

УДК 621.891

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕДИ И СТАЛИ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПО СТАЛЬНОМУ КОНТРЕЛУ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОТОКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

¹Фадин В.В., ^{1,2}Алеутдинова М.И., ^{1,3}Рубцов В.Е.

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: rvy@ispms.ru

Осуществлен сухой скользящий электроконтакт меди и стали 3 по закаленной и незакаленной стали 45 при контактной плотности тока более 100 А/см² по схеме испытаний «вал-колодка». Показано, что интенсивность изнашивания меди в этих условиях заметно ниже, чем интенсивность изнашивания стали 3. Кроме того, скольжение с током по незакаленной стали 45 приводит к более высокой интенсивности изнашивания по сравнению со скольжением по закаленной стали 45. Из анализа вольтамперных характеристик этих скользящих электроконтактов следует, что контактное падение напряжения приблизительно одинаковое для стали и меди при скольжении по закаленной стали 45. Отсутствие закалки стали 45 приводит к реализации более высокого падения контактного напряжения по сравнению со скольжением по закаленной стали 45. Отмечено, что относительно высокая прочность поверхностного слоя, т.е. относительно высокая износостойкость меди, обусловлена ее более высокой пластичностью, т.е. удовлетворительной способностью к релаксации напряжений в поверхностном слое за счет пластической деформации.

Ключевые слова: пластическая деформация поверхностного слоя, релаксация напряжений, скользящий током, катастрофическое изнашивание

WEAR RESISTANCE OF COPPER AND STEEL AT SLIDING ON STEEL COUNTERBODY HIGH DENSITY ELECTRIC CURRENT

¹Fadin V.V., ^{1,2}Aleutdinova M.I., ^{1,3}Rubtsov V.E.

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: rvy@ispms.ru

Dry sliding electric contact of copper and steel AISI 1020 on quenched and unquenched steel AISI 1045 is realized according to testing scheme «pin-on-ring» at contact current density higher 100 A/cm². It is shown that copper wear intensity is remarkably lower than steel 1020 wear intensity under these conditions. Besides sliding current collection on unquenched steel 1045 lead to higher wear intensity comparing with sliding on quenched steel 1045. It is follows from analysis of current-voltage characteristics of these sliding electric contacts that contact voltage drop is approximately the same for steel 1020 and copper at sliding on quenched steel 1045. The absence of steel 1045 quenching lead to realization of higher voltage drop comparing with sliding on quenched steel 1045. It is marked that relatively high surface layer strength, i.e. relatively high wear resistance of copper is conditioned by its higher plasticity, i.e. its satisfactory ability to stress relaxation in surface layer owing to plastic deformation.

Keywords: plastic deformation of surface layer, stress relaxation, sliding current collection, catastrophic wear

Износостойкость (или интенсивность изнашивания) является интегральным показателем механической прочности поверхностного слоя материала. Высокая износостойкость достигается за счёт реализации высокой устойчивости структуры поверхностного слоя к воздействию трением. Устойчивость поверхностного слоя увеличивается при их обработке упрочняющими технологиями, например путём введения легирующих элементов, проведения химико-термической обработки и т.п. Но высокая износостойкость достигается также за счёт высокой пластичности поверхностного слоя [2]. Очевидно, что упрочнение поверхност-

ного слоя приведёт к снижению его пластичности и высокая износостойкость должна быть достигнута некоторым оптимальным соотношением между твёрдостью и пластичностью поверхностного слоя. Это оптимальное соотношение должно быть найдено экспериментально, т.к. научные основы для такого поиска отсутствуют. Обычно материалы, применяемые для трения при высоких давлениях, содержат твёрдые структурные составляющие (карбиды, оксиды и т.п. [9]) с целью обеспечения упругой деформации микрообъёмов, прилегающих к пятнам контакта. Но трение при высоких давлениях может привести к увеличению температуры

в зоне трения и соответствующему уменьшению предела текучести материала. Тогда становится возможной пластическая деформация микрообъемов поверхностного слоя. В этом случае может произойти его быстрое разрушение вследствие исчерпания запаса пластичности, что проявится в виде высокого износа [1, 3, 6, 10].

