



Оригинальная статья

УДК 53.043

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-798-805

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2433>

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЛАСТЕЙ КОМПОЗИТОВ WC – (Fe – Mn – C) ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СТАЛИ

Н. Л. Савченко, И. Н. Севостьянова, С. Ю. Тарасов

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

Аннотация. Изучены трибологические характеристики, фазовый состав поверхностей трения и микротвердость приповерхностных областей композитов WC–(Fe–Mn–C) с двухфазной матрицей из ($\gamma + \alpha'$)-железа, содержащей 4 % (по массе) Mn (WC – 80Г4), и однофазной матрицей из γ -железа, имеющей в составе 20 % (по массе) Mn (WC – 80Г20), после трения по диску из быстрорежущей стали при контактном давлении 5 МПа и скоростях скольжения в диапазоне от 10 до 37 м/с. Интенсивность изнашивания WC – 80Г4 и WC – 80Г20 увеличивалась с ростом скорости скольжения, при этом скорость изнашивания WC – 80Г20 при фиксированных скоростях скольжения была примерно в три раза выше, чем у WC – 80Г4. Значения коэффициента трения снижаются с увеличением скорости скольжения таким образом, что при фиксированных скоростях скольжения значения коэффициента трения у WC – 80Г4 были ниже, чем у WC – 80Г20. Количество сложного оксида FeWO₄, образовавшегося при трибоокислении изнашиваемой поверхности композитов, увеличивалось со скоростью скольжения и было прямо пропорционально значениям интенсивности изнашивания и обратно пропорционально показателям коэффициента трения. При фиксированных скоростях скольжения трибоокисление WC – 80Г4 приводит к образованию на поверхности трения большого количества FeWO₄ по сравнению с композитом WC – 80Г20. Индентирование изношенных поверхностей пирамидкой Виккерса показало, что характер сопротивления вдавливанию у трибослоев, образованных при высоких скоростях скольжения (30 и 37 м/с), отличается от такового для трибослоев, полученных при относительно низких скоростях скольжения (10 и 20 м/с). А именно, поверхности трения после высоких скоростей скольжения характеризовались более вязким поведением. Измерение значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученные после индентирования от поверхности трения вглубь материала, зафиксировало факт упрочнения приповерхностных областей композитов WC – 80Г4 и, напротив, разупрочнения в случае WC – 80Г20. Таким образом, в условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности, структурно-фазовое состояние подложки композитов WC–(Fe–Mn–C), на которой формируется вязкий защитный трибослой, оказывается очень важным фактором. Именно двухфазная ($\gamma + \alpha'$) стальная матрица обеспечивает в условиях сильного фрикционного нагрева условия для эффективного формирования гетерофазного композиционного слоя, понижающего коэффициент трения и обладающего высоким сопротивлением разрушению при вдавливании.

Ключевые слова: композит, смазка, износ, трение, микротвердость, адаптация, карбид вольфрама, высокомарганцевая сталь

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проекты FWRW-2021-0006, FWRW-2021-0005 и FWRW-2021-0009.

Для цитирования: Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Тарасов С.Ю. Трибологические характеристики, фазовый состав и микротвердость приповерхностных областей композитов WC – (Fe – Mn – C) после высокоскоростного скольжения по стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 798–805. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-798-805>

Original article

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS, PHASE COMPOSITION AND MICROHARDNESS OF SUBSURFACE REGIONS OF WC – (Fe – Mn – C) COMPOSITES AFTER HIGH-SPEED SLIDING ON STEEL

N. L. Savchenko, I. N. Sevost'anova, S. Yu. Tarasov

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

Abstract. The authors investigated tribological characteristics, phase composition of friction surfaces and microhardness of near-surface regions of WC-(Fe-Mn-C) composites with a two-phase ($\gamma + \alpha'$) matrix containing 4 % wt. Mn (WC - 80G4), and a single-phase matrix of γ -iron containing 20 % wt. Mn (WC - 80G20) after friction on a disk of high-speed steel at a contact pressure of 5 MPa and sliding speeds in the range from 10 to 37 m/s. The wear intensity of WC - 80G4 and WC - 80G20 increased with increasing sliding speed, while the wear rate of WC - 80G20 at fixed sliding speeds was approximately three times higher than that of WC - 80G4. The values of the friction coefficient decrease with increasing sliding speed in such a way that at fixed sliding speeds the values of the friction coefficient of WC - 80G4 were lower than those of WC - 80G20. The amount of complex oxide FeWO_4 formed during tribo-oxidation of the composites' worn surface increased with the sliding speed and was directly proportional to the wear intensity and inversely proportional to the friction coefficient values. At fixed sliding speeds, tribooxidation of WC - 80G4 leads to the formation of a larger amount of FeWO_4 on the friction surface, compared to the WC - 80G20 composite. Indentation of worn surfaces with a Vickers pyramid showed that the nature of indentation resistance of tribolayers formed at high sliding speeds (30 m/s and 37 m/s) differs from that for tribolayers obtained at relatively low sliding speeds (10 and 20 m/s), namely, the friction surfaces after high sliding speeds were characterized by a more tough behavior. Measurement of microhardness values of the WC - 80G4 and WC - 80G20 composites obtained after indentation from the friction surface into the depth of the material recorded the fact of hardening of the near-surface regions of the WC - 80G4 composites and, on the contrary, softening in the case of WC - 80G20. Thus, under conditions of strong heating and severe plastic deformation of the surface, structural-phase state of the substrate of WC-(Fe-Mn-C) composites, on which this viscous protective tribolayer is formed, turns out to be a very important factor. It is the two-phase ($\gamma + \alpha'$) steel matrix that, under conditions of strong frictional heating, provides the conditions for effective formation of a heterophase composite layer that reduces the friction coefficient and has a high resistance to fracture upon indentation.

