

УДК 621.891

## ОБ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЬСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ\*

**Фадин В.В.**, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник (fvv@ispms.tsc.ru)  
**Колубаев А.В.**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник (kav@ispms.ru)  
**Алеутдинова М.И.**, к.т.н., научный сотрудник (aleut@ispms.tsc.ru)

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

**Аннотация.** Изучена взаимосвязь механизмов разрушения поверхностного слоя порошковых композитов и элементных составов их первичных структур в экстремальных условиях трения. Экстремальные условия заданы скольжением под высоким (более 100 МПа) давлением в граничной смазке или сухим скольжением под электрическим током высокой (более 100 А/см<sup>2</sup>) плотности. Это вызывало пластическую деформацию поверхностных слоев и их разрушение вследствие малоциклового усталости. Высокая износостойкость материалов в таких условиях должна быть достигнута за счет удовлетворительной релаксации напряжений в поверхностных слоях. Предполагается, что напряжения должны быть релаксированы за счет локальной пластической деформации в окрестности возникающих концентраторов напряжений. Легкость пластической деформации (и релаксации) должна быть обеспечена за счет снижения легирования структурных составляющих композитов (т.е. отсутствия твердых растворов). Композиты составов Cu – сталь (сплав) – TiC, полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с одновременным прессованием горячей шихты, имели сильную адгезию в скользящем контакте и проявили низкую износостойкость при граничном трении под высокими давлениями. Отсутствие твердых растворов в первичной структуре композита Cu – Fe – TiC соответствовало высокой износостойкости вследствие отсутствия адгезии в контакте и легкой релаксации напряжений. Композиты составов Cu – сталь – графит, изготовленные спеканием в вакууме, проявили сильную адгезию в сухом скользящем электрическом контакте и низкую износостойкость вследствие высокого содержания легирующих элементов. Отсутствие растворов в композите состава Cu – Fe – графит обусловило отсутствие адгезии в контакте и соответствующую высокую износостойкость. Кроме того, напряжения в поверхностном слое релаксировались также путем образования оксида FeO в контактном пространстве при скольжении с токобъемом. Композиты, содержащие твердые растворы, были не способны к образованию оксида FeO на поверхности скольжения. Это было дополнительной причиной реализации низкой износостойкости. Отмечено, что твердые растворы вызывали снижение теплопроводности поверхностного слоя. Это приводило к увеличению градиентов температуры на поверхности скольжения и к соответствующему ускорению разрушения зоны трения.

**Ключевые слова:** экстремальные условия трения, высокое контактное давление, скользящий электроконтакт, разрушение поверхностного слоя, релаксация напряжений, твердый раствор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-8-621-626

### ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что высокая износостойкость обусловлена высокой усталостной прочностью поверхностного слоя. Максимальная прочность реализуется в условиях многоциклового усталости. Это достигается, в первую очередь, за счет повышения предела текучести поверхностного слоя разными способами (легированием, наплавкой и т.п.) [2 – 5]. Упрочнение материалов твердыми фазами может увеличить усталостную прочность только в некоторых случаях [6, 7]. Применение сплавов со сложным элементным составом не всегда может быть убедительно обосновано [8, 9]. Для всех этих материалов следует задавать режим трения, не вызывающий сильного падения твердости контактного слоя из-за повышения температуры поверхности скольжения. Но в некоторых условиях эксплуатации происходит неизбежная пластическая деформация по-

верхностного слоя и он разрушается в условиях малоциклового усталости. Такие условия трения следует считать экстремальными для данного применяемого материала.

В общем случае пластическая деформация является способом релаксации напряжений [10, 11]. Легкая релаксация напряжений не приводит к значительному уменьшению размеров зерен в первичной структуре и материал разрушается при высокой степени деформации. Пластичность материалов задается его структурой (элементным и фазовым составами, напряженным состоянием и т.п.). Высокая пластичность должна обеспечить легкую релаксацию напряжений в окрестности возникающих концентраторов напряжений. Усложнение структуры путем легирования, введения твердых фаз или деформационных дефектов вызывает уменьшение пластичности [12]. Это означает снижение способности релаксировать напряжения за счет локальной пластической деформации и должно снижать усталостную прочность материала. Такая за-

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

кономерность наблюдалась на многих материалах при низких  $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} < 10^{-1} \text{ с}^{-1}\right)$  скоростях деформации. Однако в общем случае зависимость усталостной прочности от концентрации дефектов может иметь максимум или эта зависимость отсутствует [13].

