

УДК:621.891

## О НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРАХ СУХОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА СТАЛЬ/СТАЛЬ ПРИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ТОКА\*

*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*

*Рубцов В.Е.<sup>1,3</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник*

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

(634021, Россия, Томск, Академический пр., 2/4)

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

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

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет

(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

**Аннотация.** Изучено поведение стали 3 при сухом скольжении под воздействием электрического тока высокой плотности. В этих условиях происходит пластическая деформация материала поверхностного слоя, повышается его температура, образуются новые фазы и структурные дефекты, что приводит к образованию слоя вторичных структур. Основным разрушающим фактором внешнего воздействия на поверхностный слой является контактная плотность тока. Показано, что средняя температура контакта и толщина слоя вторичных структур увеличиваются при возрастании плотности тока. Представлен характер изменения интенсивности изнашивания и электропроводности при изменении температуры контакта. Установлено, что интенсивность изнашивания линейно зависит от температуры контакта в режиме нормального изнашивания. Отмечено, что режим катастрофического изнашивания проявляется как резкое увеличение его интенсивности и одновременное уменьшение электропроводности контакта при его температуре 500 – 600 °С. Толщина слоя вторичных структур в этих условиях трения достигает 50 мкм.

**Ключевые слова:** средняя температура контакта, вторичные структуры, трение, интенсивность изнашивания, электропроводность скользящего контакта.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-43-47

Тяжелый режим трения вызывает высокие механические напряжения в микрообъемах, прилегающих к пятнам фактического контакта. Релаксация этих напряжений происходит часто за счет пластической деформации и структурных изменений материала поверхностного слоя (ПС). Возникает слой вторичных структур (ВС) [1], который в литературе обозначается также как «третье тело» [2], трибослой [3], фрикционный деформационный слой [4] и т. п. Толщина этого слоя характеризует глубину проникновения пластической деформации в зоне трибоконтакта. Выходные характеристики трибосистемы (интенсивность изнашивания, коэффициент трения, температура поверхностного слоя и др.) зависят от свойств слоя ВС.

Тяжелый режим трения реализуется, например, при высоком давлении или при высокой скорости скольжения, низком отводе тепла из зоны трения, отсутствии смазки, прохождении электрического тока по пятнам контакта. Средняя температура поверхностного слоя в этих условиях может достигать более 200 °С [5 – 8]. Научный интерес представляет определение средней температуры поверхности скольжения, так как температура влияет на прочностные свойства поверхностно-

го слоя более сильно, чем нагрузка или скорость скольжения или число циклов нагружения [7]. Известные методы оценки средней поверхностной температуры контакта [5 – 10] не всегда позволяют получить удовлетворительное представление о влиянии температуры на разрушение поверхностного слоя в условиях его неизбежной циклической пластической деформации. Из общих соображений следует ожидать уменьшение износостойкости при увеличении средней температуры поверхностного слоя. Однако с научной точки зрения представляет интерес получение более конкретных представлений о характере взаимной зависимости этих величин, а также их связи с толщиной слоя ВС. Модельной парой трения может служить скользящий электроконтакт сталь 3/сталь 45 по аналогии с рассмотренным в работе [11]. В этом случае контактная плотность тока является главным фактором, ответственным за увеличение температуры и разрушение ПС. Поэтому также представляет интерес зависимость средней температуры поверхностного слоя от контактной плотности тока.

Целью настоящей работы является получение начальных представлений о взаимосвязи контактной плотности тока, толщины слоя вторичных структур, средней поверхностной температуры и интенсивности

\* Работа выполнена по проекту III.20.2.4 программы III.20.2 фундаментальных исследований СО РАН.

изнашивания стали 3 в условиях скользящего электроконтакта без смазки.

Модельный образец был получен из углеродистой стали 3 (Fe + 0,2 % C) твердостью HB = 2740 МПа. Металлографическое изучение сечения вторичных структур проведено на оптическом микроскопе Neophot-21. Интенсивность изнашивания стали 3 и электропроводность зоны трения определены в условиях скользящего электроконтакта без смазки при переменном токе (50 Гц), давлении  $p = 0,13$  МПа, скорости скольжения  $v = 5$  м/с на машине трения СМТ-1 по схеме «вал–коловка» (рис. 1, а). Контртелом служила сталь 45 (50 HRC). Дистанция скольжения составляла 9 км при каждой плотности тока. 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  $A_a$ .

