

ВЛИЯНИЕ ТВЁРДОСТИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ И ТРЕНИЕМ

Фадин В.В.¹, Алеутдинова М.И.^{1,2}, Куликова О.А.³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия (634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4), e-mail: aleut@bk.ru

²Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, Северск, Россия (636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65)

³Томский государственный университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36)

Определена износостойкость подшипниковой стали ШХ15 и углеродистой стали У12 в закаленном и незакаленном состояниях. Эксперименты проведены в условиях скользящего токосъёма без смазки при плотности тока более 100 А/см². Показано, что износостойкость этих сталей в закаленном состоянии выше, чем в незакаленном. Сопоставление с известными данными позволяет отметить, что упрочнение путём закалки и создания мартенситной структуры не позволяет увеличить износостойкость всех сталей при трении в этих условиях. Изучена возможность увеличения износостойкости за счёт введения частиц карбида титана в первичную структуру спечённого материала. Показано, что упрочнение материала таким способом не приводит к увеличению износостойкости. Проведено сравнение износостойкости этих материалов с износостойкостью известного токосъёмного порошкового материала ИЛГТ. Показано, что его износостойкость ниже износостойкости исследованных сталей, несмотря на его удовлетворительную теплопроводность и низкое удельное электросопротивление. Сделано утверждение, что износостойкость будет высокая, если поверхностный слой материала для трения в этих условиях будет иметь большой запас пластичности.

Ключевые слова: деформация поверхностного слоя, пластичность, усталость, трение, скользящий токосъём, катастрофический износ.

EFFECT OF HARDNESS ON MATERIAL WEAR RESISTANCE IN CONDITIONS OF EXTREME EXPOSURE BY ELECTRIC CURRENT AND FRICTION

Fadin V.V.¹, Aleutdinova M.I.^{1,2}, Kulikova O.A.³

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of Russian Academy of Science, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4), e-mail: aleut@bk.ru

²Severskiy Technological Institute - branch State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «National Research Nuclear University MEPhI», Seversk, Russia (636036, Seversk, pr. Kommunisticheskii, 65)

³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, pr. Lenina, 30)

Wear resistant of ball bearing steel and carbon steel being in quenched and unquenched states has been defined. Experiments were occurred in conditions of sliding current collection without lubricant at current density higher 100 A/cm². It was shown wear resistance of these steels in quenched state is higher than wear resistance in unquenched state. Comparison with known date allows mark that hardening by quenching and martensitic structure creating did not permit increase wear resistance of all steels in friction in this conditions. The possibility of wear resistance increasing by TiC particles intrusion was studied. It was shown that material hardening by this method did not lead to wear resistance increasing. It was made the comparison of these materials with wear resistance of known current collection powder material. It was shown its wear resistance is lower than wear resistance of studied steels in spite of its satisfied heat conductance and low specific electric resistance. It was made the affirmation that wear resistance will high if the surface layer will have a large plasticity reserve.

Keywords: surface layer deformation, plasticity, weariness, friction, sliding current collection, catastrophic wear.

Известно, что основная нагрузка при трении скольжения распределяется по пятнам контакта [2; 4]. Микрообъёмы, прилегающие к пятнам контакта, деформируются в условиях усталости. Высокая усталостная стойкость этих микрообъёмов обеспечивает квазиупругий контакт на пятнах контакта, что приводит к высокой износостойкости. Т.е. деформация микрообъёмов должна происходить в условиях многоциклового усталости, которая достигается

различными видами повышения предела текучести первичной структуры, например легированием, химико-термической обработкой и т.п. [1; 6]. Такое упрочнение первичной структуры целесообразно в случае, когда режим трения не вызывает структурных изменений поверхностного слоя (ПС) и микрообъёмы деформируются упруго. Однако более интересным представляется рассмотрение поведения материала при экстремальных параметрах трения, когда происходит пластическая деформация поверхностных микрообъёмов. В этом случае повышение предела текучести материала приводит к снижению предела пластичности, и в условиях экстремальных нагрузок релаксация напряжений в пятнах контакта за счёт пластической деформации будет затруднена.

Повышение предела текучести означает увеличение твёрдости. Если нагрузки в пятне контакта превышают твёрдость ПС, то реализуется пластическая деформация микрообъёмов, проявляется режим малоциклового усталости, что приводит к разрушению ПС и появлению износа. Материал, имеющий низкий предел пластичности, должен разрушаться быстрее, чем материал с высоким пределом пластичности. Кроме того, в ПС при трении происходит перераспределение элементов и появление новых фаз, что уменьшает предел пластичности. Первичная структура износостойкого материала для трения в этих условиях не может быть предсказана, но может быть приближённо определена экспериментально.

