



УДК 621.891

DOI 10.17073/0368-0797-2021-2-122-128



О РАЗРУШЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ВОЛЬФРАМА И СТАЛЬ-СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ ПО МОЛИБДЕНУ

М. И. Алеутдинова, В. В. Фадин

■ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

Аннотация. Рассмотрена возможность улучшения характеристик сухого скользящего электроконтакта с плотностью тока более 100 А/см² путем применения молибденового контртела. Показано, что вольфрам или металлические материалы, содержащие подшипниковую сталь (1,5 % Cr), при скольжении по молибдену со скоростью 5 м/с под воздействием электрического тока формировали контакт с низкой электропроводностью и высокой интенсивностью изнашивания. Это наблюдение служило основой настоящей работы. Применяя оптическую и электронную микроскопию поверхностей скольжения, было установлено, что сильная адгезия в интерфейсе была главной причиной быстрого разрушения поверхностных слоев и высокой интенсивности изнашивания. Было принято во внимание известное утверждение о том, что адгезия обусловлена низким содержанием оксидов между поверхностями контакта. Визуальное изучение поверхности скольжения молибдена позволило установить образование тонкого слоя переноса и отсутствие следов образования оксидов. То же самое наблюдалось на поверхности скольжения вольфрама. Это явление обусловлено высокой температурой образования оксидов вольфрама и молибдена. На поверхности скольжения материалов, содержащих сталь, наблюдался слой оксидов железа. Кроме того, были обнаружены следы тонкого трибослоя. Увеличение концентрации стали в первичной структуре композитов приводило к некоторому увеличению количества оксидов железа на поверхности скольжения, но не приводило к существенному увеличению электропроводности и износостойкости контакта. Неудовлетворительные характеристики контакта позволили сделать вывод о невозможности значительного улучшения параметров скольжения с токосъемом по молибдену и нецелесообразности его применения в качестве контртела для этих условий.

Ключевые слова: электропроводность скользящего контакта, интенсивность изнашивания, вязкое пластическое течение слоя переноса, адгезия, оксиды

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0006.

Для цитирования: Алеутдинова М.И., Фадин В.В. О разрушении поверхностных слоев вольфрама и сталь-содержащих материалов при скольжении с токосъемом по молибдену // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 122–128. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-122-128>

DETERIORATION OF SURFACE LAYERS OF TUNGSTEN AND STEEL-CONTAINING MATERIALS IN CURRENT COLLECTION SLIDING AGAINST MOLYBDENUM

M. I. Aleutdinova, V. V. Fadin

■ Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS (2/4 Akademicheskii ave., Tomsk 634021, Russian Federation)

Abstract. The possibility of improving the characteristics of a dry sliding electrical contact with a current density higher than 100 A/cm² by using a molybdenum counterbody is considered. It is shown that tungsten or metallic materials containing bearing steel (1.5 % Cr) in sliding against molybdenum at a speed of 5 m/s under electric current, forms a contact with low electrical conductivity and high wear intensity. This observation served as the basis of this work. Using optical and electron microscopy of sliding surfaces it was found that strong adhesion in the interface was the main reason for rapid surface layers deterioration and high wear intensity. A well-known statement was taken into account that adhesion is due to the low oxide content between the contact surfaces. Visual study of molybdenum sliding surface made it possible to establish formation of a thin transfer layer and absence of traces of oxide formation. The same was observed on sliding surface of tungsten that was caused by high temperature of tungsten and molybdenum oxides formation. A layer of iron oxides was observed on sliding surface of steel containing materials. In addition, traces of a thin tribolayer were found out. An increase in concentration of steel in the primary structure led to a slight increase in iron oxides on the sliding surface, but did not lead to a significant increase in electrical conductivity and wear resistance of the contact. Unsatisfactory characteristics of the contact allowed us to conclude that it is impossible to significantly improve sliding parameters with current collection against molybdenum and inappropriateness of its use as a counterbody for these conditions.

Keywords: sliding electrical contact, electrical conductivity of sliding contact, wear intensity, viscous plastic flow of transfer layer, adhesion, oxides

Funding. The work was performed within the framework of the state task of the IFPM SB RAS, subject number FWRW-2021-0006.