Keywords: composite, lubrication, wear, friction, microhardness, adaptation, tungsten carbide, high-manganese steel

Funding: The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, projects FWRW -2021-0006, FWRW -2021-0005 and FWRW-2021-0009.

For citation: Savchenko N.L., Sevost'anova I.N., Tarasov S.Yu. Tribological characteristics, phase composition and microhardness of subsurface regions of WC - (Fe - Mn - C) composites after high-speed sliding on steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 804–805. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-798-805>

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным металлом для полной или частичной замены кобальта и никеля в твердых сплавах, металлокерамике и наплавках является железо [1 – 4]. Твердые сплавы со связующими на основе железа по своим характеристикам оказываются хуже, чем соответствующие сплавы с кобальтом, но обладают низкой стоимостью, способностью к термической обработке и довольно высокой прочностью. Недостатки же связаны, в основном, с плохой смачиваемостью карбидной фазы, опасностью образования охрупчивающих композитных продуктов реакции, и могут быть устранены путем правильного выбора компонентов и технологии приготовления [1 – 3] композитов.

Среди большого разнообразия металломатричных композитов (ММК), ММК со связкой в виде высокомарганцевой стали широко используются в качестве бурового инструмента в горной, угольной и нефтедобывающей промышленности благодаря их уникальным свойствам. В частности, закалка такой матрицы на твердый раствор (аустенит) позволяет создать композит с высокой эффективностью сопротивления пластической деформации и ударным нагрузкам [1 – 4]. В условиях сильного удара и вибрации аустенит связки частично может трансформироваться в мартенсит, который обладает высокой твердостью и хорошей износостойкостью, тогда как часть связки при этом остается аустенитной. Это позволяет прочно удерживать керамические частицы упрочняющей фазы [1 – 4].

Для снижения износа и трения в высокотемпературных условиях скольжения, например, в двигателях внутреннего сгорания или реактивных двигателях, при вы-

сокоскоростной обработке металлов и т. д., необходимо использовать композиты, устойчивые к высокотемпературному трибоокислению [5 – 8]. С другой стороны, трибоокисление компонентов композита с образованием защитных трибослоев может служить эффективным механизмом адаптации материалов в экстремальных условиях трения [9, 10].

В работе [11] показано, что композиты WC-(Fe-Mn-C) с со стальными матрицами при высокоскоростном скольжении по стальному диску в диапазоне скоростей от 7 до 37 м/с демонстрируют эффект трибологической адаптации с образованием трибологического слоя, обогащенного сложным оксидом FeWO_4 . Максимальный антифрикционный эффект генерируемого *in situ* FeWO_4 был продемонстрирован на примере композита WC - сталь с двухфазной ($\gamma + \alpha'$) матрицей, содержащей 4 % (по массе) Mn при скольжении по стали со скоростью 37 м/с, где был достигнут коэффициент трения $\sim 0,075$.

К настоящему времени остается невыясненным вопрос о физической природе улучшения трибологических свойств композитов WC-(Fe-Mn-C) с двухфазной ($\gamma + \alpha'$) матрицей в сравнении с однофазной матрицей из γ -железа.

В работе изучены трибологические характеристики, фазовый состав поверхностей трения и микротвердость приповерхностных областей композитов WC-(Fe-Mn-C) с матрицами, состоящими из ($\gamma + \alpha'$)-железа, имеющими в составе 4 % (по массе) Mn, и γ -железа, имеющими в составе 20 % (по массе) Mn, после трения по диску из быстрорежущей стали при контактом давлении 5 МПа и скоростях скольжения в диапазоне от 10 до 37 м/с.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Композиты с металлической матрицей WC-(Fe–Mn–C) получали методом пропитки пористых каркасов WC смесью эвтектического состава (30 % WC (по массе) – сталь Fe–Mn–C) в вакуумной печи при остаточном давлении аргона 0,8 МПа, температуре 1350 °С и последующей закалкой в масло от температуры 1150 °С. Общее количество углерода в матрице составляло около 0,8 % (по массе) для всех образцов. Матрица была преднамеренно легирована марганцем для получения образцов с матрицами Fe–Mn–C, которые содержали либо 4 % (по массе) Mn (WC – 80Г4), либо 20 % (по массе) Mn (WC – 80Г20). Полученные композиты имели в своем составе 80 ± 2 % зерен WC (по массе) и 20 ± 2 % стальной матрицы.