Грань А образца находилась в одной плоскости с поверхностью В контртела. Распределение температуры вдоль вертикальной оси грани А образца и на контртеле около зоны контакта определено в относительных единицах с помощью тепловизора FLIR A655 sc. Грань А и поверхность В были покрыты лаком, чтобы обеспечить одинаковый коэффициент теплового излучения. Реальная температура любой точки этого распределения рассчитана с применением показаний термопары 3, расположенной на расстоянии  $y = 2 - 3$  мм от поверхности контакта. Термопара крепилась к образцу точечной сваркой. Отсчет каждой температуры произведен при высоте образца  $h_0 \approx 6$  мм. Средняя температура  $T_s$  поверхности скольжения образца есть максимум в определяемом распределении температуры для каждого режима трения.

Один из видов структурных изменений поверхностного слоя представлен в виде образования слоя вторичных структур белого цвета (рис. 1, б). Толщина этого

слоя увеличивается при увеличении плотности тока  $j$  (рис. 2, а). Видно, что скольжение при  $j < 80$  А/см<sup>2</sup> не приводит к образованию заметного слоя ВС. Скольжение при  $j = 80 - 400$  А/см<sup>2</sup> приводит к квазилинейному росту толщины  $d$  слоя ВС. Но при  $j > 400$  А/см<sup>2</sup> происходит увеличение скорости образования толщины  $d$ . Токовая зависимость температуры  $T_s$  также близка к линейной в исследованном интервале  $j$ .

Скольжение при  $T_s < 100$  °С происходит без заметного разрушения ПС, т. е. износ отсутствует и  $I_h = 0$  (рис. 2, б). Увеличение  $T_s$  до 100 – 500 °С приводит к линейному увеличению  $I_h$ . Резкое увеличение  $I_h$  при  $T_s > 500$  °С указывает на начало катастрофического изнашивания. Одновременно резко уменьшается удельная поверхностная электропроводность  $r_s^{-1} = j/U$  ( $U$  – контактное падение напряжения,  $r$  – электросопротивление контакта) при  $T_s > 500$  °С.

Следует отметить, что скольжение при  $j < 80$  А/см<sup>2</sup> происходит при  $I_h = 0$  [11]. Это связано с тем, что невысокая температура  $T_s < 100$  °С при скольжении с  $j < 80$  А/см<sup>2</sup> не вызывает заметной пластической деформации ПС, так как не наблюдается образования слоя ВС (толщина слоя ВС  $d = 0$  мкм, см. рис. 2, а). Это значит, что пластическая деформация материала ПС происходит только до некоторого уровня, когда предел прочности не достигается. В этом случае материал поверхностного слоя находится в упрочненном состоянии при некоторой постоянной концентрации деформационных дефектов. Тогда реализуется упругая деформация микрообъемов, прилегающих к пятнам контакта, и материал ПС испытывает нагрузки в режиме многоциклового усталости, когда структурные дефекты накапливаются с низкой скоростью. Структурное состояние ПС можно считать стабильным. Разрушение ПС не наблюдается, что видно как  $I_h = 0$  (см. рис. 2, б) при  $j < 80$  А/см<sup>2</sup>. Именно этот режим предусмотрен для практического