Пластическая деформация поверхностного слоя в зоне трибоконтакта может произойти при дополнительном приложении других видов воздействий, например электрического или теплового воздействий и т.п. Разрушение материала под совместным воздействием трения и тока высокой контактной плотности может происходить с более высокой скоростью, чем под воздействием трения с высоким давлением. Износостойкость материалов при трении с высокой давлением изучена достаточно подробно [2, 6, 9]. Существующие данные о трении материалов с высокой плотностью тока в контакте [4, 5, 7, 8] не позволяют составить удовлетворительное представление о возможности увеличения прочности поверхностного слоя и об увеличении износостойкости. Поэтому представляется целесообразным продолжить изучение поведения материалов при скольжении с высокой контактной плотностью тока, которая является основным разрушающим фактором зоны трения. Одной из основных задач исследования в этом направлении является определение пределов работоспособности в зависимости от плотности тока, а также проведение поиска возможности её увеличения. Работоспособность должна быть оценена по критерию износостойкости, которая зависит от многих входных параметров трибосистемы (давление, скорость скольжения, состав и структура контактирующих материалов и т.п.).

Применяемые материалы для скользящего электроконтакта имеют удовлетвори-

тельную износостойкость без смазки при плотности тока менее 50 А/см². Обычно токоёмные материалы содержат медь или железо в качестве основы. Контртелом служит медь, но в редких исключительных случаях применяется сталь. Известно, что закаленная сталь является удобным контртелом для осуществления сухого скользящего электроконтакта при высокой контактной плотности тока [5]. Представляет научный интерес определить износостойкость скользящего электроконтакта и его контактное падение напряжения при высокой плотности тока, где контртелом служит незакаленная сталь. Таким образом можно получить некоторое представление о влиянии структурного и напряженного состояния контртела на работоспособность трибосистемы с токоёмом. Модельными материалами могут служить медь и сталь 3.

Целью настоящей работы является получение начальных представлений об изменении износостойкости меди и стали 3 при сухом скольжении по стали в зависимости от её структурно-напряжённого состояния в условиях протекания электрического тока с контактной плотностью более 100 А/см².

Материалы и методы исследования

Модельными материалами служили сталь 3 твёрдостью $HB = 2,7$ ГПа и медь твёрдостью $HB = 0,9$ ГПа. Износостойкость и вольтамперная характеристика (ВАХ) зоны трения определены 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» (рис. 1).

Контртелом служила сталь 45 в закаленном (50 HRC) и незакаленном ($HB = 2,0$ ГПа) состояниях. 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 .

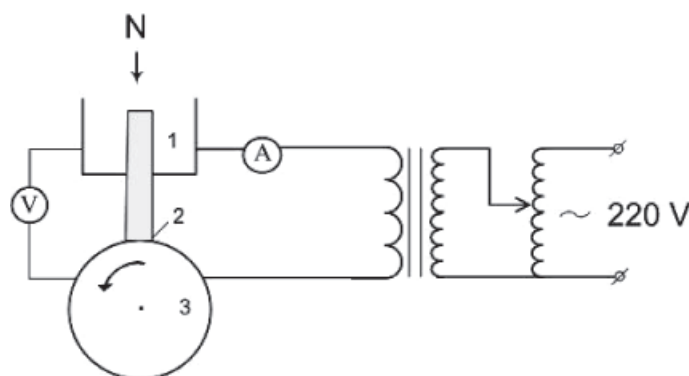


Рис. 1. Принципиальная схема трибоиспытаний «вал-колодка» со скользящим токоёмом: 1 – держатель образца; 2 – образец (сталь 3); 3 – контртело (сталь 45)

Результаты эксперимента и их обсуждение

Построение вольтамперной характеристики (ВАХ) скользящего электроконтакта и определение контактного падения напряжения является необходимой процедурой при исследовании взаимодействия поверхностных слоёв контактирующих материалов. Низкое контактное падение напряжения U реализуется при низком электросопротивлении контакта. ВАХ контактов меди (рис. 2, а) и стали 3 (рис. 2, б) увеличиваются монотонно при увеличении j , но при $j \approx 400$ А/см² наблюдается их перегиб. Одновременно наблюдается резкое увеличение интенсивности изнашивания I_h меди (рис. 2, в) и стали 3 (рис. 2, г). Это указывает на начало катастрофического изнашивания при некотором значении $j = j_c$. Характерной особенностью ВАХ контакта с закаленным контртелом является наличие более низкого контактного падения напряжения U и более низкой I_h .