Окончательные размеры образцов составляли $5 \times 5 \times 7$ мм. Оба композита WC – 80Г4 и WC – 80Г20 имели один и тот же тип микроструктуры со средним размером карбидного зерна и расстоянием между частицами карбидов $2,7 \pm 0,5$ и $1,2 \pm 0,2$ мкм соответственно. Металлографическая пористость не превышала 0,5 %.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 с $\text{Cu-K}\alpha$ излучением. Он показал наличие в WC – 80Г20 фаз WC и $\gamma\text{-Fe}$, тогда как в WC – 80Г4 матрица дополнительно содержала около 20 ± 5 % мартенситной фазы $\alpha'\text{-Fe}$ (по объему).

Трибологические испытания композитов по схеме палец-диск проводили на универсальной машине трения УМТ-1. В качестве контртела использовали диск из литой быстрорежущей стали с твердостью 63 – 65 HRC. Испытания проводили при номинальном контактном давлении 5 МПа в диапазоне скоростей 10 – 37 м/с (10, 20, 30, 37 м/с). Износ оценивали путем измерения высоты образца до и после испытания.

Изношенные поверхности исследовали с помощью прибора SEM Philips SEM-515 с приставкой для энергодисперсионного микроанализа EDAX ECON IV. Данные по микротвердости получали на микротвердомере Duramin-5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Интенсивность изнашивания (W) WC – 80Г4 и WC – 80Г20 увеличивалась с ростом скорости скольжения (рис. 1, а), при этом скорость изнашивания WC – 80Г20 при фиксированных скоростях скольжения была примерно в три раза выше, чем у WC – 80Г4. Значения коэффициента трения (f) снижаются с увеличением скорости скольжения таким образом, что при фиксированных скоростях скольжения значения коэффициента трения WC – 80Г4 были ниже, чем у WC – 80Г20 (рис. 1, б).

Проведенный РФА изношенных поверхностей показал, что помимо фаз WC, $\gamma\text{-Fe}$ в WC – 80Г20 и $(\gamma + \alpha')\text{-Fe}$

в WC – 80Г4, в обоих композитах идентифицируется фаза FeWO_4 (рис. 2, а). По данным, полученным в результате полуквантитативного рентгенофазового анализа соответствующих отражений от изношенных поверхностей, количество вольфрамата железа FeWO_4 , образовавшегося при трибоокислении образцов, растет с увеличением скорости скольжения (от 10 до 37 м/с) с 10 до 16 % (об.) в WC – 80Г4 и с 4 до 10 % (об.) в WC – 80Г20.

Приведенные на рис. 2, б, в корреляционные зависимости между количеством формирующегося на поверхности трения FeWO_4 и трибологическими свойствами композитов (интенсивностью изнашивания W и коэффициентом трения f) ясно показывают, что количество сложного оксида прямо пропорционально значениям интенсивности изнашивания и обратно пропорционально значениям коэффициента трения. Необходимо отметить, что при фиксированных скоростях скольжения трибоокисление WC – 80Г4 приводит к образованию на поверхности трения большего количества FeWO_4 , по сравнению с композитом WC – 80Г20 (рис. 2, б, в).

Изношенные поверхности композитов обоих составов после всех скоростей скольжения характеризуются

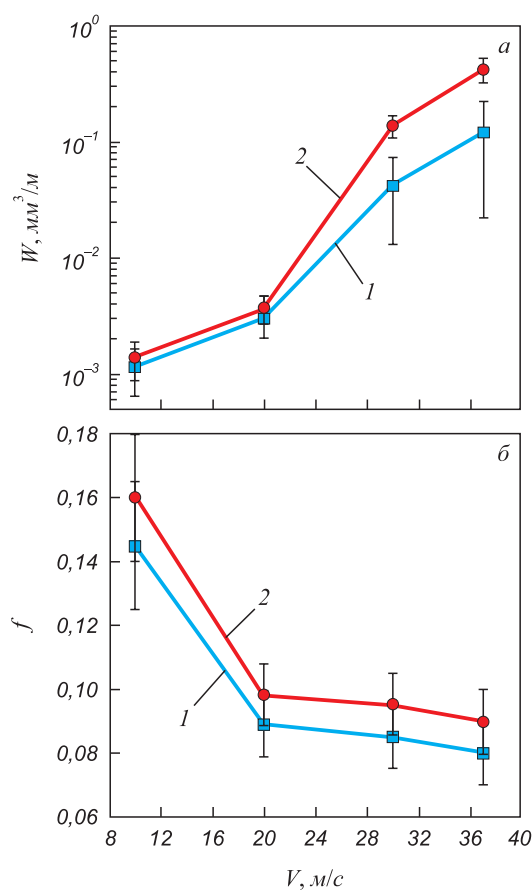


Рис. 1. Зависимость значений интенсивности изнашивания W (а) и коэффициента трения f (б) композитов WC – 80Г4 (1) и WC – 80Г20 (2) от скорости скольжения

Fig. 1. Dependence of wear rate W (а) and friction coefficient (f) of WC – 80Г4 (1) and WC – 80Г20 (2) composites on sliding speed

