0.094
$HB_{sl}, GPa$	4.16	4.85	1.3	0.089
$r_1, \Omega$	0.35	1	0.31	0.35
$R_a, \mu m$	1.8	2.9	2.98	0.3
$U_{max}, V$	2.2	3.1	2.7	3.2
$i_{max}, A$	33	30	8.5	9
$j_1, 10^6 A/cm^2$	2.0	1.16	0.87	0.063
$r_2, \Omega$	0.082	0.115	0	0
$s_2/s_n, 10^{-3}$	2.4	3.93	0	0
$j_2, 10^5 A/cm^2$	1.11	0.68	0	0
$i_2/i_1$	4.25	8.68	0	0

отсюда

$$\rho_{sl} = \frac{r_1 - 0.25\rho_{cb}\sqrt{HB_{sl}/N}}{0.25\sqrt{HB_{sl}/N} + R_a HB_{sl}/N}. \quad (3)$$

В настоящей работе значение  $r_1$  определено по закону Ома путем измерения контактного падения напряжения и соответствующего тока в условиях отсутствия дуги (начальный участок ВАХ) и присутствия структурных изменений (вторичных структур) в материале зоны трения образца, т.е. после скольжения при максимальной плотности тока. При этом принято, что  $r_1$  постоянно при любом токе ВАХ.

Из таблицы видно, что электросопротивление  $r_1$  контакта не зависит непосредственно от объемной твердости  $HB$  и удельного электросопротивления  $\rho$  композита. Определение  $HB_{sl}$  проведено путем измерения микротвердости поверхностного слоя на шлифе поперечного сечения и нахождения соответствующего ему значения  $HB$  по таблице перевода чисел твердости [4]. Твердость  $HB_{sl}$  определена после скольжения при максимальной плотности тока, поскольку слой имеет максимальную толщину около  $20 \mu m$ . Параметр  $R_a$  в (3) также соответствует максимальному току ВАХ. Исходные данные для расчета  $\rho_{sl}$  представлены в таблице. Видно, что в спеченных композитах 1–3 твердость материала поверхности трения выше, чем твердость материала объема. Неспеченный композит 4 релаксирует возникающие напряжения в зоне контакта путем формирования рыхлой и быстроразрушающейся поверхности трения, имеющей низкую твердость.

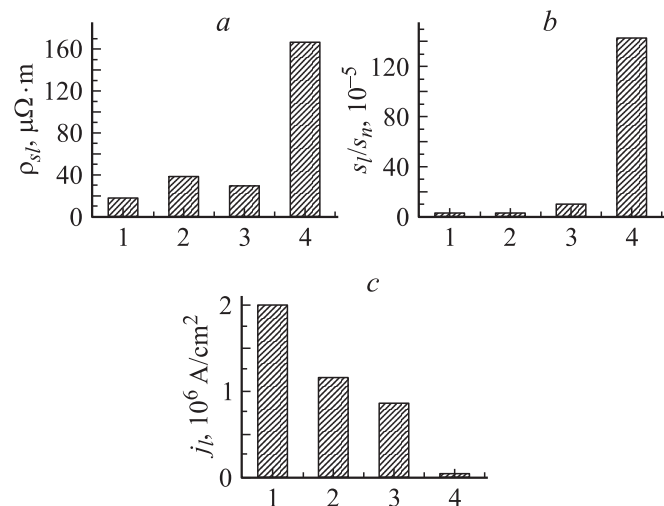
На рис. 4, а видно, что поверхность трения металлических композитов имеет относительно невысокие значения  $\rho_{sl}$ , характерные для графита и электрографита. Однако высокая  $HB_{sl}$  обуславливает низкую площадь фактического контакта  $s_1$  (рис. 4, б). Следует отметить, что для пластичных вторичных структур отношение  $s_1/s_n = 10^{-2} - 10^{-4}$  [5], поэтому можно утверждать, что

в зоне трения композитов на стальной основе вторичные структуры имеют невысокую пластичность. Это приводит к образованию высокой локальной плотности тока на пятнах фактического контакта (рис. 4, с), что можно представить в виде  $j_1 = i_1/s_1$ , или

$$j_1 = \frac{U_{max} HB_{sl}}{r_1 N}. \quad (4)$$

Плотность тока на пятнах фактического контакта, имеющая значение более  $10^6 A/cm^2$ , не считается аномально высокой и может достигать значений около  $10^7 A/cm^2$  [6]. Невысокое значение локальной плотности тока в зоне трения композита 4 вызвано его способностью формировать большую площадь фактического контакта, т.е. легко деформироваться вплоть до разрушения, а потому не может представлять большой ценности при разработке малогабаритных силовых скользящих электроконтактов.