Выше отмечено, что высокая износостойкость достигается при увеличении твёрдости и при увеличении пластичности

материала [2]. Это указывает на необходимость поиска некоторого оптимального соотношения между твёрдостью и пластичностью первичной структуры каждого из контактирующих материалов. На основе вышеизложенного видно, что закаленная сталь 45 (контртело) позволяет формировать скользящий электроконтакт с относительно высокой износостойкостью меди и стали 3. Известно также, что закаленные сталь ШХ15 и сталь У12 с твёрдостью более 60 HRC проявляют высокую износостойкость при скольжении с токоёмом по закаленной стали 45 [5]. Но их износостойкость не превышает износостойкость более мягких меди и стали 3. То есть высокая твёрдость материала в исходном состоянии не всегда обеспечивает высокую стабильность структуры его поверхностного слоя и, соответственно, высокую износостойкость. Эту особенность скользящего электроконтакта можно наблюдать на изменении износостойкости меди, когда невысокая начальная твёрдость меди обеспечивает её поверхностному слою высокую стабильность в процессе трения.

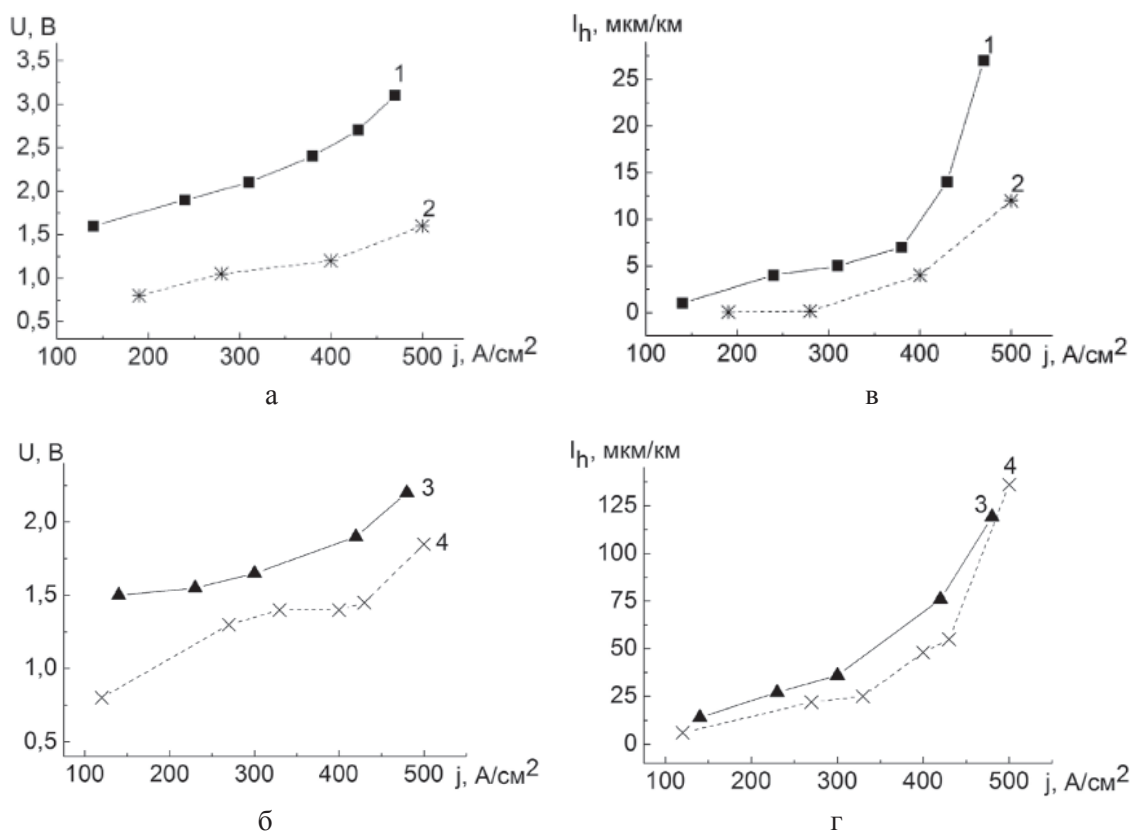


Рис. 2. Токосые зависимости контактного падения напряжения меди (а) и стали 3 (б) и интенсивности изнашивания меди (в) и стали 3 (г) при скольжении по незакаленной стали 45 (кривые 1, 3), по закаленной стали 45 (кривые 2, 4)