For citation: Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Deterioration of surface layers of tungsten and steel-containing materials in current collection sliding against molybdenum. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 122–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-122-128>

ВВЕДЕНИЕ

Поиск материалов, способных обеспечить высокую электропроводность контакта и низкую интенсивность изнашивания при скольжении под воздействием электрического тока, является приоритетной задачей при разработке скользящих электроконтактов. Для этого необходимо знать закономерности или основные особенности триботехнического поведения материалов в этих условиях. Известно [1, 2], что высокая электропроводность контакта должна проявиться при применении материалов с низким удельным электросопротивлением в соответствии с формулой Р. Хольма $r = \frac{0,25(\rho_1 - \rho_2)}{an}$ (где r – электросопротивление стягивания (сопротивление контакта); ρ_1 и ρ_2 – удельные электросопротивления контактирующих материалов; a и n – средний радиус пятен контакта и их количество). Можно ожидать, что контакты материалов с низким удельным электросопротивлением (вольфрам, молибден, медь и т.п.) будут обладать высокой электропроводностью. Электропроводность контакта может быть увеличена также путем повышения контактного давления, применения консистентной [1, 3] или газовой [4] смазки и другими способами. Однако применение смазки может быть неэффективным, например, в разреженной или бескислородной атмосфере, при пониженных или повышенных температурах, при ограничениях в конструкции узла трения и т. п. Поэтому возможность увеличения электропроводности скользящего контакта с токосъемом целесообразно изучать, в первую очередь, при скольжении без смазки.

Обычно промышленные сухие скользящие электроконтактные материалы работают в паре с медным контртелом при контактной плотности тока менее 60 А/см² и формируют контакт с удельной электропроводностью не выше 75 См/см² [1]. Представляет интерес провести скольжение с высокой плотностью тока (более 100 А/см²). Это требует увеличения электропроводности контакта и соответствующей прочности поверхностных слоев материалов. Но поверхность скольжения медного контртела быстро разрушается в сухом контакте со многими металлами [5, 6]. Поэтому сухое скольжение с высокой плотностью тока следует проводить в контакте с более прочными контртелами, например, со сталью или с тугоплавкими металлами. Следует отметить, что сухое скольжение металлических материалов по стали при высокой плотности тока позволяет достигать электропроводности контакта 300 См/см² (интенсивность изнашивания $I_h < 30$ мкм/км) при скорости скольжения 5 м/с [7]. Композит с бронзовыми или медными волокнами во фторопластовой обойме образует контакт

с электропроводностью выше 1000 См/см² (интенсивность изнашивания $I_h \ll 1$ мкм/км) при скольжении по меди со скоростями 2,5 – 7,5 м/с (в среде влажного углекислого газа CO₂) [4]. Эти сведения могут служить ориентирами для сравнения с данными, полученными при экспериментах с другими контртелами. Применение молибдена в качестве контртела для скольжения с токосъемом не изучено и представляет интерес получить более полные представления по этому вопросу. Ранее было показано [8], что на поверхности скольжения молибдена может образоваться слой переноса, позволяющий достигнуть удельной электропроводности контакта около 100 См/см². Покрытия из молибдена на разных металлах также применяются как контртела в условиях сухого скольжения без тока [9, 10]. Можно предположить, что молибден может служить контртелом в сухом скольжении с токосъемом с высокой плотностью тока. Но целесообразность его применения можно установить только экспериментально.

Обычно поверхностные слои насыщены деформационными дефектами, что вызывает уменьшение электропроводности контакта. Толщина оксидных пленок также влияет на электропроводность контакта. Эти факторы не могут быть удовлетворительно учтены в формуле Хольма. Это является дополнительным указанием на то, что пути к повышению электропроводности скользящего контакта могут быть найдены только экспериментально. Начальные сведения о возможности достижения удовлетворительной электропроводности контакта при скольжении по молибдену следует получить с применением модельных материалов, имеющих разные первичные структуры, например, порошковые композиты и компактные металлы.