Микрообъемы, прилегающие к поверхности скольжения, испытывают заметно более высокие механические и тепловые нагрузки (относительная скорость сдвига до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , мощность импульса  $10^5 \div 10^6 \text{ Вт/см}^2$  и т.п.) [14]. Если материал поверхностного слоя пластичен, то локальные напряжения должны релаксироваться легко и должна проявляться высокая износостойкость. Поэтому следует ожидать, что первичная структура со сложным составом не способна эффективно релаксировать напряжения в зоне экстремального скользящего контакта и будет разрушаться, что проявится как высокий износ. Эти общие соображения следует принимать как предположение, которое необходимо экспериментально проверить. Экстремальные условия трения можно задать любым видом внешнего воздействия, например, высоким давлением, высокой скоростью скольжения, высокой плотностью тока, отсутствием смазки и т.п. Порошковые композиты могут служить моделями для экспериментов в этом направлении.

Целью настоящей работы является изучение взаимосвязи первичной структуры металлических композитов и их износостойкости при скольжении под высоким контактным давлением или при высокой плотности тока.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Композиты (1 – 3) для трения под высоким давлением были изготовлены методом прессования в волне технологического горения [15]. Их теплопроводности ( $\lambda$ ) и твердость по Виккерсу (HV) определены по стандартным методикам и приведены в таблице. Скольжение с граничной смазкой при давлениях  $p = 40 \div 190 \text{ МПа}$  со скоростью  $v = 0,5 \text{ м/с}$  проведены по схеме торцевого уплотнения и по схеме вал – плоские колодки. Контртелом служил стеллит 3В16К.

Композиты (4 – 6) для скольжения с высокой плотностью тока получены спеканием в вакууме при температуре  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 ч. Их теплопроводности, удельное электросопротивление ( $\rho$ ) и твердость по

Бринеллю (HV) определены по стандартным методикам и приведены в таблице. Изображения поверхностей скольжения получены с помощью оптического микроскопа Neophot-21. Фазовые составы поверхностных слоев определены на дифрактометре ДРОН-3. Скольжение проведено по схеме pin-on-ring при давлении  $p = 0,13 \text{ МПа}$  со скоростью  $5 \text{ м/с}$  без смазки под воздействием переменного тока, перпендикулярного поверхности скольжения. Контртелом служила закаленная сталь марки Ст45 (50 HRC).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Композит 1, содержащий сталь Гадфильда (13 % Mn), проявляет высокую адгезию к контртелу (рис. 1, а). Наблюдаются смещения больших объемов поверхностного слоя, характерные для состояния предразрушения. Поверхность скольжения композита 2 разрушается также вследствие адгезии, но путем неограниченного пластического течения с образованием вязких квазипериодических трещин, перпендикулярных направлению скольжения (рис. 1, б). Скольжение композита 3 происходит без явных признаков адгезии (рис. 1, в).

Усиление адгезии взаимосвязано, в первую очередь, с возрастанием температуры контакта. Под воздействием температуры и при некоторых схемах сопряжения смазка может исчезать из зоны трения и поверхностный слой будет быстро разрушен вследствие адгезии. Высокая температура контакта возникает при применении материалов с низкой теплопроводностью, которая присуща материалам со сложной структурой (сплавы, твердые растворы, интерметаллиды и т.п.). Композиты 1 и 2 содержат твердые растворы (Ni – Cr и сталь Гадфильда) и имеют низкие теплопроводности (см. таблицу), поэтому на поверхности трения возникают высокие градиенты температуры, вызывающие высокие тепловые и механические напряжения. Эти два фактора (градиент температуры и адгезия) наиболее явно способствуют разрушению поверхностного слоя, то есть его износу. Относительно высокая теплопроводность композита 3 обеспечивала удовлетворительный теплоотвод от зоны трения, что не вызывало сильной адгезии и трение происходило с низким коэффициентом трения. Различие теплопроводностей композитов вызывает различие средней температуры контакта, которая может быть оценена на основе распределения тепловых потоков из

