

УДК 621.891

ОБ ИЗНОСЕ СВИНЦОВИСТЫХ БРОНЗ В УСЛОВИЯХ СУХОГО СКОЛЬЖЕНИЯ С ТОКОСЪЁМОМ

^{1,2}Алеутдинова М.И., ¹Фадин В.В., ^{1,3}Мельников А.Г.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, e-mail: fvv@ispms.ru;

²Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, Северск, e-mail: aleut@ispms.ru;

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: melnikov_ag@tpu.ru

Осуществлено скольжение свинцовистых бронз твердостью $HB = 360\text{--}1050$ МПа по стальному контртелу под воздействием электрического тока без смазки по схеме трибоконтакта «вал-колодка». Контакт таких пар трения характеризуется высокой адгезией, и частицы износа бронз наблюдаются на поверхности трения контртела. Это приводит к низкой электропроводности контакта и к высокой интенсивности изнашивания бронз при низком ($0,13$ МПа) давлении и при низкой ($0\text{--}100$ А/см²) контактной плотности тока. Отмечено, что формирование зоны трения с такими слабыми характеристиками обусловлено неспособностью бронз формировать вторичные структуры, т.е. поверхностный слой, упрочненный деформационными дефектами, частицами оксида FeO и α -Fe. Следствием этого является низкая сдвиговая устойчивость поверхностного слоя на макромасштабном уровне. Для сравнения осуществлено скольжение меди твердостью $HB = 400$ МПа в этих же условиях. Показано, что износостойкость контакта меди намного превосходит износостойкость свинцовистых бронз. Это обусловлено способностью меди формировать вторичные структуры, содержащие деформационные дефекты, частицы оксида FeO и α -Fe.

Ключевые слова: пластическая деформация поверхностного слоя, релаксация напряжений, скользящий токосъем, сдвиговая устойчивость

ABOUT LEADED BRONZES WEAR UNDER DRY SLIDING CURRENT COLLECTION

^{1,2}Aleutdinova M.I., ¹Fadin V.V., ^{1,3}Melnikov A.G.

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian

Branch of Russian Academy of Science, Tomsk, e-mail: fvv@ispms.ru;

²Severskiy Technological Institute – branch State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «National Research Nuclear University MEPhI», Seversk, e-mail: aleut@ispms.ru;

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: melnikov_ag@tpu.ru

The sliding of leaded bronzes of hardness $HB = 360\text{--}1050$ MPa is realized on steel counterbody under electric current without lubricant according tribocontact scheme “pin-on-ring”. A contact of such pairs is characterized by high adhesion and wear particles of bronzes are observed on counterbody sliding surface. This leads to low contact electric conductance and to high wear intensity of bronzes at low ($0,13$ MPa) pressure and at low ($0\text{--}100$ A/cm²) contact current density. It is marked that the formation of friction zone with such weak characteristics is caused by incompetence of bronzes to form friction induced structures, i.e. the surface layer hardened by deformation defects, by particles of both oxide FeO and α -Fe. Low shear instability of surface layer at macroscale level is the sequence of it. Sliding of copper of hardness $HB = 400$ MPa is realized for comparison in the same conditions. It is shown that copper wear resistance is significantly higher wear resistance of leaded bronzes. It is caused by ability of copper to form friction induced structures containing deformation defects, particles of both oxide FeO and α -Fe.

Keywords: plastic deformation of surface layer, stress relaxation, sliding current collection, shear stability

Известно, что поверхностный слой материала претерпевает структурные изменения в процессе трения скольжения и, как правило, упрочняется. В общем случае высокая износостойкость достигается, если материал обладает и твёрдостью, и пластичностью [3]. Поэтому должно существовать некоторое оптимальное соотношение между твёрдостью и пластичностью, позволяющее материалу быть износостойким. Большинство триботехнических металлических материалов имеют медь или железо в качестве основы [5]. Эти материалы, как правило, упрочнены