Целью настоящей работы является изучение характера контактного взаимодействия металлических материалов при сухом скольжении по молибдену под воздействием электрического тока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Контртело было получено путем вакуумной электронно-лучевой наплавки порошкового молибдена марки ПМЧ (> 99 % Mo) на стальной диск. Вольфрам марки ВА (> 99 % W), литая подшипниковая сталь ШХ15 (1,5 % Cr) и композиты, содержащие медь и переработанную подшипниковую сталь ШХ15, служили в качестве токосъемных материалов. Переработка стали была произведена из шлифовальных отходов производства подшипников путем выдержки шлама при температуре T выше 700 °С в среде диссоциированного аммиака и размола спеченной массы в порошок. Со-

Основные характеристики электроконтактов модельных металлических материалов при их сухом скольжении по молибдену

Main characteristics of electrical contacts of the model metal materials in their dry sliding against molybdenum

Параметр контакта	Состав контакта							
	Cu – 20 % ШХ15		Cu – 50 % ШХ15	Cu – 80 % ШХ15		Сталь ШХ15		W
j , А/см ²	150	270	100	120	200	0	150	<170
r_s^{-1} , См/см ²	38	54	25	29	50	–	26	13 – 21
I_h , мкМ/кМ	83	289	67	211	642	33	578	40 – 80
НВ, ГПа	0,88		0,96	1,06		62 HRC		>3
ρ , мкОм·м	0,07		0,16	0,38		0,39		0,05

ставы композитов представлены в таблице. Композиты были получены спеканием в вакууме при температуре 1100 °С в течение 2 ч.

Металлографическое изучение образцов проведено на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 1С (ОМ) и на лазерном микроскопе «Olympus». Рентгеновский фазовый анализ поверхностных слоев выполнен на дифрактометре ДРОН-3. Изношенные поверхности скольжения изучены с помощью микроскопа «Olympus» и сканирующего растрового электронного микроскопа РЭМ-200 (СЭМ). Твердость НВ определена на твердомере Бринелля. Удельное электросопротивление ρ получено методом амперметра-вольтметра.

Триботехническое нагружение материалов проведено без смазки под воздействием переменного тока (50 Гц), при давлении $p = 0,13$ МПа, скорости скольжения $v = 5$ м/с на машине трения СМТ-1 по схеме вал – колодка (точнее «pin-on-ring»), как представлено в работе [8]. Линейная интенсивность изнашивания определена как $I_h = h/L$ (где h – изменение высоты образца на дистанции скольжения L). Контактная плотность тока определена как $j = i/A_a$ (где i – ток, протекающий через номинальную площадь контакта A_a). Удельная поверхностная электропроводность измерена как $r_s^{-1} = j/U$ (где U – контактное падение напряжения).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Удельная поверхностная электропроводность контактов r_s^{-1} всех материалов имеет низкие значения (см. таблицу) и не зависит явно от первичной структуры материалов, от твердости НВ или от удельного электросопротивления ρ . Это обусловлено низкими максимально достижимыми плотностями тока и соответствующими высокими падениями напряжения в контакте. Следует отметить, что наблюдали резкие и частые изменения тока и контактного падения напряжения. Это указывает на сильное адгезионное взаимодействие поверхностей скольжения. Видно также, что интенсивность изнашивания I_h любого материала имеет высокие значения.

Пластическая деформация поверхностей скольжения наблюдается в контакте W – Мо (рис. 1, а, б). Это приводит к возникновению слоя переноса (рис. 1, в), который играет роль «третьего тела». Несмотря на его присутствие на обеих контактных поверхностях, пластичность этого слоя низкая, что вызывает его быстрое усталостное разрушение. Видно (рис. 1, а, б), что слои переноса имеют слабые следы плавления и визуально не имеют принципиальных отличий друг от друга. Не исключено, что высокий износ вольфрама обеспечивает образование слоя переноса на его основе. Резко