#### Составы первичных структур и некоторые свойства композитов (Г13 – сталь Гадфильда (13 %Mn))

#### Compositions of primary structures and some properties of the composites (G13 – Hadfield steel (13 % Mn))

|   | Состав, % (объемн.)                | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | HV,<br>ГПа |   | Состав, % (объемн.)                    | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | HV,<br>ГПа | $\rho \cdot 10^{-6}$ ,<br>Ом·м |
|---|------------------------------------|-------------------------|------------|---|--|-------------------------|------------|--------------------------------|
| 1 | TiC – 30 % Cu – 20 % Г13           | 19                      | 7,85       | 4 | Cu – 10 % графит – 70 % Г13            | 24                      | 1,70       | 1,00                           |
| 2 | TiC – 30 % Cu – 20 % (Co, Ni – Cr) | 22                      | 3,20       | 5 | Cu – 10 % графит – 70 % (TiC, Cu, Г13) | 28                      | 1,14       | 0,32                           |
| 3 | TiC – 30 % Cu – 20 % Fe            | 44                      | 6,20       | 6 | Cu – 10 % графит – 70 % Fe             | 72                      | 1,22       | 0,16                           |



Рис. 1. Изношенные поверхности СВС-композигов составов TiC – Cu – Г13 (а), TiC – Cu – (Co, Ni – Cr) (б) и TiC – Cu – Fe (в) после скольжения под высокими давлениями

Fig. 1. Worn surfaces of SHS composites of compositions TiC – Cu – Г13 (а), TiC – Cu – (Co, Ni – Cr) (б) and TiC – Cu – Fe (в) after sliding under high pressures

зоны трения в композит и контртело без учета износа в виде  $f\dot{p}v = \lambda_1 \text{grad}T_1 + \lambda_2 \text{grad}T_2$ . Средняя температура  $T_s$  контактов композигов зависит от схемы сопряжения. Например, в схеме сопряжения типа торцевое уплотнение (торцы колец) зона трения композита 2 нагревается до расчетных температур  $T_s > 1500$  К. Зона трения композита 3 нагревается до  $T_s < 700$  К. Очевидно, что в схемах сопряжения с более высоким теплоотводом температура контакта будет ниже. Адгезия в контактах композигов 1 и 2 приводила к их более интенсивному износу в сравнении с износом композита 3. Это означает, что применение материалов, содержащих твердые растворы, не является целесообразным в тяжелых условиях трения. Справедливость этого утверждения видна также при сравнении стойкости опорных подшипников буровых долот. Опорные подшипники имели конструкцию типа матрица – твердый наполнитель, где матрицей служил псевдосплав железо + бронза БрОС-8-12. Композиты 1 и 3 служили как экспериментальные наполнители. Стеллит ЗВ16К служил как промышленный наполнитель. Было показано, что стойкость буровых долот, содержащих наполнитель 3, в два раза выше работоспособности композита с наполнителем 1. Следует упомянуть, что стойкость долот с наполнителем 3 находилась на уровне стойкости промышленных долот с наполнителем из стеллита ЗВ16К. Из приведен-

ных данных видно, что твердые растворы в первичной структуре затрудняют релаксацию напряжений в зоне контакта, приводят к повышению температуры контакта, к соответствующему быстрому исчезновению смазки в контакте и к активации адгезии. Кроме того, низкая теплопроводность в присутствии твердых растворов вызывает также рост градиентов температуры в контакте.

