

УДК 621.891

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СУХОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО ЭЛЕКТРОКОНТАКТА МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ\*

Алеутдинова М.И.<sup>1,2</sup>, к.т.н., научный сотрудник (aleut@ispms.tsc.ru)  
Фадин В.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник (fvv@ispms.tsc.ru)

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

<sup>2</sup> Северский технологический институт НИЯУ МИФИ

(636036, Россия, Томская обл., Северск, пр. Коммунистический, 65)

**Аннотация.** Изучена взаимосвязь интенсивности изнашивания, средней температуры контакта и фазового состава поверхностных слоев стали Ст3, меди и сплава NiTi при сухом скольжении по стальному контртелу под воздействием электрического тока плотностью более 100 А/см<sup>2</sup>. Эти характеристики контакта рассмотрены особенно внимательно в начале катастрофического изнашивания, когда поверхностные слои переходят в предельное состояние. Отмечено, что релаксация напряжений в поверхностных слоях происходит благодаря структурному превращению в режиме нормального изнашивания. Это приводит к образованию трибослоев. Высокая прочность трибослоя меди обусловлена, в первую очередь, образованием оксида FeO на поверхности скольжения, который препятствует адгезии в контакте. Кроме того, признаки жидкой фазы наблюдали на поверхности контакта меди. Это способствует низкой скорости образования и накопления структурных дефектов. Появление областей расплава и оксида FeO на поверхности скольжения обеспечивает высокую износостойкость контакта. Эти факторы в сочетании с высокой теплопроводностью меди обусловили переход трибослоя в предельное состояние при высокой плотности тока и низкой температуре контакта. Отсутствие оксидов на поверхности скольжения сплава NiTi вызывает сильную адгезию в контакте, высокую скорость образования и накопления структурных дефектов. Поэтому трибослой быстро разрушается, наблюдаются высокая интенсивность изнашивания и быстрый рост температуры контакта при увеличении плотности тока. Катастрофическое изнашивание сплава NiTi начинается при температуре около 350 °С и низкой плотности тока. Поверхность скольжения стали Ст3 содержала оксид FeO, поэтому сильная адгезия не проявлялась. Обнаружено образование ГЦК-железа в трибослое стали Ст3, что способствует его ускоренному разрушению. Поэтому трибослой стали Ст3 переходит в предельное состояние при относительно низкой плотности тока и при более высокой температуре. Представленные температуры контакта, соответствующие начальным стадиям предельного состояния трибослоя, не превышают 350 °С. Сопоставление этих температур с известными температурами контактов других металлов позволяет утверждать, что подъем температуры контакта любого металла выше 400 °С приведет к его предельному состоянию. Это значит, что характеристики контакта металлов при температурах скользкого контакта более 500 °С не должны представлять практического интереса.

**Ключевые слова:** скользкий электрический контакт, контактная плотность тока, структурное превращение, разрушение трибослоя, предельное состояние трибослоя, катастрофическое изнашивание, средняя температура контакта.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-103-108

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что высокая износостойкость материала в скользком контакте обеспечивается за счет высокой сдвиговой прочности поверхностных слоев контактирующих тел [1, 2] или, в общем случае, за счет удовлетворительной релаксации напряжений в зоне контакта. Усиление внешнего воздействия на поверхностный слой (ПС) неизбежно вызывает его пластическую деформацию и релаксация напряжений будет происходить за счет появления и накопления дефектов его структуры. Это приводит к разрушению поверхностного слоя в режиме малоциклового усталости, что проявляется как износ. Как правило, изнашивание материалов сопровождается повышением средней температуры контакта, что ведет к снижению предела текучести и является фактором, который совместно с усталостью способст-

вует уменьшению сдвиговой прочности поверхностного слоя. Температура контакта при скольжении должна увеличиваться с уменьшением теплопроводности материала [3] и при усилении внешнего воздействия на поверхностный слой. Возможно, что для металлических материалов эта температура имеет предельное значение, которое достигается в режиме катастрофического изнашивания. Можно предположить, что знание предельных значений температуры контакта позволит вполне уверенно отличать осуществление нормального изнашивания от катастрофического без сведений об износе [4 – 8].