В общем случае высокая стабильность структуры поверхностного слоя (и высокая износостойкость) обусловлены удовлетворительной релаксацией напряжений, возникающих в пятнах контакта. Это возможно в случае, когда концентраторы напряжений в материале поверхностного слоя не создают предельное напряжённое состояние на большом расстоянии от себя. Наиболее просто это условие может выполняться в случае, когда релаксация напряжений в поле действия сил концентратора напряжений происходит за счёт пластической деформации. То есть для обеспечения высокой износостойкости материал поверхностного слоя должен обладать низкой сдвиговой устойчивостью или, более конкретно, высокой пластичностью.

Толщина поверхностного слоя является одним из параметров структурного состояния поверхности трения. Эта толщина проявляет глубину, на которую распространяется пластическая деформация. Известно, что материал поверхностного слоя меди упрочнён оксидом FeO и частицами α -Fe. Но медь в поверхностном слое имеет удовлетворительную пластичность, что позволяет удовлетворительно релаксировать напряжения за счёт пластической деформации. В этом случае глубина проникновения пластической деформации будет невысокой, т.к. предел текучести меди относительно невысок даже при деформационном упрочнении поверхностного слоя и напряжения в окрестности пятен контакта релаксируются локальной пластической деформацией. То есть сдвиговая неустойчивость меди на микромасштабном (локальном) уровне позволяет сохранить сдвиговую устойчивость поверхностного слоя на макромасштабном уровне (в объёме всего поверхностного слоя) и в пластическую деформацию вовлекаются небольшие объёмы поверхностного слоя. Это приводит также к небольшому падению напряжения в контакте (рис. 2, а).

Деформация поверхностного слоя стали 3 вызывает его упрочнение за счёт появления деформационных дефектов, что обуславливает повышение его предела текучести. В этом случае напряжения в окрестности пятен контакта распространяются на большое расстояние. Релаксация этих напряжений за счёт пластической деформации приводит к тому, что толщина поверхностного слоя стали 3 должна быть выше толщины поверхностного слоя меди. То есть объёмы, вовлечённые в пластическую деформацию, имеют большие размеры и масштаб пластической деформации поверхностного слоя будет относительно высоким. В процессе скольжения структур-

ные изменения поверхностного слоя стали 3 приводят к образованию в нём оксида FeO, фаз γ -Fe и α -Fe [4]. Эти фазы не способны эффективно удержаться в поверхностном слое и упрочнить его, что видно по высокой интенсивности изнашивания (рис. 2, з). Эти факторы способствуют формированию контакта с относительно высоким падением напряжения (рис. 2, б).

Удельная мощность (тепловой поток) в зоне трения с токоёмом может быть записана в виде

$$q = \frac{f \cdot N \cdot v + i \cdot U}{A_a} = f \cdot p_a \cdot v + j \cdot U,$$

где f – коэффициент трения; N – нормальная нагрузка; v – скорость скольжения; i – ток; U – контактное падение напряжения; A_a – номинальная площадь контакта; p_a – давление. Уменьшение твёрдости одного из контактирующих тел вызывает обычно увеличение f [2]. Это значит, что контртело с низкой твёрдостью обуславливает взаимодействие с более высоким коэффициентом трения. Увеличение f приводит к увеличению q , что приводит к увеличению температуры поверхности трения и, соответственно, к увеличению адгезионного взаимодействия. Усиление адгезии должно увеличить масштаб пластически деформируемых микрорезов поверхностного слоя, т.е. должна увеличиться толщина поверхностного слоя. Это должно быть причиной увеличения интенсивности изнашивания. Проверка этого утверждения не может быть проведена корректно, т.к. толщина поверхностного слоя неодинакова на разных участках поверхности трения вследствие резкого различия термодинамических условий в пятнах контакта. Но увеличение толщины пластически деформированного (содержащего большое количество структурных дефектов) слоя незакаленной стали 45 должно вызвать увеличение U .