Сухое скольжение материалов под воздействием электрического тока сопровождается высокими импульсами температуры в пятнах контакта. Это обычно усиливает адгезию [16]. Видно (рис. 2, а), что композит 4, содержащий сталь Гадфильда, изнашивается по адгезионному механизму. Аналогичный вид изношенной поверхности имеет композит 5, основой которого служит СВС-композит 1 (СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез) (см. таблицу). Интенсивность изнашивания этих композигов имеет высокие значения [17]. Поверхность скольжения композита 6 деформируется по механизму вязкой жидкости (рис. 2, б) и разрушается с низкой интенсивностью без явных признаков адгезии. Различие механизмов изнашивания должно быть обусловлено, в первую очередь, состоянием поверхности скольжения. Известно [18], что отсутствие окислов на поверхности скольжения без смазки под током приводит к адгезии. Поверхностный

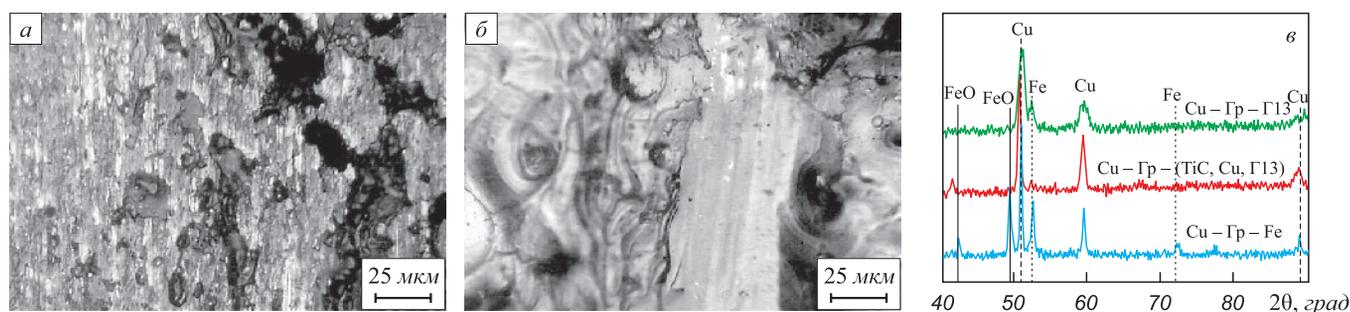


Рис. 2. Изношенные поверхности композигов Cu – графит-Г13 (а), Cu – графит – Fe (б) и рентенограммы поверхностных слоев композигов (в)

Fig. 2. Worn surfaces of composites Cu – graphite-G13 (а), Cu – graphite – Fe (б) and XRD pattern of the composites surface layers (в)

слой композитов 4 и 5 не содержит окислов (рис. 2, в) и это активизирует адгезию. Тогда возникают высокие напряжения в зоне контакта. Присутствие оксида FeO на поверхности скольжения композита 6 приводит к отсутствию признаков адгезии, то есть оксид FeO выполняет функцию смазки и высокие напряжения не возникают (релаксируются с помощью оксида FeO). Кроме того, плавление поверхности трения обеспечивает дополнительную релаксацию напряжений [19, 20].

Из приведенных данных видно, что теплопроводность является параметром первичной структуры, который оказывает сильное влияние на прочность поверхностного слоя при трении. Твердость и другие механические свойства первичной структуры не играют заметной роли. Снижение теплопроводности и соответствующее усиление адгезии обусловлено, в первую очередь, существованием твердых растворов в первичной структуре. Это приводит к соответствующему резкому повышению температуры в пятнах контакта, к уменьшению предела текучести материала в пятнах контакта и к высоким механическим напряжениям. Релаксация этих напряжений возможна путем локальной пластической деформации в зоне возникновения концентраторов напряжений. Но твердые растворы или присутствие нескольких фаз в поверхностном слое препятствуют быстрой пластической деформации и не допускают легкую релаксацию напряжений. Следует учесть, что в зоне трения уменьшаются размеры элементов структуры и возможно появление нанокристаллического контактного слоя [21]. Иногда образуются новые соединения за счет химических реакций или за счет перемешивания атомов и, в общем случае, поверхностный слой является композитом. Структурные составляющие такого композита, содержащие твердые растворы (например, микрочастицы стали 110Г13), релаксируют напряжения за счет образования магистральной трещины и последующего выхода фрагмента разрушения в контактное пространство в виде возможной частицы износа. Для обобщения следует отметить, что обычно твердые растворы снижают пластичность основы материала и повышают предел текучести [12]. Это значит, что твердые растворы упрочняют основной металл и одновременно снижают его способность к релаксации напряжений. Это упрочнение приводит к сдвиговой неустойчивости поверхностного слоя на макромасштабном уровне и к его ускоренному разрушению в экстремальных условиях трения при высоких давлениях. Поэтому следует ожидать, что упрочнение первичной структуры твердыми растворами приведет к ускоренному разрушению поверхностного слоя в условиях динамического внешнего воздействия трением. Твердые растворы вызывают также увеличение удельного электросопротивления первичной структуры и, соответственно, увеличение электросопротивления зоны трения. Поэтому прохождение электрического тока приведет к повышенному выделению теплоты