Определение средней температуры контакта можно проводить разными методами, которые, однако, не обеспечивают удовлетворительной точности [7 – 9]. Очень часто применяются аналитические методы. Определение безразмерных температур характерно для случаев, далеких от реальности. Такие данные не имеют большой ценности для начальной оценки состояния

\* Работа выполнена в рамках ПФНИ ГАН на 2013 – 2020 гг., направление III.23.

материалов в зоне контакта [4–6]. Измеренные тепловизорами температуры контакта составляют более 500 °С [7, 10]. Не исключено, что эти значения выше, чем реальные температуры. Это связано с неконтролируемым появлением оксидов на участках образца в зоне контакта и невозможностью одновременно корректировать коэффициент излучения, установленный в тепловизоре. Особое внимание вызывают температуры контакта выше 600 °С, определенные по данным спекл-интерферометрии при сухом трении стали 1020 (сталь Ст3) по стали 1020 со скоростью скольжения 0,5 м/с [8]. Распределение температур вдоль оси образца позволяло видеть, что температура в контактном слое около 50 мкм при приближении к поверхности скольжения увеличивается от 310 до 740 °С. Это вызывает необходимость заметить, что соответствующая плотность теплового потока  $q_2 = \lambda_2 \text{grad} T_2$  (где  $\lambda_2$  – теплопроводность образца;  $\text{grad} T_2$  – градиент температуры в зоне контакта образца) заметно превышает удельную мощность  $q = fpv$  (где  $f$  – коэффициент трения;  $p$  – давление в контакте;  $v$  – скорость скольжения) в зоне трения, что невозможно. Распределения температур в глубине образца также характеризуются недопустимо высоким градиентом температуры. Это означает, что следует критически воспринимать значения температуры, определенные непрямыми методами измерения [7, 10] или рассчитанные по каким-либо моделям [11–13]. В этих случаях не приводятся сведения об износе или о структурном состоянии поверхностных слоев контактирующих металлов, соответственно, невозможно установить предельные температуры, допустимые для удовлетворительной работы узла трения.

Отсюда следует, что непосредственное измерение температуры контакта должно давать более надежные сведения по сравнению с расчетами или непрямыми измерениями. Поэтому представляет научный интерес определение температуры контакта, достижимой при скольжении металла по металлу в начале катастрофического изнашивания. Эти значения могут служить ориентирами для качественной оценки работоспособности поверхностного слоя. Представляется целесообразным провести исследование в этом направлении на материалах разных классов с резко различными свойствами, например, применяя сталь и цветные металлы.

Внешнее воздействие на поверхностный слой может быть задано в виде электрического тока высокой плотности.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка температур, возникающих в интерфейсе сухого скользящего контакта металл–сталь под воздействием электрического тока высокой плотности при переходе поверхностного слоя к предельному состоянию.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалы, применявшиеся при скольжении с током, указаны в таблице. Фазовый состав поверхности скольжения был получен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Скольжение было осуществлено под воздействием переменного тока при давлении  $p = 0,13$  МПа, скорости скольжения  $v = 5$  м/с на машине трения СМТ-1 по схеме «pin-on-ring» (рис. 1, а). Контроль выполнено из стали 45 (50 HRC). Линейную интенсивность изнашивания определяли как  $I_h = h/L$  (где  $h$  – изменение высоты образца на пути трения;  $L$  – путь трения). Контактная плотность тока была записана как  $j = i/A_a$  (где  $i$  – ток, протекающий через номинальную площадь контакта  $A_a$ ).

Распределение температуры  $T(y)$  вдоль оси  $y$  образцов определяли по значениям пяти термопар, расположенных вдоль оси образца на разных расстояниях  $y$  от поверхности контакта. Термопары были прикреплены к образцам точечной сваркой.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно [15], что поверхностные слои под воздействием электрического тока повышенной плотности и трения претерпевают структурные превращения, что приводит к образованию трибослоев. Низкая интенсивность изнашивания  $I_h$  меди (рис. 1, б) обусловлена высокой прочностью трибослоя. Это связано, отчасти, с высокой теплопроводностью  $\lambda$  меди (см. таблицу), способствующей хорошему теплоотводу из зоны трения и снижению температуры контакта. Низкое удельное электросопротивление  $\rho$  меди (см. таблицу) способствует малому выделению джоулевой теплоты на