различными методами. Было предположено, что материалы с упрочненной (сложной) структурой не способны быть износостойкими в условиях экстремального трения, т.к. они не имеют достаточного запаса пластичности. Это предположение было проверено в условиях скользящего электроконтакта сталей и композитов на их основе. Экстремальные условия были созданы благодаря протеканию электрического тока контактной плотностью более 100 А/см² без смазки. Было показано, что легированные и многофазные структуры в этих сталях (сталь Р6М5, сталь

110Г13, сталь ШХ15) не способны обеспечить высокую износостойкость по сравнению с простыми металлами (сталь 3, медь) [8]. Представляет научный интерес проверить это предположение на материалах с медной основой. Начальный этап такого исследования целесообразно провести на свинцовистых бронзах, структура которых имеет свинец в свободном состоянии. Такую структуру можно считать пористой, где поры заполнены свинцом. Бронзы применяются, как правило, в узлах трения со смазкой. Но состав смазки может заметно влиять на прочность и разрушение материала поверхностного слоя. Поэтому сначала следует провести изнашивание без смазки. Показателем прочности поверхностного слоя в этих условиях трения выступает интенсивность изнашивания.

Целью настоящей работы является изучение влияния содержания свинца в бронзе на ее изнашивание в условиях скольжения с током без смазки.

Материалы и методы исследования

Модельными материалами служили литые бронзы марки БрС10, БрС20, БрС30 и БрС12О2Н2Ц2. Изнашивание бронз проведено в условиях скользящего электроконтакта с переменным током без смазки при давлении 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1. Нагружение осуществлено по схеме «вал-колодка» (рисунок, а). Контртелом служила сталь 45 в закаленном (50 HRC) состоянии. Путь трения при каждом режиме составлял 9 км. Плотность тока определена как $j = i/A_a$, где i – ток, протекающий через номинальную площадь контакта A_a . Линейная интенсивность изнашивания определена как $I_h = h/L$, где h – изменение высоты образца на пути трения L . Для сравнения получены аналогичные характеристики для меди М1 (99,95 % Cu) твёрдостью $HB = 400$ МПа.

Результаты исследования и их обсуждение

Контактная плотность тока j в скользящем электроконтакте является главным фактором, определяющим разрушение поверхностного слоя и его изнашивание. Бронзы при трении даже в отсутствие контактного тока проявляют высокую интенсивность изнашивания (рисунок, б). При этом на поверхности трения контртела наблюдаются частицы бронзы. Протекание тока приводит к увеличению интенсивности изнашивания и количества бронзовых частиц на поверхности контртела. Эти частицы легко отделяются от контртела. Видно, что увеличение содержания свинца приводит к некоторому уменьшению I_h , уменьшению твёрдости HB и увеличению удельной поверхностной электропроводности $r_s^{-1} = j/U$, где U – контактное падение напряжения (таблица). Легированная бронза БрС12О2Н2Ц2 имеет более высокие твердость (таблица) и электропроводность контакта r_s^{-1} , а также проявляет несколько более низкую интенсивность изнашивания (рисунок, б), чем бронзы, рассмотренные выше. Кроме того, эта бронза оставляет малое количество частиц износа на контртеле. Следует отметить, что I_h бронзы БрС12О2Н2Ц2 несколько выше при скольжении без тока, чем при скольжении с током (рисунок, б), т.е. кривая $I_h(j)$ имеет минимум. Скольжение без тока не сопровождается появлением частиц износа на контртеле. Можно утверждать, что свинцовистые бронзы имеют очень низкую износостойкость. Это не позволяет определить плотность тока, соответствующую началу критического изнашивания. Видно также (таблица), что отсутствует явная зависимость I_h от твердости бронзы. Визуально цвет поверхности трения всех бронз не