Пластическая деформация поверхностного слоя контактирующих материалов приводит к образованию фрагментированной структуры. Отсутствие компенсации поворотных мод деформации в такой структуре вызывает возникновение частицы износа. Материал поверхностного слоя с низкой сдвиговой устойчивостью способен к компенсации этих мод и создаётся возможность структурно-фазовых переходов под нагрузкой и квазивязкое затекание материала между разориентированными фрагментами, а также развивается хорошо согласованная иерархия градиентных поворотных мод деформации [3]. Это приводит к проявлению удовлетворительной релаксации напряжений в поверхностном слое

и возникновению малого количества частиц износа, т.к. структура поверхностного слоя квазистабильна и реализуется высокая износостойкость.

Заключение

Режим нормального изнашивания меди и стали 3 при сухом скольжении по закаленной и незакаленной стали 45 под воздействием электрического тока может быть реализован при плотности тока не более 400 А/см². Превышение этой плотности тока вызывает катастрофическое изнашивание образца. Интенсивность изнашивания меди не превышает 15 мкм/км в условиях нормального изнашивания. Интенсивность изнашивания стали 3 в этих условиях находится в пределах до 70 мкм/км. То есть прочность поверхностного слоя меди заметно выше прочности поверхностного слоя стали 3 в процессе трения. Относительно высокая износостойкость меди обусловлена более высокой пластичностью, т.е. её способностью к релаксации напряжений за счёт пластической деформации поверхностного слоя.

Работа выполнена 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. Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
3. Панин В.Е. Трибоконтакт в парах трения как многоуровневая иерархически организованная система / В.Е. Панин, Ю.И. Почивалов и др. // Физ. мезомех. – 2010. – Т. 13, № 6. – С. 27–34.
4. Фадин В.В., Алеутдинова М.И., Колубаев А.В. Влияние трения и электрического тока на структурные изменения контактного слоя металлов и сталей // Изв. вуз. Физика. – 2013. – Т. 56, № 12/2. – С. 213–217.
5. Фадин В.В., Алеутдинова М.И., Куликова О.А. Влияние твёрдости на износостойкость материала в условиях экстремального воздействия электрическим током и трением // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-14840> (дата обращения: 10.10.2014).
6. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спечённые антифрикционные материалы. м Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
7. Bares J.A. High current density copper-on-copper sliding electrical contact at low sliding velocities / J.A. Bares, N. Argibay et al. // *Wear* 267 (2009). – P. 417–424.
8. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology, 2007 by Taylor & Francis Group, LLC. – 640 p.
9. Hirasata K. Friction and wear of several kinds of cast irons under severe sliding conditions / K. Hirasata, K. Hayashi, Y. Inamoto // *Wear*. – 263 (2007). – P. 790–800.
10. Hua M. Friction and wear behavior of SUS 304 austenitic stainless steel against Al₂O₃ ceramic ball under relative high load / M. Hua, X. Wei, J. Li. // *Wear*. – 265 (2008) – P. 799–810.

References

1. Vladimirov, V.I., *Sb. nauchnyh trudov Fizika iznosostojkosti poverhnosti metallov*. L: LFTIAN SSSR, 1988. pp. 8–41.
2. Kragel'skij I.V., Dobychin M.N., Komalov V.S. *Osnovy raschjotov na trenie i iznos*. M.: Mashinostroenie, 1977. 526 p.
3. Panin V.E., Pochivalov Ju.I., Moiseenko D.D., Maksimov P.V., Bikineev G.Sh. *Fiz.mezomeh.*, 2010, Vol.13, no.6, pp. 27–34.
4. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Kolubaev A.V. *Izv. vuz. Fizika*, 2013, Vol. 56, no.12/2, pp. 213–217.
5. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Kulikova O.A. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2014, no 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-14840> (accessed 10.10.2014).
6. Fedorchenko I.M., Pugina L.I. *Kompozicionnye spechjonnye antifrikcionnye materialy*. Kiev: Naukova dumka, 1980. 404 p.
7. Bares JA, Argibay N., Mauntle N., Dudder GJ., Perry SS., Bourne GR., Sawyer W.G. *Wear*, 267 (2009), pp. 417–424.
8. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology*, 2007 by Taylor & Francis Group, LLC. 640 p.
9. Hirasata K., Hayashi K., Inamoto Y. *Wear* 263 (2007), pp. 790–800.
10. Hua M., Wei X., Li J. *Wear* 265 (2008), pp. 799–810.

Рецензенты:

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

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