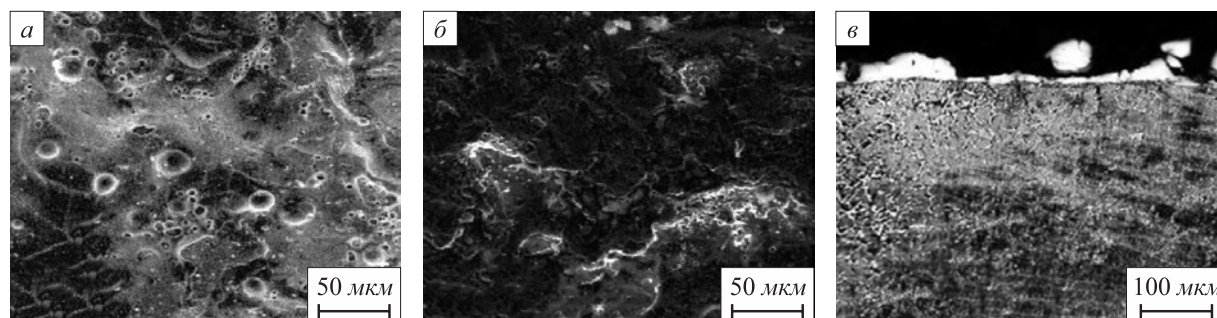


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности скольжения молибдена после контакта с вольфрамом (а), поверхность скольжения вольфрама после контакта с молибденом (б), оптическое изображение поперечного сечения слоя переноса на поверхности скольжения молибдена (в)

Fig. 1. SEM images of molybdenum sliding surface after contact with tungsten (a), tungsten sliding surface after contact with molybdenum (b), OM image of the cross-section of transfer layer on molybdenum sliding surface (c)

неравномерная толщина слоя переноса (рис. 1, в) указывает на его разрушение большими микрообъемами вследствие сильной адгезии в интерфейсе. Некоторые признаки адгезионных удалений микрообъемов наблюдаются также на поверхности скольжения вольфрама (рис. 1, б).

Закаленная подшипниковая сталь ШХ15 и композиты на основе переработанной подшипниковой стали ШХ15 образуют слои переноса (рис. 2, а, в, д). Поверхности скольжения этих материалов содержат оксиды (сектора черного цвета). Обычно в скользящем электроконтакте железосодержащих материалов образуется преимущественно оксид FeO [7, 11]. В то же время наблюдаются признаки сильного адгезионного взаимодействия с поверхностью скольжения молибденового контртела (рис. 2, б, з, е). Это значит, что релаксация напряжений в поверхностных слоях происходит за счет сильной пластической деформации и материал разрушается вследствие малоциклового усталости с низким количеством циклов. Поэтому проявляется высокая интенсивность изнашивания (см. таблицу). Значительная пластическая деформация поверхностного слоя молибдена не происходит во время скольжения любого из образцов.

Приведенные данные позволяют видеть, что заметное различие первичных структур оказывает слабое влияние на характер контактного взаимодействия, так как адгезия задает и особенности триботехнического поведения, и определяющий механизм разрушения поверхностных слоев, и характер изнашивания. Сильная адгезия, будучи основным фактором в зоне сухого контакта, возникает вследствие низкого количества оксидов или твердых смазок в интерфейсе. Оксиды разделяют

пятна контакта, то есть играют роль смазки и одновременно упрочняют поверхностные слои [7, 12 – 14].

Молибден и вольфрам имеют высокую коррозионную стойкость. Их оксиды образуются при температуре около 500 °С. Но температура в зоне контакта не достигает таких значений, так как адгезия в интерфейсе вызывает скачкообразное движение образца по контртелу и частое прерывание контакта. В общем случае сильная адгезия всегда приводит к прерывистому скользящему контакту под током или без тока. Прерывистый характер скольжения под внешним электрическим напряжением приводит к тому, что во время пролета образца между двумя физическими контактами с контртелом ток существует только в виде электрических разрядов, то есть сила тока устремляется к нулю. Это является основной причиной отсутствия возможности прохождения сильного тока через скользящий контакт. Низкая плотность тока j и соответствующее высокое (4 – 8 В) падение напряжения в контакте обуславливают низкую электропроводность контакта. Соответственно, температура контакта не способна достигать высоких значений, достаточных для образования оксидов. Кроме того, низкая максимально достижимая плотность тока и высокая теплопроводность молибдена в сочетании с удовлетворительным теплоотводом не способствуют увеличению температуры контакта. Следует отметить, что высокая температура в скользящем контакте является показателем высоких энергетических затрат. Это следует считать дефектом контакта. Поэтому контртело должно быть теплопроводным и способным к образованию оксидов и их удовлетворительной фиксации на поверхности скольжения при относительно низкой температуре контакта и при отсутствии смазки. Видно,