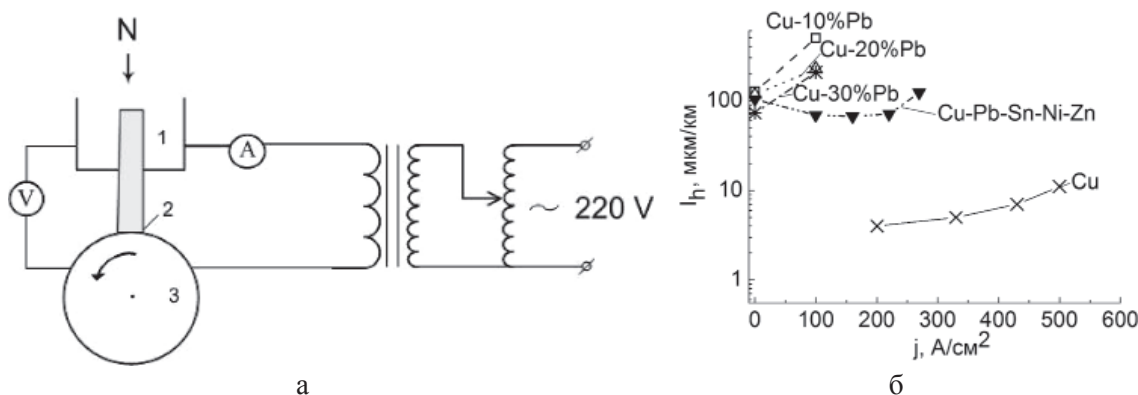


Рисунок.

а – принципиальная схема трибоиспытаний «вал-колодка» со скользящим током; 1 – держатель образца; 2 – образец (бронза); 3 – контртело (сталь 45, 50 HRC); б – токовая зависимость интенсивности изнашивания свинцовистых бронз и меди М1

отличается от цвета основного материала, что позволяет предположить отсутствие вторичных структур.

Медь М1 проявляет заметно более низкую интенсивность изнашивания (рисунок, б) и заметно более высокую электропроводность контакта r_s^{-1} (таблица, значения $r_s^{-1}(j)$ для контакта меди представлены курсивом) в сравнении со свинцовистыми бронзами. Медь не оставляет частиц износа на поверхности контртела. Начало катастрофического изнашивания проявляется при $j \approx 400$ А/см². Трение при любой плотности тока вызывает появление черного цвета на поверхности трения.

свинец резко снижает прочность бронзы, а рабочая поверхность свинцовистых бронз не поглощает попадающие на нее твердые частицы [5]. Появление частиц бронзы на контртеле указывает на отсутствие образования вторичных структур, т.е. происходит разрушение поверхностного слоя исходного материала из-за адгезии в контакте. Присутствие бронзы на контртеле резко уменьшает электропроводность контакта по сравнению с электропроводностью контакта с чистой поверхностью контртела. Увеличение содержания свинца приводит к уменьшению адгезии, что должно быть обусловлено появлением свинцовой пленки между

Твердость бронз и удельная поверхностная электропроводность их скользящего электроконтакта при контактной плотности тока 100–300 А/см²

Свойство/состав	БрС-10	БрС-20	БрС-30	БрС12О2Н2Ц2 (медь М1)			
<i>HV</i> , МПа	495	419	365	1049			
<i>j</i> , А/см ²	100	100	100	100	160	230	300
r_s^{-1} , См/см ²	48	56	62	74 (200)	91 (220)	121 (250)	150 (270)

В процессе трения происходит структурно-энергетическая приспособляемость поверхностного слоя, в результате которой в зоне контакта формируется тонкоплёночный объект – вторичные структуры, в которых локализованы все виды взаимодействий. Вторичные структуры экранируют основной материал от деструкции, имеют недислокационную структуру и неравновесные растворы окислителей в металлах в металлическом состоянии, а также химические соединения с резко выраженной нестехиометрией [2]. Отсутствие образования вторичных структур приводит, как правило, к быстрому разрушению поверхностного слоя, т.е. к высокому износу. Вторичные структуры образуются как результат релаксации напряжений на поверхности трения. Эта релаксация может произойти наиболее просто за счёт пластической деформации в зоне возникновения концентраторов напряжений. Но пластическая деформация не происходит легко в материалах, содержащих легирующие элементы, упрочняющие фазы, поры и т.п., т.е. в материалах с усложненной структурой, имеющих какие-либо структурные элементы, тормозящие движение дислокаций. Поэтому достижение удовлетворительной износостойкости возможно в случае применения материалов, имеющих высокий запас пластичности. Известно, что