#### Основные параметры зоны скользящего электроконтакта металлов в начальной стадии катастрофического изнашивания

#### Main parameters of sliding electric contact zone of metals at initial stage of catastrophic wear

Материал	$\lambda$ , Вт/м·К	$\rho$ , мкОм·м	$a_{\text{основы}}$ , нм	$a_{\text{FeO}}$ , нм	$a_{\text{Fe}}$ , нм	$j_c$ , А/см <sup>2</sup>	$I_{hc}$ , мкм/км
Cu	400	0,018	0,3616	0,4306	0,2876	330	12
Сталь Ст3	0,2	55	0,2867	0,4307	–	280	26
Сплав Ni <sub>50,5</sub> Ti	1 [14]	1 [14]	–	–	–	190	33

Примечание: индекс «с» указывает на начало катастрофического изнашивания.

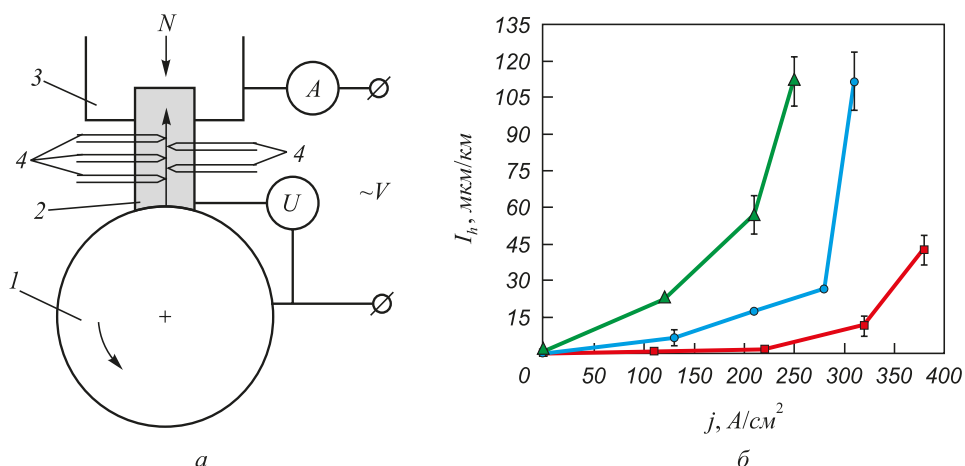


Рис. 1. Схема триботехнического контакта (а) и токовые зависимости интенсивности изнашивания металлов (б): 1 – контртело (ст. 45, 50 HRC); 2 – образец; 3 – держатель образца; 4 – термопары; ● – сталь Ст3; ■ – Cu; ▲ – сплав NiTi

Fig. 1. Schematic representation of the tribocontact (a) and current dependences of wear intensity of metals (б): 1 – counterbody (AISI 1045 steel, 50 HRC); 2 – sample; 3 – sample holder; 4 – thermocouples; ● – AISI 1020 steel; ■ – Cu; ▲ – NiTi alloy

пятнах контакта и сохранению прочности трибослоя. Структурное состояние трибослоя меди характеризуется также присутствием оксида FeO на поверхности скольжения и ее частичным плавлением [15]. Эти факторы очень важны для проявления низкой линейной интенсивности изнашивания. Трибослой меди достигает предельного состояния при низком значении линейной интенсивности изнашивания  $I_h = I_{hc}$  и при высокой плотности тока  $j = j_c$ , соответствующих началу катастрофического изнашивания, которое проявляется обычно как резкое увеличение значений  $I_h$  (индекс «с» указывает на катастрофическое изнашивание). Железо на поверхности скольжения меди (см. таблицу) перенесено с контртела.

Аналогичные особенности структурного состояния присущи трибослою стали Ст3 (AISI steel 1020), но в меньшей степени по сравнению с трибослоем меди. Кроме того, ГЦК-железо с параметром решетки

$a_{\text{ГЦК-Fe}} = 0,3595$  нм образуется в трибослойе стали Ст3 и вызывает ускорение его разрушения. Поэтому катастрофическое разрушение трибослоя стали Ст3 начинается при более низкой плотности тока  $j_c$  (см. таблицу).