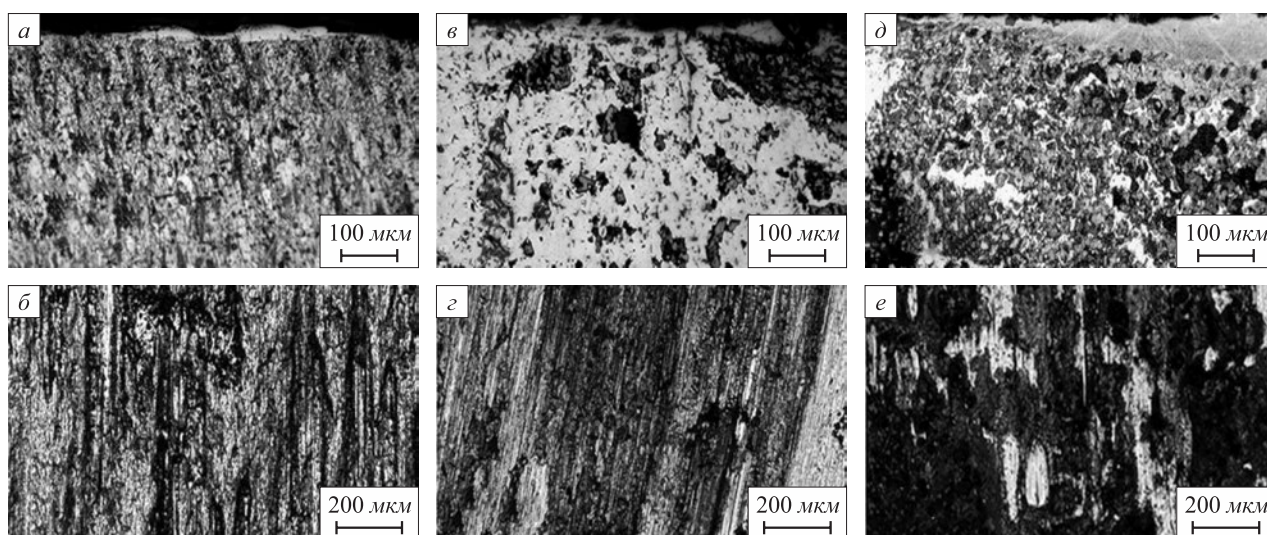


Рис. 2. ОМ-изображение поперечного сечения поверхностных слоев (а, в, д) и вид на изношенные поверхности (микроскоп «Olympus») (б, з, е):

а, б – литой подшипниковой стали ШХ15; в, з – композита состава Cu – 20 % ШХ15; д, е – композита состава Cu – 80 % ШХ15

Fig. 2. OM-image of the cross-section of surface layers (а, в, д) and a view of worn surfaces (Olympus microscope) (б, з, е):

а, б – ShKh15 cast bearing steel; в, з – composite of Cu – 20 % ShKh15 composition; д, е – composite of Cu – 80 % ShKh15 composition

что молибден и вольфрам не соответствуют этому требованию, так как в скользящем контакте W – Mo оксиды отсутствуют, что приводит к адгезии и к высокому значению I_h (см. таблицу).

Железо и многие стали окисляются вполне легко. Поэтому оксиды железа всегда образуются на поверхностях скользящих материалов, содержащих железо [15 – 18]. Часто наблюдаются пики Fe_3O_4 и Fe_2O_3 в большом количестве на рентгенограммах поверхностей скользящих без тока и при относительно высоких давлениях. Предполагается, что образование этих оксидов указывает на температуру контакта до 600 – 700 °C [19]. Утверждается, что эти оксиды являются продуктами разложения оксида FeO [15]. Можно допустить, что оксиды Fe_3O_4 и Fe_2O_3 способствуют снижению износа, но их присутствие на поверхности скользящих всегда соответствует следам сильной адгезии и пластического отсечения материала. Это указывает на невозможность надежно защитить эти оксиды поверхности скользящих от адгезионного разрушения во многих условиях трения. Не исключено, что образование оксида FeO и его фиксация в зоне контакта является более эффективным фактором для снижения адгезии. Но устойчивое присутствие оксида FeO на поверхности трения наблюдается, как правило, при скользящих с током или при скользящих без тока под низкими давлениями по стальному контртелу [20]. В настоящей работе некоторое количество оксида FeO образуется на поверхностях скользящих железосодержащих материалов (рис. 2, черные сектора). Но низкая электропроводность r_s^{-1} и высокая интенсивность изнашивания I_h рассмотренных материалов при скользящих по молибдену указывают на недостаточное количество оксида FeO в интерфейсе. При таких показателях подробное изучение структуры поверхностных слоев и триботехнического поведения этих металлов не является актуальным. Обычно сухое скольжение по коррозионностойким контртелам (например, по сплавам [21, 22] или нержавеющей сталям [23, 24]) сопровождается сильной адгезией. Поэтому применение таких контртел или молибдена является допустимым только для относительно легких условий трения, в частности, для скользящего токосъема при $j < 100$ А/см². Износостойкость в этих условиях может увеличиваться только за счет сохранения твердости первичной структуры в поверхностном слое. Например, высокая твердость вольфрама (см. таблицу) сохраняется в процессе