в таком контакте и к увеличению градиентов температуры, что значительно усилит интенсивность разрушения поверхностного слоя [19, 20]. Следовательно, для обеспечения высокой прочности поверхностных слоев композитов, содержащих стали, при нагружении их граничным трением под экстремально высоким контактным давлением или при нагружении их скольжением под электрическим током экстремально высокой плотности необходимы пластичные стали, способные легко релаксировать напряжения в окрестности возникающих концентраторов напряжений путем пластических микросдвигов. Наиболее просто это выполняется в случае применения железа.

## Выводы

Порошковые СВС-композиты составов Cu – TiC – сталь проявляют высокую износостойкость при граничном трении под высоким (более 100 МПа) контактным давлением в случаях, когда связка Cu – сталь способна легко релаксировать напряжения путем локальной пластической деформации в контактном слое и при отсутствии адгезии в контакте. Это является возможным при низком содержании легирующих элементов в стали и меди или при применении железа в связке.

Порошковые спеченные композиты составов Cu – графит – сталь проявляют высокую износостойкость при сухом трении под электрическим током высокой плотности в случаях, когда сталь и медь имеют низкое содержание легирующих элементов, отсутствует адгезия, в контактном пространстве образуется оксид FeO и релаксация напряжений происходит за счет локального плавления поверхности скольжения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Friction and Wear. Calculation Methods. – New York: Pergamon Press, 1982. – 450 p.
2. Ulutan M., Celik O.N., Gasan H., Er U. Effect of Different Surface Treatment Methods on the Friction and Wear Behavior of AISI 4140 Steel // J. Mater. Sci. Technol. 2010. Vol. 26. No. 3. P. 251 – 257.
3. Kato H., Todaka Y., Umamoto M., Haga M., Sentoku E. Sliding wear behavior of sub-microcrystalline pure iron produced by high-pressure torsion straining // Wear. 2015. Vol. 336-337. P. 58 – 68.
4. Bansa D.G., Eryilmaz D.G., Blau P.J. Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy // Wear. 2011. Vol. 271. No. 9. P. 2006 – 2015.
5. Blau P.J. Friction Science and Technology – From Concepts to Applications. – Boca Raton, FL: Taylor and Francis CRC Press, 2008. – 405 p.
6. Rajkumar K., Aravindan S. Tribological performance of microwave sintered copper-TiC-graphite hybrid composites // Tribology International. 2011. Vol. 44. No. 4. P. 347 – 358.
7. Çelikyürek I., Körpe N.Ö., Ölçer Tuğba, Gürler R. Microstructure, Properties and Wear Behaviors of (Ni<sub>3</sub>Al)<sub>p</sub> Reinforced Cu Matrix Composites // J. Mater. Sci. Technol. 2011. Vol. 27. No. 10. P. 937 – 943.