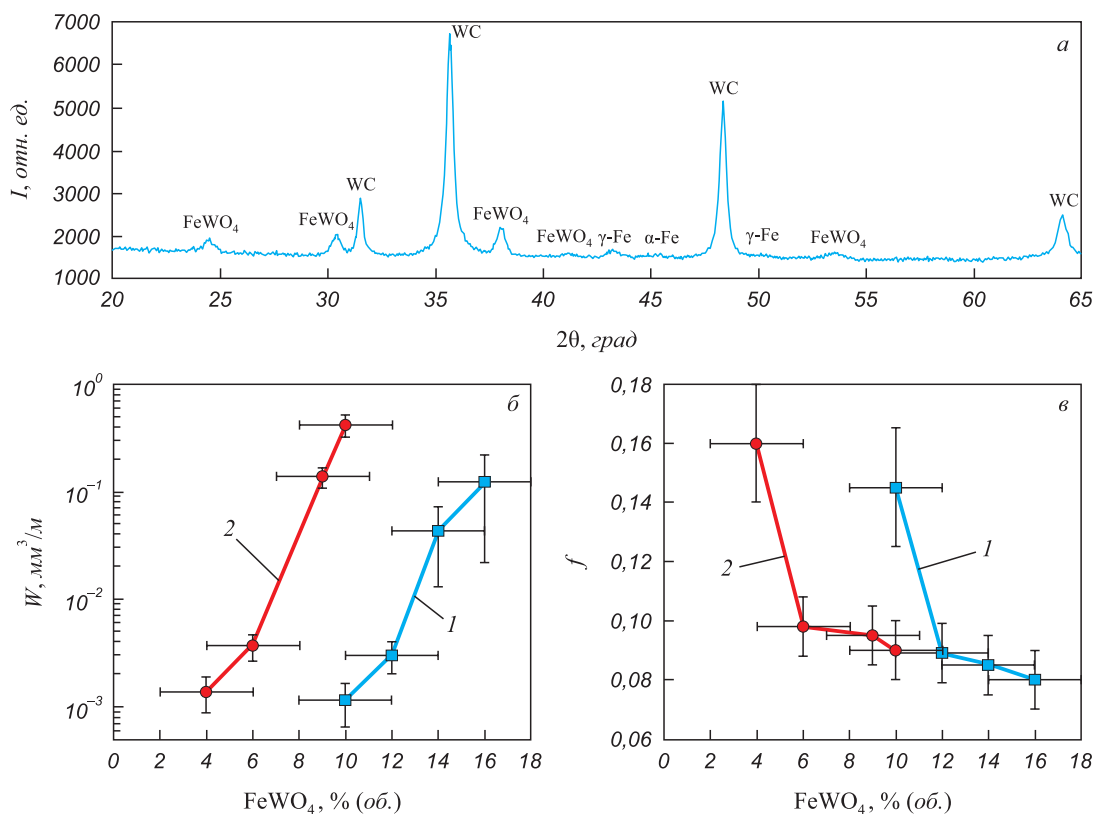


Рис. 2. Рентгенограмма изношенной поверхности WC – 80Г4 после скорости скольжения 37 м/с (а), зависимости интенсивности изнашивания W (б) и коэффициента трения f (в) от содержания $FeWO_4$ на изношенной поверхности композитов WC – 80Г4 (1) и WC – 80Г20 (2)

Fig. 2. X-ray patterns of the worn surface of WC – 80G4 after a sliding speed of 37 m/s, dependences wear rate W (б) and friction coefficient f (в) on the content of $FeWO_4$ on the worn surface of WC – 80G4 (1) and WC – 80G20 (2) composites

наличием светлых и серых участков (рис. 3). По данным энергодисперсионного микроанализа яркие контрастные области были идентифицированы как зерна и фрагменты WC, которые агломерировались и уплотнились, вытесняя стальную связку в процессе скольжения по стальному диску. Серые области представляют собой слои переноса, которые включают в себя, помимо сильно фрагментированных зерен WC, окисленные компоненты стального контртела и стальной связки композита. После скоростей скольжения 30 и 37 м/с на изношенных поверхностях обоих композитов формировался сплошной трибослой, состоящий из мелких фрагментов окисленных компонентов композита и стального контртела (рис. 3, в, з).

Инденитрование изношенных поверхностей пирамидкой Виккерса при нагрузке 100 Н показало, что характер сопротивления такому инденитрованию у трибослоев, образованных при высоких скоростях скольжения (30 и 37 м/с), отличается от такового для трибослоев, полученных при относительно низких скоростях скольжения (10 и 20 м/с). Они демонстрируют формирование на поверхности многочисленных трещин (рис. 3, а), отслаиваемых областей с интеркристаллитным разрушением скопления фрагментированных зерен WC (рис. 3, б). Поверхности трения после высоких скоростей скольже-

ния характеризовались более вязким поведением, когда можно было наблюдать скопление материала на краях отпечатка инденитора, возникающее в результате пластического течения (рис. 3, в, з).