трения и обеспечивает более низкую интенсивность изнашивания I_h по сравнению с этим показателем других материалов.

Иногда повышенный износ может быть обусловлен электроэрозией поверхности скользящих. Защита от эрозии с помощью каких-либо покрытий (например, ZnO – Ag [25] в разрывных контактах) может быть неэффективной вследствие вероятного снижения электропроводности скользящего контакта и слабой устойчивости покрытия к сдвигу в интерфейсе. Кроме того, электрическая эрозия тугоплавких молибдена и вольфрама должна быть ничтожна. Поэтому округлые объекты на поверхности скользящих молибдена (рис. 1, а) могут быть не кратерами эрозии, а результатом пластического течения слоя переноса и образования сферических фрагментов, представленных на рис. 1, в. В общем случае электроэрозия слоя переноса на поверхности скользящих молибдена должна быть темой отдельного исследования. Но актуальность такого исследования пока трудно доказать.

Выводы

Выполнено сухое скольжение металлов по контртелу из молибдена под воздействием электрического тока, что позволило наблюдать следующее: поверхности скользящих молибденового контртела и металлических образцов покрыты слоями переноса, способными к локальному слабому вязкому пластическому течению; в скользящем электроконтакте вольфрам – молибден отсутствуют оксиды, закрепленные на поверхности скользящих и в слое переноса, что приводит к низкой электропроводности контакта и к сильному адгезионному изнашиванию; образцы, содержащие сталь в первичной структуре, способны образовать оксиды составов Fe – O (в основном FeO) на своих поверхностях скользящих, но количество этих оксидов не является достаточным для значительного ослабления адгезии в интерфейсе; адгезионное взаимодействие между поверхностями скользящих является главной причиной быстрого разрушения поверхностных слоев материалов; адгезия приводит к неравномерному движению образца, к резким и частым колебаниям тока, к низкой электропроводности контакта и к высокой интенсивности изнашивания; молибден не может быть рекомендован в качестве контртела для осуществления скользящего токосъема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin V.V. *Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology*. New York: CRC Press, 2007. 639 p.
2. Holm R. *Electrical Contacts*. New York: Springer, 1979. 484 p.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2008. 576 с.

1. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin V.V. *Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology*. New York: CRC Press, 2007. 639 p.
2. Holm R. *Electrical Contacts*. New York: Springer, 1979. 484 p.
3. *Friction, Wear and Lubrication (Tribology and Tribotechnics)*. Chichinadze A.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 576 p. (In Russ.).