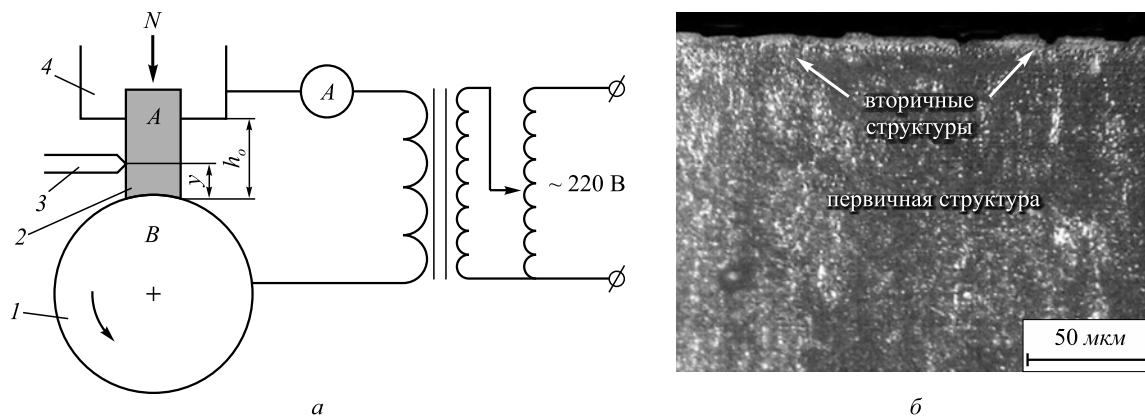


Рис. 1. Принципиальная схема трибосопряжения «pin-on-ring»: 1 – контртело (сталь 45, 50 HRC), 2 – образец (сталь 3), 3 – термопара, 4 – держатель образца (а); первичная структура стали 3 и сечение поверхностного слоя после скольжения при  $j = 120$  А/см<sup>2</sup> (б)

Fig. 1. Scheme of «pin-on-ring» test configuration: 1 – counterbody (AISI 1045 steel, 50 HRC), 2 – specimen (0,2 % C steel), 3 – thermocouple, 4 – specimen holder (a); cross sections for initial structure and surface layer after sliding at  $j = 120$  А/см<sup>2</sup> (b)

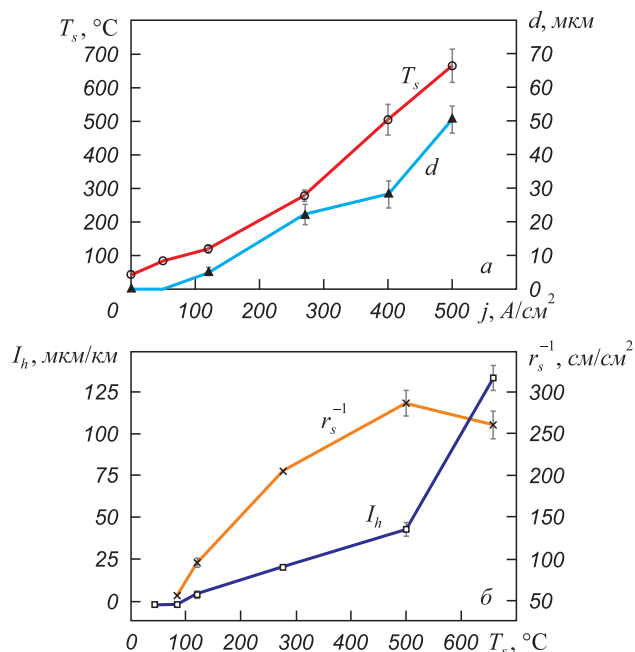


Рис. 2. Токовая зависимость средней температуры  $T_s$  контакта и толщины  $d$  слоя вторичных структур (а); влияние температуры  $T_s$  на интенсивность изнашивания  $I_h$  и поверхностную электропроводность  $r_s^{-1}$  (б)

Fig. 2. Current dependence of average contact temperature  $T_s$  and thickness  $d$  of friction induced structure layer (a); effect of temperature  $T_s$  on wear intensity  $I_h$  and surface electric conductivity  $r_s^{-1}$  (b)

применения, где выбор входных параметров трибосистемы определен отсутствием структурных изменений поверхностного слоя в процессе трения.