На рис. 4 представлены зависимости изменения значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученных после инденитрования от поверхности трения вглубь материала. Пунктирные линии на рис. 4 обозначают средние значения микротвердости, присущие композитам до испытаний на трение. Видно, что в композите WC – 80Г4 значения микротвердости вблизи поверхности трения заметно выше, чем в объеме материала (рис. 4, а – в). По мере удаления от поверхности трения вглубь материала значения микротвердости постепенно уменьшаются и на глубине 100 – 200 мкм восстанавливаются до исходных значений, характерных для объема материала, не подвергнутого воздействию трения. В композите WC – 80Г20, напротив, наблюдается уменьшение микротвердости приповерхностного слоя (рис. 4, з – е).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные трибологические исследования показали, что коэффициент трения композитов WC – 80Г4

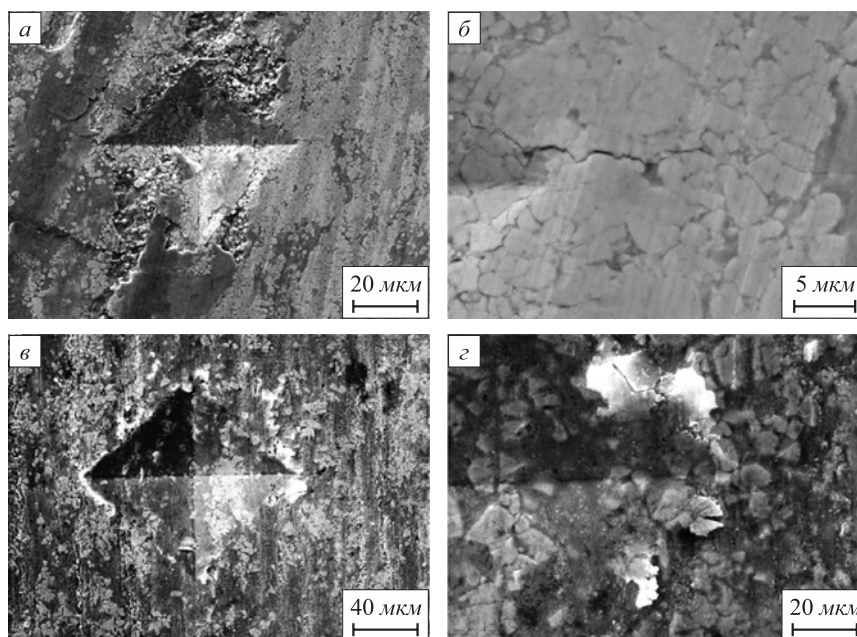


Рис. 3. Изображения РЭМ отпечатков индентора Виккера на поверхности трения композита WC – 80Г4: после трения при скорости 20 м/с (а, б); после трения при скорости 37 м/с (в, г)

Fig. 3. SEM images of the Vickers indenter impressions on friction surface of WC – 80G4 composite: а, б – after friction at 20 m/s; в, г – after friction at 37 m/s

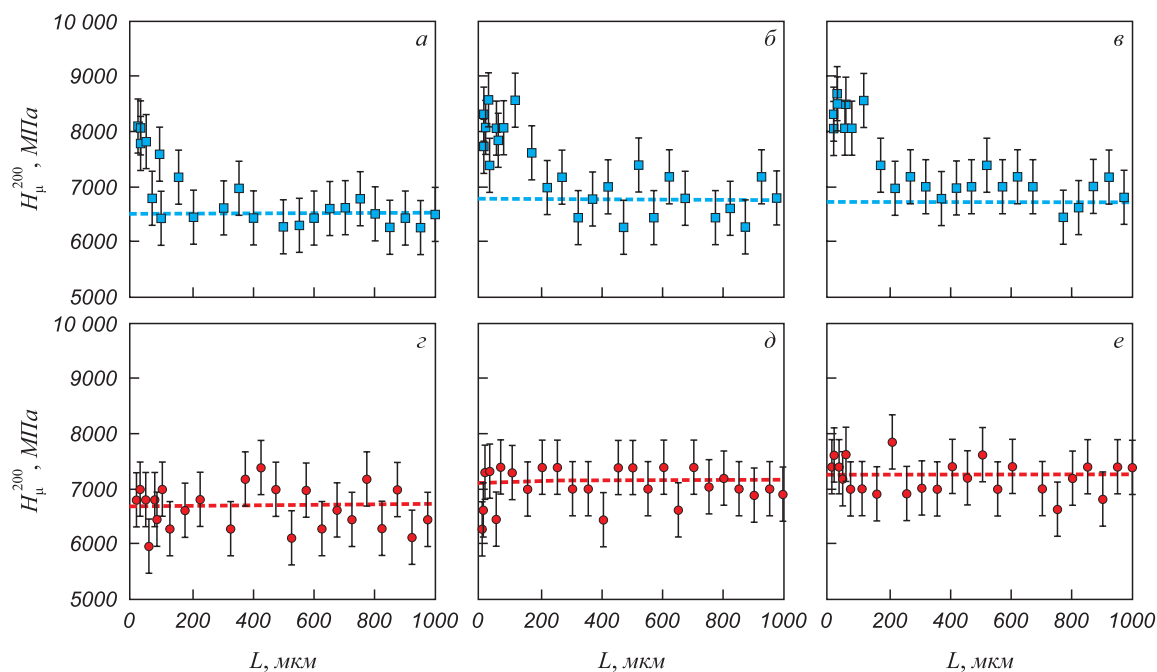


Рис. 4. Изменение микротвердости H_{μ}^{200} композитов WC – 80Г4 (а – в) и WC – 80Г20 (г – е) от поверхности трения в глубину образцов после испытания на трение при скорости скольжения: 10 м/с (а, в); 20 м/с (б, д); 37 м/с (в, е)