Все факторы, способствующие проявлению высокой прочности трибослоя, не характерны для контакта сплава NiTi. Трибослой сплава NiTi достигает предельного состояния при низкой плотности тока  $j_c$  и при высокой интенсивности изнашивания  $I_{hc}$  (см. таблицу) вследствие отсутствия окислов на поверхности скольжения и сильной адгезии к контртелу из стали.

Разность между отводом теплоты в зоне контакта и ее выделением в процессе трения задает температуру  $T_s$  в зоне контакта и влияет на характер распределения температуры  $T_2(y)$  образца при удалении от поверхности скольжения. На рис. 2, а показано распределение температуры вдоль оси образца сплава NiTi. Темпера-

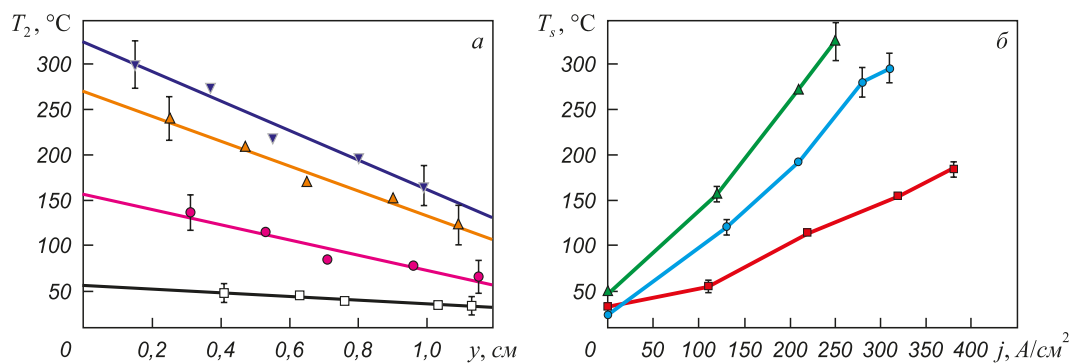


Рис. 2. Распределение температур вдоль оси  $y$  образца сплава  $\text{Ni}_{50.5}\text{Ti}$  при разных плотностях тока (а) и зависимости температур в контакте металл – сталь (б):

□ – 0 A/cm<sup>2</sup>; ● – 120 A/cm<sup>2</sup>; ▲ – 210 A/cm<sup>2</sup>; ▼ – 250 A/cm<sup>2</sup>; ● – сталь Ст3; ■ – Cu; ▲ – сплав NiTi

Fig. 2. Distribution of temperatures along the axis  $y$  of  $\text{Ni}_{50.5}\text{Ti}$  alloy sample at different current densities (a) and current dependences of temperatures in metal/steel contact (б):

□ – 0 A/cm<sup>2</sup>; ● – 120 A/cm<sup>2</sup>; ▲ – 210 A/cm<sup>2</sup>; ▼ – 250 A/cm<sup>2</sup>; ● – AISI 1020 steel; ■ – Cu; ▲ – NiTi alloy

тура распределена квазилинейно вдоль оси  $y$  образца при любой плотности тока при используемой схеме контакта (рис. 2, а). Линейная экстраполяция такого распределения температуры на ось ординат ( $y = 0$ , то есть поверхность скольжения) показывает температуру контакта при заданной плотности тока.

Соответствующие температуры контакта разных металлов (рис. 2, б) не превышают  $350\text{ }^\circ\text{C}$  при плотности тока  $j_c$ , соответствующей катастрофическому изнашиванию. Видно также, что характер изменения температуры контакта явно изменяется только в контакте стали Ст3 при достижении плотности тока  $j_c$ . Это значит, что тепловые условия в пятнах контакта представленных металлов существенно не изменяются при переходе трибослоя в предельное состояние.

Трибослой в предельном состоянии должен иметь высокую концентрацию структурных дефектов, в первую очередь, различных несплошностей. Это сопровождается высокой скоростью образования частиц износа. Поток частиц износа из зоны трения следует считать одним из видов теплоотвода, вызывающим уменьшение температуры контакта  $T_s$ . Это особенно хорошо видно при скольжении стали Гадфильда, когда ее высокая интенсивность изнашивания  $I_h$  вызывала снижение температуры контакта  $T_s$  [16]. Однако этот эффект проявляется не всегда: так, высокая интенсивность изнашивания  $I_h$  сплава NiTi (рис. 1, б) не обеспечивает относительно низкие температуры контакта (рис. 2, б). Следует ожидать, что скорость разрушения трибослоя может достигнуть некоторого предела, когда увеличение температуры контакта станет невозможным. Можно предположить, что эта предельная температура контакта ( $T_{\max}$ ) не превышает значительно температуру контакта, соответствующую началу катастрофического изнашивания какого-либо конкретного материала. Это предположение в более обобщенном виде приводит к необходимости признать, что поверхностный слой любого металла под воздействием тока высокой плотности и сухого трения находится в предельном состоянии при условии  $T_s > 350\text{ }^\circ\text{C}$ .