4. Argibay N., Sawyer W.G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density // *Wear*. 2012. Vol. 274-275. P. 229–237. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2011.09.003>
5. 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. No. 11-12. P. 2998–3006. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.009>
6. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Rubtsov V.Ye., Aleutdinov K.A. Wear resistance of friction pair of metal composite/copper under electric current // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 156. Article 012027. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012027>
7. Алеутдинова М.И., Фадин В.В. О влиянии наклепа на износ стали Ст3 в скользящем сухом контакте при высокой плотности тока // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 6. С. 434–438. <http://doi.org/10.15825/0368-0797-2015-6-434-438>
8. Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Дураков В.Г. Износостойкость спеченных металлических композитов при трении по молибдену в условиях скользящего токосъема // *Вопросы материаловедения*. 2010. № 2 (62). С. 96–103.
9. Cetinel H., Ozturk H., Celik E., Karlik B. Artificial neural network-based prediction technique for wear loss quantities in Mo coatings // *Wear*. 2006. Vol. 261. No. 10. P. 1064–1068. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.040>
10. Deng X., Zhang G., Wang T., Ren Sh., Cao Q., Bai Zh., Liu Z. Microstructure and wear resistance of Mo coating deposited by plasma transferred arc process // *Materials Characterization*. 2017. Vol. 131. P. 517–525. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.07.044>
11. Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Рубцов В.Е. О некоторых параметрах сухого скользящего контакта сталь/сталь при высокой плотности тока // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 1. С. 43–47. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-1-43-47>
12. Aniolek K., Kupka M., Barylski A. Sliding wear resistance of oxide layers formed on a titanium surface during thermal oxidation // *Wear*. 2016. Vol. 356-357. P. 23–29. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.007>
13. Hager Jr C.H., Evans R.D. Friction and wear properties of black oxide surfaces in rolling/sliding contacts // *Wear*. 2015. Vol. 338-339. P. 221–231. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.013>
14. Wesmann J.A.R., Espallargas N. Elucidating the complex role of surface oxides formed during sliding of self-mated warm sprayed WC–CoCr in different environments // *Tribology International*. 2016. Vol. 94. P. 360–372. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.043>
15. Banerji A., Lukitsch M.J., McClory B., White D.R., Alpas A.T. Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores // *Wear*. 2017. Vol. 376-377. Part A. P. 858–868. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.032>
16. Rainforth W.M., Stevens R., Nutting J. Deformation structures induced by sliding contact // *Philosophical Magazine A*. 1992. Vol. 66. No. 4. P. 621–641. <http://doi.org/10.1080/01418619208201580>
17. So H., Yu D.S., Chuang C.Y. Formation and wear mechanism of tribo-oxides and the regime of oxidational wear of steel // *Wear*. 2002. Vol. 253. No. 9-10. P. 1004–1015. [http://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00230-2](http://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00230-2)
18. Wang S.Q., Wei M.X., Zhao Y.T. Effects of the tribo-oxide and matrix on dry sliding wear characteristics and mechanisms of a cast steel // *Wear*. 2010. Vol. 269. No. 5-6. P. 424–434. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
19. Su Y.-S., Li Sh.-X., Gao Q.-Y., Jiang H., Lu S.-Y., Yu F., Shu X.-D. Evolution of nano-laminated structure formed by the thermally-assisted plastic deformation in dry sliding wear // *Tribology International*. 2019. Vol. 140. Article 105846. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105846>
20. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. The role of FeO in creating of multilevel structure of the surface layer of metallic materials in the dry slip zone under electric current of high density // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2167. Article 020012. <https://doi.org/10.1063/1.5131879>
21. Wang X., Shen Xi., Zhao T., Sun F., Shen B. Tribological properties of SiC-based MCD films synthesized using different carbon sources
4. Argibay N., Sawyer W.G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density. *Wear*. 2012, vol. 274-275, pp. 229–237. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2011.09.003>
5. 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, no. 11-12, pp. 2998–3006. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2011.06.009>
6. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Rubtsov V.Ye., Aleutdinov K.A. Wear resistance of friction pair of metal composite/copper under electric current. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 156, article 012027. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/156/1/012027>
7. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Cold work hardening effect on wear of 0.2 % C steel in dry sliding contact at high current density. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 6, pp. 434–438. (In Russ.). <http://doi.org/10.15825/0368-0797-2015-6-434-438>
8. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Durakov V.G. Wear resistance of sintered metal composites with friction against molybdenum under conditions of sliding current collection. *Voprosy materialovedeniya*. 2010, no. 2 (62), pp. 96–103. (In Russ.).
9. Cetinel H., Ozturk H., Celik E., Karlik B. Artificial neural network-based prediction technique for wear loss quantities in Mo coatings. *Wear*. 2006, vol. 261, no. 10, pp. 1064–1068. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.040>
10. Deng X., Zhang G., Wang T., Ren Sh., Cao Q., Bai Zh., Liu Z. Microstructure and wear resistance of Mo coating deposited by plasma transferred arc process. *Materials Characterization*. 2017, vol. 131, pp. 517–525. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.07.044>
11. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Rubtsov V.E. On some parameters of dry sliding contact steel/steel at high current density. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 43–47. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-1-43-47>
12. Aniolek K., Kupka M., Barylski A. Sliding wear resistance of oxide layers formed on a titanium surface during thermal oxidation. *Wear*. 2016, vol. 356-357, pp. 23–29. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.007>
13. Hager Jr C.H., Evans R.D. Friction and wear properties of black oxide surfaces in rolling/sliding contacts. *Wear*. 2015, vol. 338-339, pp. 221–231. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2015.06.013>
14. Wesmann J.A.R., Espallargas N. Elucidating the complex role of surface oxides formed during sliding of self-mated warm sprayed WC–CoCr in different environments. *Tribology International*. 2016, vol. 94, pp. 360–372. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.043>
15. Banerji A., Lukitsch M.J., McClory B., White D.R., Alpas A.T. Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores. *Wear*. 2017, vol. 376-377, part A, pp. 858–868. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.032>
16. Rainforth W.M., Stevens R., Nutting J. Deformation structures induced by sliding contact. *Philosophical Magazine A*. 1992, vol. 66, no. 4, pp. 621–641. <http://doi.org/10.1080/01418619208201580>
17. So H., Yu D.S., Chuang C.Y. Formation and wear mechanism of tribo-oxides and the regime of oxidational wear of steel. *Wear*. 2002, vol. 253, no. 9-10, pp. 1004–1015. [http://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00230-2](http://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00230-2)
18. Wang S.Q., Wei M.X., Zhao Y.T. Effects of the tribo-oxide and matrix on dry sliding wear characteristics and mechanisms of a cast steel. *Wear*. 2010, vol. 269, no. 5-6, pp. 424–434. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
19. Su Y.-S., Li Sh.-X., Gao Q.-Y., Jiang H., Lu S.-Y., Yu F., Shu X.-D. Evolution of nano-laminated structure formed by the thermally-assisted plastic deformation in dry sliding wear. *Tribology International*. 2019, vol. 140, article 105846. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105846>
20. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. The role of FeO in creating of multilevel structure of the surface layer of metallic materials in the dry slip zone under electric current of high density. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2167, article 020012. <https://doi.org/10.1063/1.5131879>
21. Wang X., Shen Xi., Zhao T., Sun F., Shen B. Tribological properties of SiC-based MCD films synthesized using different carbon sources