Режим нормального изнашивания характеризуется динамическим равновесием между образованием и разрушением слоя ВС [1]. В условиях настоящего исследования этот режим ограничен значениями величин  $j < j_c$  и  $T_s < T_{sc}$ . Толщина слоя ВС является одной из характеристик контакта. Поэтому она зависит от условий контакта. Это обусловлено различием скорости пластической деформации ПС в разных условиях трения. Появление износа при скольжении с  $j > 100 A/cm^2$  указывает на некоторую нестабильность структуры ПС вследствие снижения предела пластичности при увеличении  $T_s$  более 100  $^{\circ}C$  (см. рис. 2, а) и возникновения непрерывного процесса образования концентраторов напряжений на разных масштабных уровнях. Релаксация напряжений осуществляется за счет локальных пластических сдвигов в окрестности концентраторов напряжений [12]. Пластическая деформация микрообъемов ПС в условиях циклического нагружения приводит к локальному накоплению структурных дефектов (дислокаций, микропор и т. п.) до некоторой критической концентрации. При этом напряжения релаксируются за счет образования микротрещин. Поры собираются в скопления под трибослоем и образуют подповерхностные микротрещины, направленные параллельно поверхности скольжения [13], но выходящие на границу контакта [14]. В этом случае

образуются фрагменты разрушения ПС в виде лепестков. В настоящей работе увеличение температуры  $T_s$  приводит к появлению окислов железа, в основном FeO [11], что упрочняет слой ВС, но уменьшает его способность к релаксации напряжений за счет пластических локальных сдвигов на малой глубине. Упрочнение поверхности скольжения окислами способствует переносу процессов деформации в более глубокие слои и увеличению толщины слоя ВС. Соответственно увеличиваются скорость накопления дефектов структуры в условиях малоциклового усталости, скорость образования фрагментов разрушения ВС и интенсивность изнашивания в целом (см. рис. 2, б).

Необходимо учитывать, что плотность тока  $j = j_c$ , при которой начинается катастрофическое изнашивание, зависит от геометрии контакта, геометрических размеров пары трения, скорости теплоотвода и т. п. Поэтому  $j_c$  может характеризовать износостойкость материала только в сравнении с  $j_c$  другого материала. Однако температура  $T_s = T_{sc}$ , при которой начинается катастрофическое изнашивание в некоторых заданных условиях скольжения, характеризует достижение предельного состояния материала ПС, когда возникает неустойчивость материала к сдвигу на макромасштабном уровне и реализуется неограниченное пластическое течение больших объемов вторичных структур, как показано в работе [15]. Можно предположить, что температура  $T_s = T_{sc}$  конкретного материала (в рассматриваемом случае это сталь 3) значительно не изменится при скольжении в других условиях. Поэтому следует ожидать, что достижение температуры  $T_s = T_{sc}$  при скольжении с низким теплоотводом через держатель образца приведет к катастрофическому разрушению материала ПС при более низкой  $j = j_c$ , чем  $j_c \approx 400 A/cm^2$ , как в настоящей работе. Таким образом, температура  $T_s = T_{sc}$  является одним из основных факторов, контролирующих катастрофическое разрушение ПС. Можно предположить, что при  $T_s > T_{sc}$  достигается скорость появления микропор в ПС, соответствующая преимущественному образованию подповерхностных микротрещин с критической длиной. Или скорость образования окислов достигает некоторого критического значения, достаточного для резкого уменьшения способности к релаксации напряжений и резкого уменьшения устойчивости к сдвигу на макромасштабном уровне.

Энергия внешнего воздействия, выделяющаяся в зоне контакта, диссипируется в виде потоков тепловой энергии в образец и контртело, а также в виде энергии, направленной на разрушение ПС и образование частиц износа. Если энергия, направленная на разрушение ПС (работа разрушения), заметно увеличится по сравнению с энергией тепловых потоков, то скорость роста  $T_s$  снизится и на токовой зависимости  $T_s$  наклон уменьшится при  $j > 400 A/cm^2$ . Однако наклон остается прежним, что указывает на то, что работа разрушения материала ПС изменяется пропорционально энергии

внешнего воздействия в зоне контакта. Можно ожидать, что  $T_s$  прямо пропорциональна тепловому потоку, направленному в образец [9]. Поэтому наклон токовой зависимости  $T_s$  обусловлен также токовой зависимостью этого теплового потока. Неизменность наклона зависимости  $T_s(j)$  в режиме скольжения при  $j > 270 \text{ А/см}^2$  (см. рис. 2, а) обусловлена тем, что тепловой поток, направленный в образец, также линейно зависит от  $j$ .