Предельное состояние поверхностного слоя возникает в условиях его сильной пластической деформации, то есть в условиях адгезии и отсутствия смазки или окислов на поверхности скольжения. Показано, что износ резко возрастает вследствие отсутствия окислов на поверхности контакта в условиях циклического скольжения по нержавеющей стали спеченного композита Cu–Fe при повышении температуры окружающей среды до  $400\text{ }^\circ\text{C}$  [17]. Представляется целесообразным учесть также, что предел текучести сплава  $\text{Fe}_{30}\text{Ni}_{20}\text{Mn}_{25}\text{Al}_{25}$  резко снижался при температуре более  $400\text{ }^\circ\text{C}$  [18]. Здесь же утверждалось, что температура контакта влияет на износ сильнее, чем скорость скольжения. Можно ожидать, что предел текучести поверхностного слоя других металлических материалов также резко снизится при увеличении температуры контакта

или температуры окружающей среды более  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . Такое разупрочнение поверхностного слоя вследствие нагревания при трении должно вызвать его переход в предельное состояние, когда его сдвиговая устойчивость на макромасштабном уровне стремится к нулю. Тогда должен наблюдаться высокий износ.

Удельная поверхностная мощность в зоне трения в общем случае может быть записана как  $q = q_1 + q_2 + q_3$  (где  $q_1 = \lambda_1 \text{grad} T_1$  и  $q_2 = \lambda_2 \text{grad} T_2$  – плотность теплового потока на поверхности трения контртела и образца;  $q_3$  – удельная мощность, направленная на разрушение поверхностного слоя образца). Увеличение износа (то есть увеличение мощности  $q_3$ ) может вполне эффективно вызывать уменьшение температуры контакта (учитывается  $\text{grad} T_1$  и  $\text{grad} T_2$ ). Однако температуры контакта рассчитаны, как правило, в приближении  $q_3 = 0$ . Это приводит к тому, что температуры контактов металлов достигают значений более  $600\text{ }^\circ\text{C}$  [18] или более  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  [19], несмотря на высокую скорость изнашивания и очевидное предельное состояние материала зоны трения вследствие сильной адгезии. Заметная адгезия может не проявляться в контакте некоторых композитов и износ не является высоким. В этом случае  $T_s \approx 500\text{ }^\circ\text{C}$  при  $q_3 = 0$  [19]. Следует ожидать, что при такой температуре контакта консистентные смазки не будут эффективно разделять контактирующие металлы и поверхностный слой разрушится за счет образования трещин. Но если принять  $q_3 > 0$ , то  $T_s < 500\text{ }^\circ\text{C}$ . Приведенные выше данные также указывают на существование предельного состояния материала зоны трения, если его температура достигла значений  $350 - 500\text{ }^\circ\text{C}$ . Очевидно, что поверхностные слои многих металлов могут достигнуть предельного состояния при более низких температурах. Но сообщения о температурах контакта выше  $350 - 500\text{ }^\circ\text{C}$  должны указывать на катастрофическое изнашивание металла. Это значит, что при таких температурах поверхностного слоя отсутствуют удовлетворительные механизмы релаксации напряжений. К этому следует добавить, что металлы при температуре более  $650\text{ }^\circ\text{C}$  излучает свет. Однако сведения о свечении поверхностного слоя металлов отсутствуют. Это может быть связано с катастрофическим изнашиванием и характеристики такого контакта не могут вызвать научный интерес. Нагревание поверхностного слоя до появления свечения наблюдали в паре трения керамика–сталь при скольжении со скоростью более  $30\text{ м/с}$  [20]. Такой режим трения сопровождался сильным износом стального контртела. Известно также, что скольжение керамики по никелю [21] или скольжение керамики по стали [22] сопровождается адгезией и заметным увеличением износа при температуре больше  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Эти данные также косвенно указывают на невозможность обеспечения режима нормального изнашивания металла при  $T > 500\text{ }^\circ\text{C}$  в зоне трения. Сопоставление данных, представленных на рис. 1 и 2, с рассмотренными известными сведениями позволяет

утверждать, что нагревание поверхностного слоя любого металла до температур в интервале 400 – 500 °С вызовет его катастрофическое разрушение при использовании любой схемы триботехнического нагружения.