Fig. 4. Change of microhardness H_{μ}^{200} of composites WC – 80G4 (а – в) and WC – 80G20 (г – е) from the friction surface to the samples depth after friction test a sliding speed: 10 m/s (а, в); 20 m/s (б, д); 37 m/s (в, г)

и WC – 80Г20 при скорости скольжения 37 м/с опускался до очень низких значений, приблизительно 0,08 – 0,07 (см. рис. 1, б). Такое поведение логично связать с эффектом трибологической адаптации, связанного с трибохимическим образованием самовосстанов-

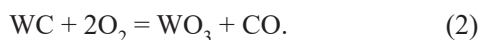
ливающегося приповерхностного защитного слоя. Он состоит из мелких фрагментов WC и продуктов износа, имеющих в составе *in situ* синтезированный в процессе высокоскоростного скольжения сложный оксид $FeWO_4$ (см. рис. 2), который способен выступать в роли твер-

дой смазки за счет наличия кристаллографических плоскостей легкого скольжения [6, 10, 11].

Рассматриваемые композиты интенсивно нагреваются во время скольжения со скоростью 37 м/с, так что температуры фрикционного контакта могут быть близки к температуре плавления стали [11]. Такая термическая пластификация способствует переносу компонентов быстрорежущей стали с контртела на изнашиваемую поверхность композитов, а также преимущественному выходу компонентов стальной матрицы композитов из объема. Все эти компоненты могут смешиваться и окисляться по реакции [11]



Фрагментация зерен WC на изнашиваемой поверхности композитов приводит к формированию дисперсных частиц, которые легко окисляются до WO_3 , начиная приблизительно с 800 °C [12]:



Положительный эффект такого окисления заключается в том, что создаются условия для синтеза вольфрамата железа из оксидов железа (1) и WO_3 (2), начиная приблизительно с 600 °C [13, 14]:



Измерение значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20 от поверхности трения вглубь материала позволило установить факт упрочнения приповерхностных областей композитов WC – 80Г4 (рис. 4, а – в) и, напротив, разупрочнения WC – 80Г20 (рис. 4, г – е). Ранее было показано [15], что композит WC – 80Г4 имеет меньшую скорость изнашивания при скольжении в диапазоне скоростей 1 – 4 м/с по сравнению с WC – 80Г20. Это различие связано с тем, что WC – 80Г4 имел метастабильную двухфазную ($\gamma + \alpha'$) матрицу, которая подвергалась деформационно-индуцированному $\gamma \rightarrow \alpha'$ фазовому превращению и наклепу. Такое предположение может быть верным только в случае малого фрикционного нагрева, в то время как высокоскоростное скольжение выделяет гораздо больше тепла, поэтому фазовое превращение $\alpha' \rightarrow \gamma$ становится более реальным. В этих условиях двухфазная матрица WC – 80Г4 будет демонстрировать более высокое сопротивление пластической деформации и, следовательно, более эффективно удерживать карбидные зерна до момента полного $\alpha' \rightarrow \gamma$ фазового превращения. Однако к этому времени матрица γ -фазы композита WC – 80Г20 будет термически размягчена и не сможет эффективно удерживать зерна WC.

Таким образом, в условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности структурно-фазовое состояние подложки композитов

WC – (Fe – Mn – C), на которой формируется этот вязкий защитный трибослой, оказывается очень важным фактором. Именно двухфазная ($\gamma + \alpha'$) стальная матрица обеспечивает в условиях сильного фрикционного нагрева условия для эффективного формирования гетерофазного композиционного слоя, понижающего коэффициент трения (см. рис. 1, б, рис. 2, в) и обладающего высоким сопротивлением разрушению при вдавливании (см. рис. 2, в, г).

Результаты исследования можно использовать при разработке различных самосмазывающихся гибридных композитов для работы в условиях высокотемпературных фрикционных контактов при высокоскоростном скольжении в гибридных парах трения (со стальными контртелами). Несмотря на проявление эффекта самосмазывания, уровень интенсивности изнашивания WC – 80Г4 и WC – 80Г20, зафиксированный в настоящем исследовании, недостаточно высок. Как показали сравнения, выполненные в работе [11], при высоких скоростях скольжения композиты WC – 80Г4 и WC – 80Г20 сильно проигрывают керамическим композитам на основе диоксида циркония и диборида циркония. Очевидно, для того, чтобы найденный эффект самосмазывания и самозалечивания воплотить в эффективно действующих гибридных парах трения (в паре со сталью), необходимо часть стальной связки заменить на подходящую по свойствам керамическую часть. Керамика на основе диоксида циркония, армированная оксидом алюминия, может быть хорошим кандидатом для замены части стальной связки композитов, изученных в настоящей работе, поскольку все компоненты, такие как WC, ZrO_2 , Al_2O_3 и сталь, могут быть объединены в объемный композит [16 – 19]. Химические элементы и фазы, входящие в состав таких гибридных композитов, позволят им проявлять в процессе скольжения эффекты самосмазывания и самозалечивания за счет происходящих трибохимических окислительных реакций с образованием квазивязких трибослоев с низким напряжением на сдвиг. Это приводит к уменьшенным значениям коэффициента трения, высокой износостойкости и повышенной толерантности материала к возникающим при износе дефектам [20].