Твёрдость является важным свойством первичной структуры и обуславливает высокую износостойкость. Однако в экстремальных условиях трения твёрдость микрообъёмов может быть меньше твёрдости первичной структуры вследствие температурной вспышки в пятне контакта. Экстремальный режим трения можно создать за счёт высокого давления или путём пропуска электрического тока большой плотности через контакт. Максимальная рабочая плотность тока, применяемая в скользящих электроконтактах, не превышает 60 А/см². Экстремальное непосредственное воздействие на пятна контакта должно быть выше. В качестве модельных материалов целесообразно применять закаленные и незакаленные стали.

Целью настоящей работы является определение роли твёрдости материала для достижения высокой износостойкости при скольжении с плотностью тока более 100 А/см².

Методика проведения исследований

Модельными материалами служили стали ШХ15 и У12 в закаленном и незакаленном состоянии. Износостойкость и электропроводность 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 (50 HRC). Путь трения 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 приведены эти же характеристики контакта спечённого композита, упрочненного карбидом титана (состав Cu+10%графит+70%K(TiC), где K(TiC) = 65%TiC+10%Cu+сталь 110Г13). Спекание проведено в вакууме при $T=1100$ °С в течение 2 часов. Приведены также характеристики контакта промышленного горячепрессованного композита марки ИЛГТ (43%Cu+42%Fe+10%Pb+2%Zn+графит), применяемого для осуществления контакта с троллеем.

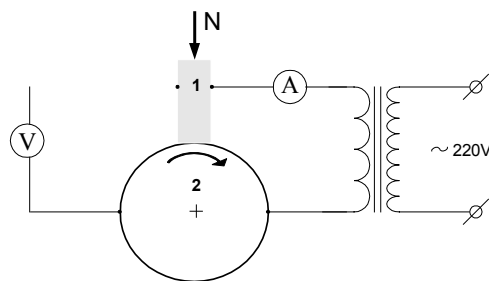


Рис. 1. Принципиальная схема трибосопряжения типа «вал - колодка»:

1 – образец; 2 – контртело

Результаты и обсуждение

Высокая твёрдость ПС в процессе трения обеспечивает высокую износостойкость. На рис. 2 а, б видно, что различие твёрдости стали ШХ15 (таблица 1) в закаленном и незакаленном состоянии не приводит к заметному различию электропроводности $r_s^{-1}=j/U$ (U – контактное падение напряжения) и износостойкости контакта. Достижение состояния катастрофического изнашивания при $j \approx 350$ А/см² сопровождается уменьшением r_s^{-1} и некоторым увеличением интенсивности изнашивания I_h . Дальнейшее увеличение j и I_h невозможно вследствие увеличения электросопротивления контактного слоя и падения контактного тока. При этом $r_s^{-1} < 300$ См/см².

Таблица 1

Твёрдость и физические характеристики металлических материалов

Свойство/состав	ШХ15	ШХ15	У12	У12	Cu+K(TiC)+графит	ИЛГТ
НВ, МПа	63 HRC	2280	62 HRC	3260	1140	610
λ , Вт/м·К	40 [3]	40 [3]	45 [3]	45 [3]	28	43
ρ , мкОм·м	0,39 [3]	0,39 [3]	0,25 [3]	0,25 [3]	0,32	0,16
П, %	0	0	0	0	13	15

Закаленная сталь У12 достигает катастрофического изнашивания при $r_s^{-1} \approx 300$ См/см² и

$j \approx 350 \text{ A/cm}^2$. Незакаленная сталь У12 формирует более низкие характеристики контакта (рис. 2 в, з).