- when sliding against Si₃N₄ // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 369. P. 448–459. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.249>
22. Wang Y.A., Li J.X., Yan Y., Qiao L.J. Effect of surface film on sliding friction and wear of copper-impregnated metallized carbon against a Cu–Cr–Zr alloy // *Applied Surface Science*. 2012. Vol. 258. No. 7. P. 2362–2367. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.030>
 23. 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. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.165>
 24. Bouchoucha A., Chekroud S., Paulmier D. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper–stainless steel // *Applied Surface Science*. 2004. Vol. 223. No. 4. P. 330–342. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.09.018>
 25. Romanov D., Moskovskii S., Kononov S., Sosnin K., Gromov V., Ivanov Yu. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 6. P. 5515–5523. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.019>
- when sliding against Si₃N₄. *Applied Surface Science*. 2016, vol. 369, pp. 448–459. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.01.249>
22. Wang Y.A., Li J.X., Yan Y., Qiao L.J. Effect of surface film on sliding friction and wear of copper-impregnated metallized carbon against a Cu–Cr–Zr alloy. *Applied Surface Science*. 2012, vol. 258, no. 7, pp. 2362–2367. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.030>
 23. 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. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.165>
 24. Bouchoucha A., Chekroud S., Paulmier D. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper–stainless steel. *Applied Surface Science*. 2004, vol. 223, no. 4, pp. 330–342. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.09.018>
 25. Romanov D., Moskovskii S., Kononov S., Sosnin K., Gromov V., Ivanov Yu. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 6, pp. 5515–5523. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.019>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Марина Ивановна Алеутдинова, к.т.н., научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

ORCID: 0000-0003-4940-9221

E-mail: aleut@ispms.tsc.ru

Виктор Вениаминович Фадин, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

ORCID: 0000-0002-5028-1002

E-mail: fvv@ispms.tsc.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina I. Aleutdinova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate, Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS

ORCID: 0000-0003-4940-9221

E-mail: aleut@ispms.tsc.ru

Viktor V. Fadin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Senior Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS

ORCID: 0000-0002-5028-1002

E-mail: fvv@ispms.tsc.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020

После доработки 29.06.2020

Принята к публикации 07.07.2020

Received 06.03.2020

Revised 29.06.2020

Accepted 07.07.2020