8. 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 // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 280. P. 381 – 387.
9. Fang Y.L., Wang H.M. High-temperature sliding wear resistance of a ductile metal-toughened Cr13Ni5Si2 ternary metal silicide alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. Vol. 433. P. 114 – 119.
10. Glezer A.M., Metlov L.S. Physics of megaplastic (severe) deformation in solids // *Physics of the Solid State*. 2010. Vol. 52. No. 6. P. 1162 – 1169.
11. Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. Influence of Multiscale Localized Plastic Flow on Stress-Strain Patterns // *Phys. Mezomech*. 2015. Vol. 18. No. 1. P. 8 – 12.
12. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.
13. Biermann H., Beyer G., Mughrabi H. Low-cycle fatigue of a metal-matrix composite: Influence of pre-straining on the fatigue life // *Materials Science and Engineering: A*. 1997. Vol. 234-236. P. 198 – 201.
14. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – 64 с.
15. Fadin V.V., Kolubaev A.V., Aleutdinova M.I. Friction of Composites Based on Titanium Carbide Produced by the Process Combustion Method // *Journal of Friction and Wear*. 2011. Vol. 32. No. 6. P. 608 – 613.
16. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology*. – London, New York: CRC Press, 2006. – 639 p.
17. Алеутдинова М.И. Характеристики зоны контакта металлических композитов в условиях сухого трения и протекания электрического тока // *Вопросы материаловедения*. 2012. Т. 70. № 2. С. 102 – 108.
18. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах. Учеб. для вузов. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 с.
19. 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.
20. Алеутдинова М.И., Фадин В.В. Характеристики сухого скользящего электроконтакта металлов в условиях катастрофического изнашивания // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 2. С. 103 – 108.
21. Сарычев В.Д., Громов В.Е., Невский С.А., Низовский А.И., Коновалов С.В. Формирование нанослоев за счет развития гидродинамических неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 10. С. 679 – 687.

Поступила в редакцию 17 июня 2019 г.

После доработки 1 июля 2019 г.

Принята к публикации 3 июля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 8, pp. 621–626.

## ON WEAR RESISTANCE OF STEEL-CONTAINING COMPOSITES UNDER EXTREME FRICTION CONDITIONS

*V.V. Fadin, A.V. Kolubaev, M.I. Aleutdinova*

**Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk,  
Russia**

**Abstract.** The interrelation between the mechanisms of surface layer deterioration of powder composites and the elemental compositions of their primary structures under extreme conditions of friction was studied. Extreme conditions were set by sliding under high pressure (higher 100 MPa) in boundary lubrication or by dry sliding under high density electric current (higher 100 A/cm<sup>2</sup>). It caused plastic deformation of the surface layers and their deterioration due to low-cycle fatigue. High wear resistance of materials in such conditions should be achieved due to satisfactory stress relaxation in the surface layers. It was suggested that stresses should be relaxed due to local plastic deformation in vicinity of the emerging stress concentrators. The ease of plastic deformation (and ease of relaxation) should be ensured by reducing the doping of the composites structural components, i.e. due to the lack of solid solutions. It was shown that the composites having the Cu – steel (alloy) – TiC compositions obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis with simultaneous pressing of the burning charge had strong adhesion in the sliding contact and showed low wear resistance under high pressures boundary friction. The absence of solid solutions in the primary structure of the Cu – Fe – TiC composite corresponded to high wear resistance due to the absence of adhesion in the contact and easy stress relaxation. Composites of Cu – steel-graphite compounds, made by sintering in vacuum, showed strong adhesion in a dry sliding electrical contact and low wear resistance due to the high content of alloying elements. It was noted that the absence of solutions in the composite composition of Cu – Fe – graphite caused the absence of adhesion in contact and the corresponding high wear resistance. In addition, stresses in the surface layer were also relaxed by the formation of FeO oxide in the contact space during sliding with the current

collector. Composites containing solid solutions were not capable of forming FeO oxide on the sliding surface. It was an additional reason for the low wear resistance realization. It was noted that solid solutions caused a decrease in the thermal conductivity of the surface layer. Therefore, it led to an increase in temperature gradients on the sliding surface and to a corresponding acceleration of the friction zone deterioration.