Выводы

Установлено, что увеличение скорости скольжения с 10 до 37 м/с при трении композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20 по стальному контртелу приводит к увеличению интенсивности изнашивания и снижению коэффициента трения таким образом, что при фиксированных скоростях скольжения значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения композита WC – 80Г20 всегда выше по сравнению с WC – 80Г4.

Количество сложного оксида FeWO_4 , образовавшегося при трибоокислении изнашиваемой поверхности композитов, увеличивалось со скоростью скольжения

и было прямо пропорционально значениям интенсивности изнашивания и обратно пропорционально значениям коэффициента трения. При фиксированных скоростях скольжения трибоокисление WC – 80Г4 приводит к образованию на поверхности трения большего количества $FeWO_4$, по сравнению с композитом WC – 80Г20.

Измерение значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученные после индентирования от поверхности трения вглубь материала, зафиксировало факт упрочнения приповерхностных областей композитов WC – 80Г4 и, напротив, разупрочнения в случае WC – 80Г20.

Показано, что в условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности структурно-фазовое состояние подложки композитов WC – (Fe–Mn–C), на которой формируется вязкий защитный трибослой, оказывается очень важным фактором. Именно эффект подповерхностного упрочнения, индуцированного высокоскоростным скольжением композитов WC – (Fe–Mn–C) с двухфазной ($\gamma + \alpha'$) стальной матрицей, обеспечил условия для эффективного формирования достаточного количества сложного оксида $FeWO_4$ на изнашиваемой поверхности, понижающего коэффициент трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Kübarssepp J., Juhani K. Cermets with Fe-alloy binder: A review // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020. Vol. 92. Article 105290. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105290>
- Zhang X., Yang F., Zeng C., Ma W., Guo Z. Fabrication and properties of TiC-high manganese steel cermet processed by 3D gel printing // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. No. 25. P. 19709–19722. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06563-0>
- Li G., Jia J., Lyu Y., Zhao J., Lu J., Li Y., Luo F. Effect of Mo addition mode on the microstructure and mechanical properties of TiC–high Mn steel cermets // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. No. 5. P. 5745–5752. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.023>
- Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N. Structures formed during the friction of a metal-ceramic composite on steel under high-velocity sliding conditions // *Technical Physics Letters*. 2009. Vol. 35. P. 107–110. <https://doi.org/10.1134/S1063785009020035>
- Kumar R., Antonov M. Self-lubricating materials for extreme temperature tribo-applications // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44. Part 6. P. 4583–4589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.824>
- Zhai W., Bai L., Zhou R., Fan X., Kang G., Liu Y., Zhou K. Recent progress on wear-resistant materials: Designs, properties, and applications // *Advanced Science*. 2021. Vol. 8. No. 11. Article 2003739. <https://doi.org/10.1002/advs.202003739>
- Torres H., Ripoll M.R., Prakash B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 63. No. 5. P. 309–340. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1410944>
- Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review // *Tribology International*. 2019. Vol. 133. P. 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.037>
- Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid lubrication at high-temperatures – A Review // *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 5. Article 1695. <https://doi.org/10.3390/ma15051695>
- Voevodin A.A., Muratore C., Aouadi S.M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: Review // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 257. P. 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.046>
- Savchenko N., Sevostyanova I., Tarasov S. Self-lubricating effect of $FeWO_4$ tribologically synthesized from WC–(Fe–Mn–C) composite during high-speed sliding against a HSS Disk // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. No. 5. Article 86. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050086>
- Basu S.N., Sarin V.K. Oxidation behavior of WC–Co // *Materials Science and Engineering: A*. 1996. Vol. 209. No. 1–2. P. 206–212. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10145-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10145-4)
- Sharma S.K., Kumar B.V.M., Kim Y.-W. Tribology of WC reinforced SiC ceramics: Influence of counterbody // *Friction*. 2019. Vol. 7. P. 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0194-2>
- Kübarssepp J., Juhani K. Cermets with Fe-alloy binder: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020, vol. 92, article 105290. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105290>
- Zhang X., Yang F., Zeng C., Ma W., Guo Z. Fabrication and properties of TiC-high manganese steel cermet processed by 3D gel printing. *Journal of Materials Science*. 2021, vol. 56, no. 25, pp. 19709–19722. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06563-0>
- Li G., Jia J., Lyu Y., Zhao J., Lu J., Li Y., Luo F. Effect of Mo addition mode on the microstructure and mechanical properties of TiC–high Mn steel cermets. *Ceramics International*. 2020, vol. 46, no. 5, pp. 5745–5752. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.023>
- Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N. Structures formed during the friction of a metal-ceramic composite on steel under high-velocity sliding conditions. *Technical Physics Letters*. 2009, vol. 35, pp. 107–110. <https://doi.org/10.1134/S1063785009020035>
- Kumar R., Antonov M. Self-lubricating materials for extreme temperature tribo-applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 44, part 6, pp. 4583–4589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.824>
- Zhai W., Bai L., Zhou R., Fan X., Kang G., Liu Y., Zhou K. Recent progress on wear-resistant materials: Designs, properties, and applications. *Advanced Science*. 2021, vol. 8, no. 11, article 2003739. <https://doi.org/10.1002/advs.202003739>
- Torres H., Ripoll M.R., Prakash B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures. *International Materials Reviews*. 2018, vol. 63, no. 5, pp. 309–340. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1410944>
- Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review. *Tribology International*. 2019, vol. 133, pp. 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.037>
- Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid lubrication at high-temperatures – A Review. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 5, article 1695. <https://doi.org/10.3390/ma15051695>
- Voevodin A.A., Muratore C., Aouadi S.M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: Review. *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 257, pp. 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.046>
- Savchenko N., Sevostyanova I., Tarasov S. Self-lubricating effect of $FeWO_4$ tribologically synthesized from WC–(Fe–Mn–C) composite during high-speed sliding against a HSS Disk. *Lubricants*. 2022, vol. 10, no. 5, article 86. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050086>
- Basu S.N., Sarin, V.K. Oxidation behavior of WC–Co. *Materials Science and Engineering: A*. 1996, vol. 209, no. 1–2, pp. 206–212. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10145-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10145-4)
- Sharma S.K., Kumar B.V.M., Kim, Y.-W. Tribology of WC reinforced SiC ceramics: Influence of counterbody. *Friction*. 2019, vol. 7, pp. 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0194-2>