бронзой и контртелом. Это проявляется в виде слабого уменьшения интенсивности изнашивания (рисунок, б) и слабого увеличения электропроводности r_s^{-1} контакта (таблица). То есть присутствие свинца как твёрдой смазки на поверхности контртела слабо влияет на контактные характеристики, в первую очередь на адгезию и прочность поверхностного слоя. Увеличение прочности поверхностного слоя за счёт легирования медной основы и достижения относительно высокой твердости бронзы БрС12О2Н2Ц2 не приводит к заметному увеличению прочности поверхностного слоя в процессе контактного взаимодействия, т.е. к заметному увеличению износостойкости. Уменьшение интенсивности изнашивания бронзы БрС12О2Н2Ц2 при увеличении *j* и появление минимума на кривой $I_h(j)$ обусловлено легирующими элементами. Близкое поведение кривой $I_h(j)$ наблюдается для скользящего электроконтакта углеграфитов, что представлено как смазывающее действие электрического тока [9]. Можно утверждать, что в условиях сухого скользящего электроконтакта свинцовистые бронзы не способны формировать вторичные структуры, а также упрочненный поверхностный слой с высокой сдвиговой устойчивостью на макромасштабном уровне. Поэтому на них не

представляется возможным наблюдать зависимость интенсивности изнашивания от степени сложности структуры.

Медь под воздействием сухого скользящего электроконтакта формирует вторичные структуры, что видно по появлению черного цвета на поверхности образца. Эти вторичные структуры содержат FeO и частицы α -Fe, перенесенные с контртела [7]. То есть поверхностный слой меди в этих условиях шаржирован твердыми фазами и насыщен деформационными дефектами, а также содержит медь. Такая структура позволяет материалу поверхностного слоя меди иметь некоторую твердость и в то же время некоторую пластичность. Кроме того, такая структура позволяет поверхностному слою релаксировать напряжения по механизму вязкой жидкости. Такая фазовая структура поверхностного слоя и следы появления жидкости наблюдаются на поверхности трения металлов и композитов, имеющих простой состав [7]. Но это не является результатом реального плавления, т.к. микрообъемы в окрестности пятен контакта подвергаются большим пластическим деформациям. Известно, что в момент контактирования в пятне контакта имеет место состояние вещества, отличающееся от того, которое можно наблюдать после прекращения трения. В момент контакта атомы находятся в сильновозбужденном состоянии, когда материал пятна контакта может течь, как квазижидкость. Кроме того, релаксация напряжений может происходить в условиях ротационных мод деформации [1, 4, 6]. Воздействие этих факторов на материалы с большим запасом пластичности не приводит к деформации на высшем структурном уровне, т.е. отсутствует появление микротрещин, не образуются частицы износа и материал проявляет удовлетворительную износостойкость. В сухом скользящем электроконтакте высокая износостойкость сопровождается, как правило, высокой электропроводностью контакта, что видно по характеристикам контакта меди (рисунок и таблица, курсив), а также по характеристикам контакта других материалов [7, 8].

Выше было показано, что основным фактором, приводящим к высокой износостойкости, является удовлетворительная релаксация напряжений в поверхностном слое. Одним из основных механизмов релаксации напряжений является пластическая деформация. Но из приведенных данных следует, что при разработке сильноточных износостойких скользя-

щих электроконтактов следует основное внимание уделять их исходной пластичности. Твердость материала также заслуживает внимания. Но в данной работе твердость меди сравнима с твердостью бронз БрС-10, БрС-20 и БрС-30 (таблица). Однако контактные характеристики меди резко отличаются от контактных характеристик бронз. Это подтверждает общее положение о том, что исходная твердость не является свойством материала, определяющим износостойкость [2, 5]. Нужно формировать твердость поверхностного слоя, т.е. твердость вторичных структур. Поверхностный слой свинцовистых бронз не способен упрочняться за счет наклепа или за счет удержания оксида FeO и частиц α -Fe (в отличие от меди), а также не способен к удовлетворительной пластической деформации. Это не позволяет бронзам проявить высокую износостойкость.