**Keywords:** extreme friction conditions, high contact pressure, sliding electrical contact, surface layer deterioration, stress relaxation, catastrophic wear, solid solution.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-8-621-626

### REFERENCES

1. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Friction and Wear. Calculation Methods*. New York: Pergamon Press, 1982, 450 p.
2. Ulutan M., Celik O.N., Gasan H., Er U. Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel. *J. Mater. Sci. Technol.* 2010, vol. 26, no. 3, pp. 251–257.
3. Kato H., Todaka Y., Umamoto M., Haga M., Sentoku E. Sliding wear behavior of sub-microcrystalline pure iron produced by high-pressure torsion straining. *Wear*. 2015, vol. 336-337, pp. 58–68.
4. Bansa D.G., Eryilmaz D.G., Blau P.J. Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti–6Al–4V alloy. *Wear*. 2011, vol. 271, no. 9, pp. 2006–2015.
5. Blau P.J. *Friction Science and Technology—From Concepts to Applications*. Boca Raton, FL: Taylor and Francis CRC Press, 2008, 405 p.
6. Rajkumar K., Aravindan S. Tribological performance of microwave sintered copper–TiC–graphite hybrid composites. *Tribology International*. 2011, vol. 44, no. 4, pp. 347–358.
7. Çelikyürek I., Körpe N.Ö., Ölçer Tuğba, Gürler R. Microstructure, Properties and Wear Behaviors of (Ni<sub>3</sub>Al)<sub>p</sub> Reinforced Cu

- Matrix Composites. *J. Mater. Sci. Technol.* 2011, vol. 27, no. 10, pp. 937–943.
8. 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. *Applied Surface Science*. 2013, vol. 280, pp. 381–387.
  9. Fang Y.L., Wang H.M. High-temperature sliding wear resistance of a ductile metal-toughened Cr13Ni5Si2 ternary metal silicide alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007, vol. 433, pp. 114–119.
  10. Glezer A.M., Metlov L.S. Physics of megaplastic (severe) deformation in solids. *Physics of the Solid State*. 2010, vol. 52, no. 6, pp. 1162–1169.
  11. Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. Influence of multiscale localized plastic flow on stress-strain patterns. *Phys. Mezomech*. 2015, vol. 18, no. 1, pp. 8–12.
  12. Polukhin P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. *Fizicheskie osnovy plasticheskoi deformatsii. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Physical basis of plastic deformation. Tutorial for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 584 p. (In Russ.).
  13. Biermann H., Beyer G., Mughrabi H. Low-cycle fatigue of a metal-matrix composite: Influence of pre-straining on the fatigue life. *Materials Science and Engineering: A*. 1997, vol. 234-236, pp. 198–201.
  14. Tushinskii L.I., Poteryaev Yu.P. *Problemy materialovedeniya v tribologii* [Materials science problems in tribology]. Novosibirsk: NETI, 1991, 64 p. (In Russ.).
  15. Fadin V.V., Kolubaev A.V., Aleutdinova M.I. Friction of composites based on titanium carbide produced by the process combustion method. *Journal of Friction and Wear*. 2011, vol. 32, no. 6, pp. 608–613.
  16. Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology*. London, New York: CRC Press, 2006, 639 p.
  17. Aleutdinova M.I. Characteristics of a contact zone of metal composites under dry friction and electric current passing. *Voprosy materialovedeniya*. 2012, vol. 70, no. 2, pp. 102–108. (In Russ.).
  18. 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.).
  19. 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.
  20. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Characteristics of dry sliding electric contact of metals in conditions of catastrophic wearing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 103–108. (In Russ.).
  21. Sarychev V.D., Gromov V.E., Nevskii S.A., Nizovskii A.I., Konovalov S.V. Nanolayers formation at hydrodynamic instability development under the external energy effects. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 10, pp. 679–687. (In Russ.).
- 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:**
- V.V. Fadin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Senior Researcher (fvv@ispms.ru)
- A.V. Kolubaev**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory (kav@ispms.ru)
- M.I. Aleutdinova**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate (aleut@ispms.ru)

Received June 17, 2019

Revised July 1, 2019

Accepted July 3, 2019