## Выводы

Сухое скольжение металлов под воздействием электрического тока плотностью более 100 А/см<sup>2</sup> сопровождается пластической деформацией поверхностного слоя, изменениями его структуры и образованием трибослоя. Высокая прочность трибослоев (например, стали Ст3 и меди) проявляется при образовании окислов и жидкой фазы на поверхности скольжения. Это наблюдается как высокая износостойкость и высокая электропроводность контакта. Поверхностный слой переходил в предельное состояние при невысокой (менее 300 °С) температуре контакта. Образование ГЦК-железа в трибослое стали Ст3 ускоряет износ. Отсутствие окислов на поверхности скольжения сплава NiTi вызывает сильную адгезию в контакте, что приводит к быстрому разрушению поверхностного слоя при температуре контакта не более 350 °С. Сопоставление этих результатов с литературными данными позволяет предположить, что предельное состояние поверхностного слоя любого металла должно возникнуть при температуре контакта ниже 500 °С.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Friction and Wear Calculation Methods. – New York: Pergamon Press, 1982. – 450 p.
- Костецкий Б.И., Носовский Н.Г., Караулов А.К. Поверхностная прочность металлов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 292 с.
- Амосов А.П. Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. – М.: Машиностроение, 2011. – 362 с.
- Vick B., Furey M.J. A basic theoretical study of the temperature rise in sliding contact with multiple contacts // Tribology International. 2001. Vol. 34. P. 823 – 829.
- Ma W., Lubrecht A.A. Temperature of a sliding contact between wire rope and friction lining // Tribology International. 2018. Vol. 120. No. 4. P. 140 – 148.
- Bansal D.G., Streater J.L. On estimations of maximum and average interfacial temperature rise in sliding elliptical contacts // Wear. 2012. Vol. 278-279. P. 18 – 27.
- Ray S., Chowdhury S.K. Prediction of contact temperature rise between rough sliding bodies: An artificial neural network approach // Wear. 2009. Vol. 266. No. 9-10. P. 1029 – 1038.
- Seif M.A., Abdel-Aal H.A. Temperature fields in sliding contact by a hybrid laser speckle-strain analysis technique // Wear. 1995. Vol. 181-183. P. 723 – 729.
- Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. Учеб. для вузов. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 с.
- Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Рубцов В.Е. О некоторых параметрах сухого скользящего контакта сталь/сталь при высокой плотности тока // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. С. 43 – 47.
- Kennedy F.E., Lu Yu., Baker I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting // Tribology International. 2015. Vol. 82. Part B. P. 534 – 542.
- Kravchenko Yu.G., Peleshenko V.I., Burya, A.I. and Kuznetsova O.Yu. Analytical Calculation of Temperature in Contact Zone of Friction Pair at High Velocities // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34. No. 4. P. 302 – 307.
- Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
- Журавлев В.Н., Пушин В.Г. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 150 с.
- Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Potekaev A.I., Kulikova O.A. The surface layer states in metallic materials subjected to dry sliding and electric current // Russian Physics Journal. 2017. Vol. 60. No. 5. P. 908 – 914.
- Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Kolubaev A.V. Effect of High-Density Electric Current on Wear and Average Temperature of Steel / Steel Triboelectric Contact // Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39(4). P. 24 – 28.
- Ramalho A., Kapsa Ph., Bouvard G., Abry J.-C., Yoshida T., Charpentier M., Bourgeois M. Effect of temperatures up to 400 °C on the impact-sliding of valve-seat contacts // Wear. 2009. Vol. 267. P. 777 – 780.
- Kennedy F.E., Lu Y., Baker I., Munroe P.R. The influence of sliding velocity and third bodies on the dry sliding wear of Fe<sub>30</sub>Ni<sub>20</sub>Mn<sub>25</sub>Al<sub>25</sub> against AISI 347 stainless steel // Wear. 2017. Vol. 374-375. P. 63 – 76.
- Фадин В.В., Колубаев А.В., Алеутдинова М.И. Характер разрушения поверхности трения СВС композитов на основе TiC // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 4. С. 26 – 30.
- Савченко Н.Л. Трансформационно-упрочненные керамические и металлокерамические композиты для эксплуатации в условиях высокоскоростного трения: Автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.16.09 – Томск, 2015. – 34 с.
- Fournier P., Platon F. Wear of refractory ceramics against nickel // Wear. 2000. Vol. 244. P. 118 – 125.
- Kameo K., Friedrich K., Bartolome J.F., Diaz M., López-Esteban S., Moya J.S. Sliding wear of ceramics and cermets against steel // Journal of the European Ceramic Society. 2003. Vol. 23. P. 2867 – 2877.