Образование окислов и структурных дефектов, а также рост  $T_s$  должны увеличить удельное электросопротивление  $BC$  и, тем самым, уменьшить электропроводность контакта в целом. Но это лишь общие соображения и доказать экспериментально это невозможно. Видно (см. рис. 2, б), что электропроводность  $r_s^{-1}$  контакта увеличивается при увеличении  $T_s$  (вследствие увеличения  $j$ ) в условиях нормального изнашивания. Это связано с тем, что основной ток через контакт проходит в виде электроразрядов. Это значит, что номинальная площадь контакта является токопроводящей независимо от электропроводности на пятнах контакта. Уменьшение электропроводности контакта в режиме катастрофического изнашивания указывает на достижение некоторого критического значения общей концентрации структурных дефектов, которые сосредоточены, в первую очередь, на поверхности скольжения. В этом случае скорость образования дефектов преобладает над легкостью релаксации напряжений, возникающих в окрестности этих дефектов. Можно ожидать, что при  $T_s > 500 \text{ °C}$  напряжения должны релаксироваться легко за счет пластических микросдвигов в слое  $BC$ . Отсутствие удовлетворительной релаксации напряжений можно объяснить тем, что основными дефектами на поверхности скольжения являются окислы железа [11], которые образуются с высокой скоростью.

**Выводы.** Скольжение стали 3 по стали 45 под воздействием электрического тока высокой (более  $100 \text{ А/см}^2$ ) контактной плотности без смазки вызывает изменение структуры поверхностного слоя, т. е. образуется слой вторичных структур. Толщина этого слоя увеличивается при возрастании плотности тока и достигает  $50 \text{ мкм}$  в условиях катастрофического изнашивания. В начале катастрофического изнашивания увеличивается наклон токовой зависимости толщины слоя вторичных структур. Средняя температура контакта растет при

увеличении контактной плотности тока. Нагревание поверхности скольжения до температуры более  $500 \text{ °C}$  вызывает катастрофическое изнашивание. Интенсивность изнашивания линейно зависит от температуры контакта в режиме нормального изнашивания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. 1985. Т. 6. № 2. С. 201 – 212.
2. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kambalov V.S. Friction and Wear Calculation Methods. Pergamon Press: New York, 1982. – 464 p.
3. Blau P.J. Friction Science and Technology: From Concepts to Applications. CRC Press, 2009 by Taylor & Francis Group, LLC. – 432 p.
4. Wang X., Wei X., Hong X. etc. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel // Appl. Surface Science. 2013. Vol. 280. P. 381 – 387.
5. Rahaman M.L., Zhang L. On the estimation of interface temperature during contact sliding of bulk metallic glass // Wear. 2014. Vol. 320. P. 77 – 86.
6. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Rubtsov V.Ye. About wear and average surface temperature of copper or steel contacts at sliding current // AIP Conf. Proc. 2015. No. 1683. P. 020051-1-020051-4.
7. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
8. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology. Taylor & Francis Group, LLC, 2007. – 640 p.
9. Амосов А.П. Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. – М.: Машиностроение, 2011. – 363 с.
10. Kennedy F.E., Lu Y., Baker I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting // Tribology International. 2015. Vol. 82. P. 534 – 542.
11. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Influence of cold working on the wear of AISI 1020 steel in dry sliding contact at high current density // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 6. P. 418 – 422.
12. Panin V.E. Synergetic principles of physical mesomechanics. Theor. Appl // Fracture Mech. 2001. Vol. 37. No. 1 – 3. P. 261 – 298.
13. Rao R.N., Das S., Mondal D.P., Dixit G. Mechanism of material removal during tribological behaviour of aluminium matrix (Al-Zn-Mg-Cu) composites // Tribology international. 2012. Vol. 53. P. 179 – 184.
14. Jankauskas V., Antonov M., Varnauskas V. etc. Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hard facings with low-carbon or stainless steel matrix // Wear. 2015. Vol. 328 – 329. P. 378 – 390.
15. Rhanafi-Benghalem N., Felder E., Loucif K., Montmitonnet P. Plastic deformation of 25CrMo4 steel during wear: Effect of the temperature, the normal force, the sliding velocity and the structural state // Wear. 2010. Vol. 268. P. 23 – 40.