Не исключено, что превышение значения  $j_1 \sim 10^7 A/cm^2$  на фактическом пятне контакта металлических композитов невозможно, поэтому увеличение токовой нагрузки трибосистема должна релаксировать реализацией каких-либо дополнительных процессов, например, разрушением или фазовым превращением материала зоны трения, или увеличением площади контакта. Возникновение электроразрядов уменьшает электросопротивление зоны трения вследствие увеличения проводящей площади и целесообразно оценить ее значение. Представляется логичным учесть природу контактирующих материалов путем введения сопротивления стягивания на разряде. Поэтому сопротивление  $r_2$  сово-



**Рис. 4.** Удельное электросопротивление поверхностного слоя (а), для площади фактического контакта (б), локальная плотность тока на пятне фактического контакта (с), характерные для металлических композитов при трении с максимальным током. Номер композита (ось ординат) соответствует номеру композита в таблице.

купности электроразрядов можно представить в виде

$$r_2 = 0.25(\rho_{sl} + \rho_{cb})/(\pi/n)^{0.5}s_2^{-0.5} + \rho_d R_a/s_2,$$

где  $s_2$  и  $\rho_d$  — общая площадь сечения и удельное электросопротивление совокупности электроразрядов, что представлено в виде одного общего разряда при текущем режиме трения. Решая это квадратное уравнение относительно  $s_2^{-0.5}$  для случая  $n = 1$  и выбрав корень, имеющий физический смысл, можно записать

$$\frac{1}{\sqrt{s_2}} = \frac{-0.443(\rho_{sl} + \rho_{sb}) + \sqrt{0.196(\rho_{sl} + \rho_{cb})^2 + 4\rho_d R_a r_2}}{2\rho_d R_a}. \quad (5)$$

Удельное электросопротивление дугового разряда  $\rho_d$  можно оценить на основе сведений о ручной дуговой сварке. Максимальная плотность тока сварочной дуги  $j_a = 20 \text{ A/mm}^2$  допускается при сварке электродом, имеющим диаметр 3 мм. Тогда соответствующий ток дуги  $i_a = 141 \text{ A}$ . Напряжение на электроде определяется по формуле соответствия  $U_e = 20 + 0.04i_a \approx 26 \text{ V}$ . Нормальная длина  $l$  сварочной дуги равна диаметру электрода [7]. Отсюда можно найти напряженность электрического поля в дуге  $E_e = U_e/l$  и по закону Ома определить удельное электросопротивление дугового разряда  $\rho_d = E_e/j_a \approx 0.4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ . Близкое значение  $\rho_d \approx 0.28 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$  получится, если в этом расчете применить  $j_a = 30 \text{ A/mm}^2$  реализующиеся на более ранних стадиях разряда [8].

Значение сопротивления  $r_2$  определяется из (1) и может быть представлено в виде

$$r_2 = \left( \frac{i}{U} - \frac{1}{r_1} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $i$ , и следует взять из рис. 2. Из (5) и (6) видно, что наибольшая площадь сечения разрядов формируется при минимальном значении  $r_2$ , т.е. при максимальном токе и напряжении. Из таблицы видно, что наибольшая площадь сечения разрядов заметно превышает площадь фактического контакта. Зная  $s_2$ , можно рассчитать плотность тока  $j_2$  в разряде:

$$j_2 = \frac{i - (U/r_1)}{s_2}. \quad (7)$$

Подставив в (7) максимальные ток и напряжение из таблицы, можно получить значение  $j_2 \approx 10^5 \text{ A/cm}^2$ , которое следует признать достаточно высоким, что характерно для начальной стадии разряда [8]. В этом режиме трения реализуются электроэрозия и испарение металла, а также другие процессы, разрушающие поверхность трения. Для той ситуации соотношение  $i_2/i_1$  токов, протекающих через площади  $s_2$  и  $s_1$ , можно представить в виде  $i_2/i_1 = (i - i_1)/i_1$ , где  $i_1 = U/r_1$ , или