Поступила в редакцию 13 декабря 2018 г.

После доработки 24 декабря 2018 г.

Принята к публикации 26 декабря 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 2, pp. 103–108.

## CHARACTERISTICS OF DRY SLIDING ELECTRIC CONTACT OF METALS IN CONDITIONS OF CATASTROPHIC WEARING

M.I. Aleutdinova<sup>1,2</sup>, V.V. Fadin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University, Seversk, Tomsk Region, Russia

**Abstract.** The authors have studied the relation between wear intensity, average contact temperature and phase composition of the surface layers of AISI 1020 steel, copper and NiTi alloy in dry sliding against the steel counterbody under electric current of density higher than 100 A/cm<sup>2</sup>. These contact characteristics are considered carefully at the beginning of catastrophic wear, when the surface layers transit to the utmost state.

It was noted that relaxation of stresses in the surface layers was due to the structural transformation in normal wear regime. It leads to tribolayers formation. The high strength of the copper tribolayer is first of all due to the formation of FeO oxide on the sliding surface, which prevents adhesion in contact. In addition, signs of a liquid phase were observed on the copper contact surface. It promoted the low rate of formation and accumulation of structural defects. Emergence of areas of melt and FeO oxide on the sliding surface provides high contact wear resistance. These factors, combined with the high thermal copper conductivity, have caused the tribolayer transition to the limit state at high current density and low contact temperature. The absence of oxides on the sliding surface of the NiTi alloy has caused strong adhesion in the contact, high rate of formation and accumulation of structural defects. Therefore, the tribolayer quickly deteriorates and high wear intensity and rapid increase in the contact temperature are observed with current density increase. Therefore, the catastrophic wear of the NiTi alloy begins at a temperature about 350 °C and at low current density. The sliding surface of AISI 1020 steel contained FeO oxide, therefore strong adhesion is not manifested. Formation of FCC-Fe in tribolayer of AISI steel 1020 is detected, that promotes its accelerated deterioration. Therefore, the tribolayer of AISI steel 1020 transits to the utmost state at a relatively low current density and at a higher temperature. The presented contact temperatures corresponding to the beginning stages of the utmost state of the tribolayer do not exceed 350 °C. Comparison of these temperatures with the known contact temperatures of other metals made it possible to assert that raising of the contact temperature of any metal higher than 400 °C leads to its utmost state. Therefore the characteristics of metals contact at temperatures of sliding contact higher than 500 °C is not of practical interest.

**Keywords:** sliding electrical contact, contact current density, structural transformation, tribolayer deterioration, utmost state of tribolayer, catastrophic wear, average contact temperature.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-2-103-108