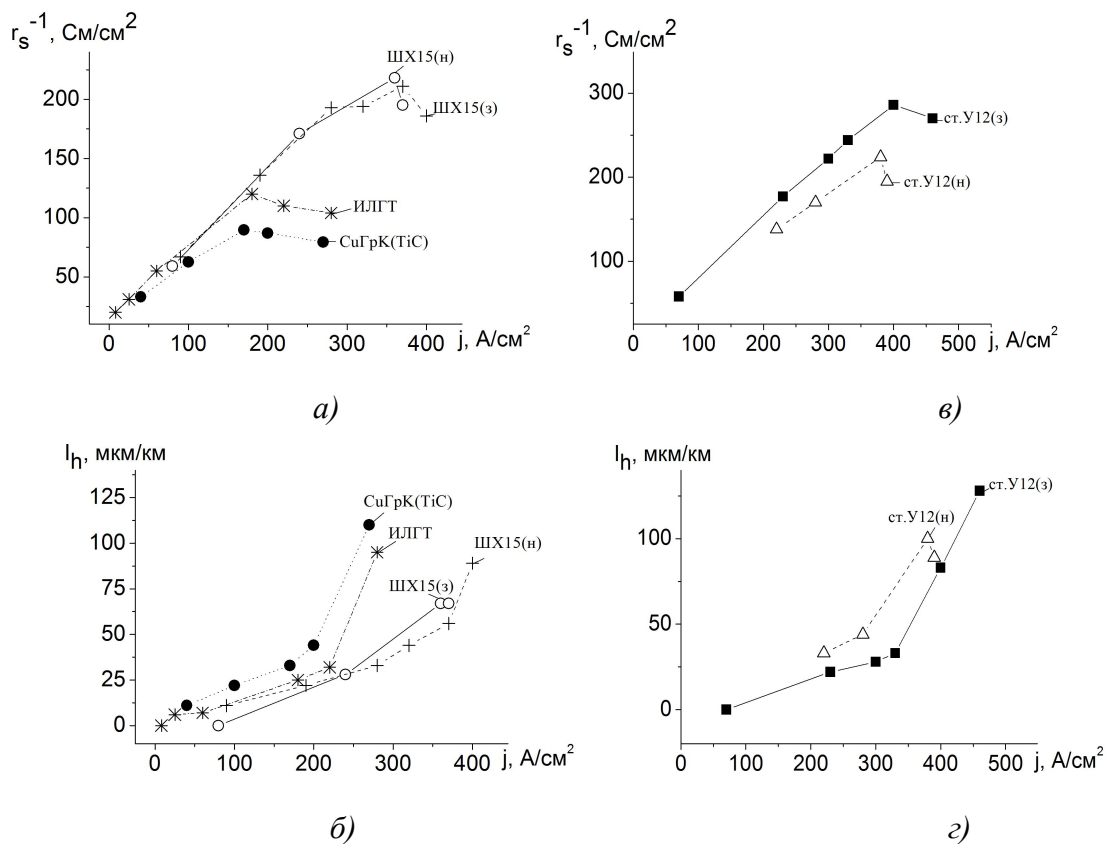


Рис. 2. Удельная поверхностная электропроводность (а, в) и линейная интенсивность изнашивания (б, з) металлических материалов.

Можно видеть, что начало катастрофического изнашивания сопровождается, как правило, резким увеличением I_h и одновременным уменьшением r_s^{-1} . Катастрофическое разрушение ПС стали ШХ15 начинается при более низких характеристиках контакта (r_s^{-1} , j , I_h), чем катастрофическое разрушение стали У12. Отчасти это можно объяснить более высоким удельным электросопротивлением ρ (таблица 1) и соответствующим более сильным выделением джоулевого тепла. При более низкой теплопроводности λ стали ШХ15 температура её ПС будет выше, чем температура ПС стали У12. Поэтому микрообъёмы пятен контакта, находясь при более высокой температуре, начинают деформироваться в режиме малоциклового усталости при более низкой j , что приводит к более низкой износостойкости.

Видно, что упрочнение закалкой первичной структуры позволяет формировать более высокие характеристики контакта (рис. 2). Можно предположить, что упрочнение первичной структуры твёрдыми частицами TiC также приведёт к высокой износостойкости. Проверка этого предположения проведена на примере композита Cu+K(TiC)+графит, который имеет ρ ,

сравнимое с ρ сталей. Кроме того, этот композит содержит много меди и должен эффективно отводить тепло от зоны трения, несмотря на формально низкую теплопроводность, которая обусловлена его пористостью (таблица 1). Однако композит Cu+K(TiC)+графит формирует зону трения с низкими характеристиками (рис. 2 а, б). В соответствии с концепциями, изложенными в [5; 7], это может быть обусловлено низкой пластичностью его ПС в условиях сильного воздействия током. Низкий предел пластичности упрочнённой первичной структуры может быть основной причиной низкой износостойкости в условиях сильных внешних воздействий. Упрочнение первичной структуры легированием или фазами, например в закаленной стали Гадфильда 110Г13 ($HB=2430$ МПа) или закаленной быстрорежущей стали Р6М5 (66 HRC), приводит к низкой износостойкости при скольжении с током высокой плотности [7]. Следует отметить, что пористые структуры обладают, как правило, низкой пластичностью. Поэтому пористая первичная структура композита ИЛГТ не позволяет создать прочного ПС и достичь высоких характеристик контакта (рис. 2 а, б), несмотря на низкое ρ и теплопроводность, сравнимую с теплопроводностью сталей (таблица 1). Это означает, что конструкция износостойкого материала, предназначенного для скольжения с высокой плотностью тока, должна создавать ПС с максимальным запасом пластичности.

Заключение

Из приведённых выше сведений следует, что упрочнение первичной структуры материала может приводить к увеличению усталостной прочности поверхностного слоя и к увеличению его износостойкости в условиях трения под воздействием электрического тока плотностью выше 100 А/см^2 без смазки. Это проявляется при упрочнении сталей ШХ15 и У12 путём закалки и создания мартенситной структуры. Но не все закаленные стали способны быть износостойкими. Упрочнение первичной структуры путём введения твёрдых частиц карбида титана не позволяет увеличить прочность поверхностного слоя, что проявляется в низкой износостойкости при трении в этих же условиях.

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. Гуляев А.П. Металловедение. - М. : Металлургия, 1986. – 541 с.
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. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосников и др.; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
4. Мышкин Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. –

Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2008. – 560 с.

5.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.

6.Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л.И. Тушинский. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 306 с.

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

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.