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{ir_1}{U} - 1. \quad (8)$$

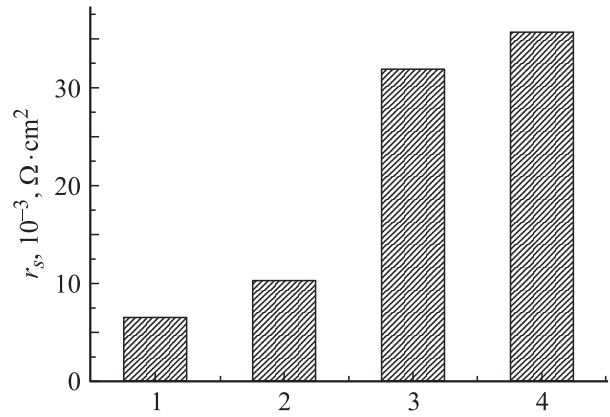


Рис. 5. Удельное поверхностное сопротивление, характерное для металлических композитов (ось ординат) при трении в режиме, близком к режиму катастрофического изнашивания.

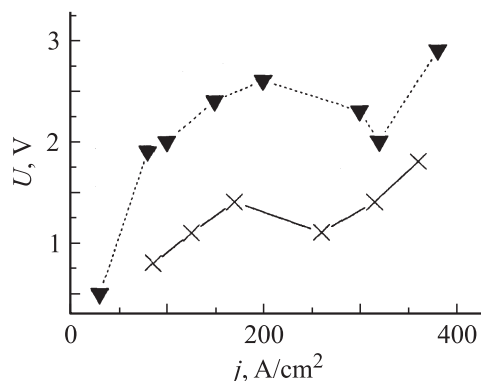
Подставив в (8) максимальные ток и напряжение из таблицы, можно видеть, что в зоне сухого скольжения с токоъемом при повышении плотности тока основная проводимость обусловлена возникновением электроразрядов, действующих на некоторой эффективной площади порядка  $10^{-3} s_n$  (см. таблицу). Не исключено, что во всех композитах на стальной основе будет наблюдаться этот эффект.

Представление об электросопротивлении зоны трения будет более полным при сравнении численных значений электросопротивления, приведенного к единице номинальной площади контакта (удельное поверхностное сопротивление), которое следует записать в виде  $r_s = r s_n = U/j$ .

Из рис. 5 видно, что композиты 1 и 2 (на стальной основе) формируют зону трения, имеющую более низкое удельное поверхностное сопротивление  $r_s$ , чем композиты 3 и 4 (на основе меди). Это вызвано тем, что композиты 1 и 2 могут повышать электропроводность зоны трения за счет реализации электроразрядной проводимости. В ее отсутствие при малой плотности тока (рис. 2) наклон кривой для всех композитов примерно одинаков, т.е. примерно одинаковые значения  $r_s$ . Следует отметить, что образование разрядов в зоне трения нежелательно, поэтому целесообразно искать другие способы увеличения плотности тока в контакте.

Проявление электроразрядной проводимости можно рассматривать как один из вариантов, за счет которого трибосистема с токоъемом может увеличить активную площадь электрического контакта и тем самым увеличить плотность  $j$  тока. Другим вариантом увеличения проводящей площади контакта является введение в зону трения консистентной смазки, легкоплавких металлов в виде пленки на поверхности трения или жидкого металла. Последний вариант не имеет экспериментального воплощения. Существующие сведения [9] не позволяют получить удовлетворительного представления на эту тему, поэтому необходимо дальнейшее накопление экспе-





**Рис. 6.** Вольт-амперная характеристика контакта композитов на основе стали, полученная при введении расплава Pb–Sn в зону трения: × — Cu + 10% графит + 70% ШХ15 (композит 1), ▼ — Cu + 10% графит + 70% Г13 (композит 2).

риментальных данных. В настоящей работе композиты 1 и 2 были покрыты сплавом Pb–Sn. Покрытие имело толщину около 0.5 мм. Скольжение таких образцов под действием электрического тока необходимо рассмотреть в сравнении со скольжением таких же композитов без покрытия.

Из рис. 6 видно, что электросопротивление зоны трения обоих композитов (1 и 2) в присутствии легкоплавких компонентов ниже по сравнению с контактом в их отсутствие (см. рис. 2) во всем интервале изменения тока. Это означает, что некоторое количество свинца и олова всегда присутствует в зоне трения и увеличивает площадь контакт. Композит 2 имеет более высокое удельное электросопротивление  $\rho_{sl}$ , чем композит 1, поэтому формирует зону контакта с более высоким сопротивлением (рис. 6). Изменение электросопротивления зоны трения вызывает изменение наклона ВАХ. Например, при образовании окислов в зоне трения наклон должен увеличиваться вследствие уменьшения площади электрического контакта. Из рис. 6 видно, что ВАХ меняет знак наклона с положительного на отрицательный вследствие плавления сплава Pb–Sn (наблюдается визуально). Расплав Pb–Sn затекает в зону трения и вызывает увеличение активной площади  $s$  электроконтакта.