## REFERENCES

- Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Friction and wear calculation methods*. New York: Pergamon Press, 1982, 450 p.
- Kostetskii B.I., Nosovskii N.G., Karaulov A.K. *Poverkhnostnaya prochnost' metallov pri trenii* [Surface strength of metals under friction]. Kiev: Tekhnika, 1976, 292 p. (In Russ.).
- Amosov A.P. *Teplofizicheskie modeli treniya inertnykh i vzyrychatykh materialov* [Thermophysical models of friction of inert and explosive materials]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 362 p. (In Russ.).
- Vick B., Furey M.J. A basic theoretical study of the temperature rise in sliding contact with multiple contacts. *Tribology International*. 2001, vol. 34, pp. 823–829.
- Ma W., Lubrecht A.A. Temperature of a sliding contact between wire rope and friction lining. *Tribology International*. 2018, vol. 120, no. 4, pp. 140–148.
- Bansal D.G., Streator J.L. On estimations of maximum and average interfacial temperature rise in sliding elliptical contacts. *Wear*. 2012, vol. 278–279, pp. 18–27.
- Ray S., Chowdhury S.K. Prediction of contact temperature rise between rough sliding bodies: An artificial neural network approach. *Wear*. 2009, vol. 266, no. 9–10, pp. 1029–1038.
- Seif M.A., Abdel-Aal H.A. Temperature fields in sliding contact by a hybrid laser speckle-strain analysis technique. *Wear*. 1995, vol. 181–183, pp. 723–729.
- Bogdanovich P.N., Prushak V.Ya. *Trenie i iznos v mashinakh. Ucheb. dlya vuzov* [Friction and wear in machines. Textbook for universities]. Minsk: Vysshaya shkola, 1999, 374 p. (In Russ.).
- 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.
- Kennedy F.E., Lu Yu., Baker I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting. *Tribology International*. 2015, vol. 82, part B, pp. 534–542.
- Kravchenko Yu.G., Peleshchenko B.I., Burya A.I., Kuznetsova O.Yu. Analytical Calculation of Temperature in Contact Zone of Friction Pair at High Velocities. *Journal of Friction and Wear*. 2013, vol. 34, no. 4, pp. 302–307.
- Chichinadze A.V., Berliner E.M., Braun E.D. etc. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnology)]. Chichinadze A.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 576 p. (In Russ.).
- Zhuravlev V.N., Pushin V.G. *Splavy s termomekhanicheskoi pamyat'yu i ikh primeneniye v meditsine* [Alloys with thermomechanical memory and their use in medicine]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2000, 150 p. (In Russ.).
- Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Potekaev A.I., Kulikova O.A. The surface layer states in metallic materials subjected to dry sliding and electric current. *Russian Physics Journal*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 908–914.
- Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Kolubaev A.V. Effect of high-density electric current on wear and average temperature of steel/steel tribo-electric contact. *Journal of Friction and Wear*. 2018, vol. 39, no. 4, pp. 24–28.
- Ramvalho A., Kapsa Ph., Bouvard G., Abry J.-C., Yoshida T., Charpentier M., Bourgeois M. Effect of temperatures up to 400 °C on the impact-sliding of valve-seat contacts. *Wear*. 2009, vol. 267, pp. 777–780.
- Kennedy F.E., Lu Y., Baker I., Munroe P.R. The influence of sliding velocity and third bodies on the dry sliding wear of Fe<sub>30</sub>Ni<sub>20</sub>Mn<sub>25</sub>Al<sub>25</sub> against AISI 347 stainless steel. *Wear*. 2017, vol. 374–375, pp. 63–76.
- Fadin V.V., Kolubaev A.V., Aleutdinova M.I. Nature of destruction of friction surface of SHS composites based on TiC. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 2011, vol. 4, pp. 26–30. (In Russ.).
- Savchenko N.L. *Transformatsionno-uprochnennyye keramicheskie i metallokeramicheskie kompozity dlya ekspluatatsii v usloviyakh vysokoskorostnogo treniya: Avtoref. diss.... d-ra tekhn. nauk* [Transformation-hardened ceramic and cermet composites for use in high-speed friction: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Tomsk, 2015, 34 p. (In Russ.).
- Fournier P., Platon F. Wear of refractory ceramics against nickel. *Wear*. 2000, vol. 244, pp. 118–125.
- Kameo K., Friedrich K., Bartolome J.F., Diaz M., Lopez-Esteban S., Moya J.S. Sliding wear of ceramics and cermets against steel. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003, vol. 23, pp. 2867–2877.

**Funding.** The work was performed within the Program of fundamental scientific researches of the State Academies of Science for 2013–2020, direction III.23.

## Information about the authors:

**M.I. Aleutdinova**, Cand. Sci. Eng., Research Associate  
(aleut@ispms.ru)

**V.V. Fadin**, Cand. Sci. Eng., Assist. Professor, Senior Researcher  
(fvv@ispms.ru)

Received December 13, 2018

Revised December 24, 2018

Accepted December 26, 2018