Поступила 21 января 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. No. 1, pp. 43–47.

#### ON SOME PARAMETERS OF DRY SLIDING CONTACT STEEL/STEEL AT HIGH CURRENT DENSITY

M.I. Aleutdinova<sup>1,2</sup>, V.V. Fadin<sup>1</sup>, V.E. Rubtsov<sup>1,3</sup>

<sup>3</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<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.** Behavior of AISI 1020 steel at dry sliding against AISI 1045 steel under electric current of high density was studied. The plastic deformation of surface layer, its temperature increasing, appearance of new phases and structure defects occur in these conditions. It leads to



formation of friction induced structures layer. Contact current density is the main deterioration factor of external action on surface layer. It is shown that average contact temperature and thickness of friction induced structure layer increase at current density increasing. The character of change of wear intensity and electric conductance at changing of contact temperature is represented. It is established that wear intensity linearly depends on the contact temperature at normal wear regime. It is noted that regime of catastrophic wear is revealed as sharp increasing of wear intensity and synchronous decreasing of electric contact conductance at contact temperature of 500–600 °C. The thickness of friction induced structure layer achieved the value of 50 µm in these conditions.

**Keywords:** average contact temperature, friction induced structures, wear intensity, electric conductance of sliding contact.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-1-43-47

## REFERENCES

1. Kostetskii B.I. Structural and energetic adaptability of materials at friction. *Trenie i iznos*. 1985, vol. 6, no. 2, pp. 201–212. (In Russ.).
2. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombarov V.S. *Friction and wear calculation methods*. Pergamon Press: New York, 1982, 464 p.
3. Blau P.J. *Friction science and technology: from concepts to applications*. CRC Press, 2009 by Taylor & Francis Group, LLC, 432 p.
4. 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. *Appl. Surface Science*. 2013, vol. 280, pp. 381–387.
5. Rahaman M.L., Zhang L. On the estimation of interface temperature during contact sliding of bulk metallic glass. *Wear*. 2014, vol. 320, pp. 77–86.
6. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Rubtsov V.Ye. About wear and average surface temperature of copper or steel contacts at sliding current. *AIP Conf. Proc.* 2015, no. 1683, pp. 020051-1-020051-4.
7. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication]. Chichinadze A.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 576 p. (In Russ.).
8. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology*. Taylor & Francis Group, LLC, 2007. 640 p.
9. Amosov A.P. *Teplofizicheskie modeli treniya inertnykh i vzryvchatykh materialov* [Thermal models of friction of inert materials and explosives]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 363 p. (In Russ.).
10. Kennedy F.E., Lu Y., Baker I. Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting. *Tribology International*. 2015, vol. 82, pp. 534–542.
11. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Influence of cold working on the wear of AISI 1020 steel in dry sliding contact at high current density. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 418–422.
12. Panin V.E. Synergetic principles of physical mesomechanics. *Theor. Appl. Fracture Mech.* 2001, vol. 37, no. 1–3, pp. 261–298.
13. Rao R.N., Das S., Mondal D.P., and Dixit G. Mechanism of material removal during tribological behaviour of aluminium matrix (Al-Zn-Mg-Cu) composites. *Tribology International*. 2012, vol. 53, pp. 179–184.
14. Jankauskas V., Antonov M., Varnauskas V., Skirkus R., and Goljandin D. Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hard facings with low-carbon or stainless steel matrix. *Wear*. 2015, vol. 328–329, pp. 378–390.
15. Rhanafi-Benghalem N., Felder E., Loucif K., Montmitonnet P. Plastic deformation of 25CrMo4 steel during wear: effect of the temperature, the normal force, the sliding velocity and the structural state. *Wear*. 2010, vol. 268, pp. 23–40.

**Acknowledgements.** The work was performed according to the draft III.20.2.4 of the program III.20.2 of SB RAS basic research.

## Information about the authors:

**M.I. Aleutdinova**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate  
(aleut@ispms.tsc.ru)  
**V.V. Fadin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Senior Researcher  
**V.E. Rubtsov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Received January 21, 2016