В соответствии с законом Ома ( $U = jr_s$ ) можно записать

$$\frac{dU}{dj} = r_s + j \frac{dr_s}{dj}. \quad (9)$$

Производная  $\frac{dr_s}{dj}$  вызывает нелинейность ВАХ и может иметь знак „+“ или „–“. Более явно нелинейность ВАХ можно представить, если формально ввести в (9) площадь токопроводящего контакта  $s$  в виде

$$\frac{dU}{dj} = r_s + j \frac{dr_s}{ds} \frac{ds}{dj}. \quad (10)$$

Знак выражения (10) определяется значением и знаком второго слагаемого. Производная  $dr_s/ds < 0$ ,

поэтому необходимо рассмотреть только знак наклона зависимости  $s(j)$ . Увеличение площади контакта  $ds/dj > 0$ , способное вызвать отрицательный наклон ВАХ, реализуется при относительно быстром растекании расплава Pb–Sn в зоне трения или при образовании диссипативной структуры в поверхностном слое, или при возникновении электроразрядов, фазового превращения. Может реализоваться любой другой дополнительный способ проводимости, приводящий к уменьшению электросопротивления. Это можно рассматривать как увеличение токопроводящей площади.

Увеличение электросопротивления при  $j > 300 \text{ A/cm}^2$  вызвано уменьшением содержания сплава Pb–Sn в зоне контакта, а также появлением непроводящих окислов в поверхностном слое, что равносильно уменьшению площади контакта, т. е.  $ds/dj < 0$  и второе слагаемое (2) становится положительным. Таким образом, наклон ВАХ определяется в этом случае способностью жидкого металла растекаться в зоне трения и удерживаться в ней. Следует отметить, что в присутствии легкоплавких элементов проводимость, обусловленная разрядами, заметно ниже, чем в случае их отсутствия. Можно предполагать также, что конструкция токосъемного композита, работоспособного при скольжении с высокой плотностью тока, должна содержать легкоплавкий металл в прочной матрице, но создание такого композита пока является не решенной проблемой.

## Выводы

Протекание электротока в зоне трения композитов на основе стали при плотности тока более  $50 \text{ A/cm}^2$  происходит через пятна фактического контакта и воздушный промежуток между ними в виде электроразрядов. Композиты на основе меди не реализуют электроразрядную проводимость вследствие перехода в режим катастрофического изнашивания при скольжении с плотностью тока более  $50 \text{ A/cm}^2$ . При скольжении с плотностью тока около  $300 \text{ A/cm}^2$  ток, протекающий посредством электроразрядов, превышает в несколько раз ток, протекающий через пятна фактического контакта. Площадь электроконтакта, обусловленная электроразрядами, превышает площадь фактического контакта примерно на 2 порядка. Материал зоны трения композитов, содержащих сталь, испытывает структурные изменения, которые увеличивают его твердость и удельное электросопротивление, причем удельное электросопротивление поверхностного слоя композитов на стальной основе ниже, чем удельное электросопротивление поверхностного слоя композитов на медной основе. Площадь фактического электроконтакта при введении расплава Pb–Sn в зону трения увеличивается более заметно, чем при реализации электроразрядной проводимости, что позволяет уменьшить электросопротивление зоны трения и осуществить нагружение контакта током плотностью более  $300 \text{ A/cm}^2$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта П.20.2.4 программы П.20.2 фундаментальных исследований СО РАН.

## Список литературы

- [1] Мышкин Н.К., Конциц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Изд. дом „Интеллект“, 2008. С. 90.
- [2] Дёмкин Н.Б., Коротков М.А., Бойченко В.И., Дзеджер Н.Н. // Электричество. 1971. № 8. С. 78.
- [3] Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3т. Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. С. 111.
- [4] Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 537 с.
- [5] Михин Н.М. Механизм внешнего трения твердых тел Трибология: Исследования и приложения: опыт стран США и СНГ / Под ред В.А. Белого и др. М.: Машиностроение, 1993. С. 31.
- [6] Шеньков Г.П. Физикохимия трения (применительно к избирательному переносу). Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1978. С. 136.
- [7] Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие / Под ред. В.В. Смирнова. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 546 с.
- [8] Самервил Дж.М. Электрическая дуга. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. С. 101.
- [9] Фадин В.В., Алеутдинова М.И. // Изв. вузов. Физика. 2009. № 6. С. 54.