Заключение

Свинцовистые бронзы проявляют очень высокую интенсивность изнашивания и низкую электропроводность зоны трения в условиях сухого скользящего электроконтакта независимо от исходной твердости. Это связано с тем, что их поверхностный слой не способен трансформироваться во вторичные структуры в зоне контакта, т.е. не обладает удовлетворительной пластичностью, не может упрочняться за счет деформационных дефектов и удержания частиц FeO и α -Fe, перенесенных с контртела. Медь, обладая сравнимой твердостью и удовлетворительной пластичностью, может упрочнять свой поверхностный слой за счет деформационного упрочнения, удержания частиц оксида FeO и α -Fe, что позволяет ей формировать скользящий электроконтакт с удовлетворительными характеристиками.

Работа выполнена по проекту III.23.2.4 программы III.20.2 фундаментальных исследований СО РАН и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-00076.

Список литературы

1. Владимиров В.И.. Проблемы физики трения и изнашивания // Сб. научных трудов Физика износостойкости поверхности металлов. – Л: ЛФТИ АН СССР, 1988. – С. 8–41.
2. Костецкий Б.И. Структурно–энергетическая приспособляемость материалов при трении// Трение и износ. – 1985. – Т.6, № 2. – С. 201–212.
3. Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

4. Панин В.Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.И. Данилов и др. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. – 255 с.

5. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / И.М. Федорченко и др.; отв. ред. И.М. Федорченко. – Киев: Наук. Думка, 1985. – 624 с.

6. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – 64 с.

7. Фадин В.В. Изменения структуры поверхностного слоя металлических материалов при нагружении трением и электрическим током // Изв. вуз. Физика. – 2013. – Т. 56, № 4. – С. 16–21.

8. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Kolubaev A.V., Aleutdinova V.A. Contact Characteristics of Metallic Materials in Conditions of Heavy Loading by Friction or by Electric Current // Friction and Wear Research (FWR) 2 (2014) – P. 22–28

9. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology, 2007 by Taylor & Francis Group, LLC. – 640 p.

References

1. Vladimirov, V.I., *Sb.nauchnyh trudov Fizika iznosostojkosti poverhnosti metallov*. L: LFTI AN SSSR, 1988. pp. 8–41.

2. Kosteckij B.I. *Journal of friction and wear*, 1985, Vol.6, no. 2, pp. 201–212.

3. Kragel'skij I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschjotov na trenie i iznos*. M.: Mashinostroenie, 1977. 526 p.

4. Panin V.E., Grinjaev Ju.V., Danilov V.I. *Strukturnye urovni plasticheskoj deformacii i razrushenija*. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1990. 255 p.

5. *Poroshkovaja metallurgija. Materialy, tehnologija, svojstva, oblasti primenenija: Spravochnik* / I.M. Fedorchenko. Kiev: Nauk. Dumka, 1985. 624 p.

6. Tushinskij L.I., Poterjaev Ju.P. *Problemy materialovedenija v tribologii*. Novosibirsk: NJeTI, 1991. 64 p.

7. Fadin V. V. *Russ. Phys. J.*, 2013, Vol.56, no. 4, pp. 378–383.

8. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Kolubaev A.V., Aleutdinova V.A. *Friction and Wear Research (FWR)*, 2 (2014), pp. 22–28.

9. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology*, 2007 by Taylor & Francis Group, LLC. 640 p.

Рецензенты:

Семухин Б.С., д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск;

Бужкова С.П., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики наноструктурных функциональных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.