14. Yang G., Liu X., Sun X., Liang E., Zhang W. Synthesis process control of low-thermal-expansion $\text{Fe}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ by suppressing the intermediate phase Fe_2WO_6 // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. No. 17. P. 22032–22035. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.274>
15. Sevostyanova I.N., Savchenko N.L., Kul'kov S.N. Structural and phase binder state and behavior during friction of WC–(Fe–Mn–C) composites // *Journal of Friction and Wear*. 2010. Vol. 31. P. 281–287. <https://doi.org/10.3103/S1068366610040069>
16. Tai W.-P., Watanabe T. Fabrication and mechanical properties of Al_2O_3 –WC–Co composites by vacuum hot pressing // *Journal of the American Ceramic Society*. 1998. Vol. 81. No. 6. P. 1673–1676. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02531.x>
17. Xia X., Li X., Li J., Zheng D. Microstructure and characterization of WC–2.8 wt % Al_2O_3 –6.8 wt % ZrO_2 composites produced by spark plasma sintering // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 12. P. 14182–14188. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.044>
18. Pedzich Z., Haberko K. Toughening mechanisms in the TZP–WC particulate composites // *Key Engineering Materials*. 1997. Vol. 132–136. P. 2076–2079. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.132-136.2076>
19. Jiang D., Van der Biest O., Vleugels J. ZrO_2 –WC nanocomposites with superior properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27. No. 2–3. P. 1247–1251. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.028>
20. Savchenko N., Sevostyanova I., Grigoriev M., Sablina T., Buyakov A., Rudmin M., Vorontsov A., Moskvichev E., Rubtsov V., Tarasov S. Self-lubricating effect of WC/Y–TZP– Al_2O_3 hybrid ceramic–matrix composites with dispersed hadfield steel particles during high-speed sliding against an HSS Disk // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. No. 7. Article 140. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070140>
14. Yang G., Liu X., Sun X., Liang E., Zhang W. Synthesis process control of low-thermal-expansion $\text{Fe}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ by suppressing the intermediate phase Fe_2WO_6 . *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 17, pp. 22032–22035. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.274>
15. Sevostyanova I.N., Savchenko N.L., Kul'kov S.N. Structural and phase binder state and behavior during friction of WC–(Fe–Mn–C) composites. *Journal of Friction and Wear*. 2010, vol. 31, pp. 281–287. <https://doi.org/10.3103/S1068366610040069>
16. Tai W.-P., Watanabe T. Fabrication and mechanical properties of Al_2O_3 –WC–Co composites by vacuum hot pressing. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998, vol. 81, no. 6, pp. 1673–1676. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02531.x>
17. Xia X., Li X., Li J., Zheng D. Microstructure and characterization of WC–2.8 wt % Al_2O_3 –6.8 wt % ZrO_2 composites produced by spark plasma sintering. *Ceramics International*. 2016, vol. 42, no. 12, pp. 14182–14188. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.044>
18. Pedzich Z., Haberko K. Toughening mechanisms in the TZP–WC particulate composites. *Key Engineering Materials*. 1997, vol. 132–136, pp. 2076–2079. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.132-136.2076>
19. Jiang D., Van der Biest O., Vleugels J. ZrO_2 –WC nanocomposites with superior properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, vol. 27, no. 2–3, pp. 1247–1251. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.028>
20. Savchenko N., Sevostyanova I., Grigoriev M., Sablina T., Buyakov A., Rudmin M., Vorontsov A., Moskvichev E., Rubtsov V., Tarasov S. Self-lubricating effect of WC/Y–TZP– Al_2O_3 hybrid ceramic–matrix composites with dispersed hadfield steel particles during high-speed sliding against an HSS Disk. *Lubricants*. 2022, vol. 10, no. 7, article 140. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070140>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Леонидович Савченко, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории контроля качества материалов и конструкций, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-8254-5853

E-mail: savnick@ispms.ru

Ирина Николаевна Севостьянова, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-6706-6512

E-mail: sevir@ispms.ru

Сергей Юльевич Тарасов, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0003-0702-7639

E-mail: tsy@ispms.ru

Nikolai L. Savchenko, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory for Quality Control of Materials and Structures, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8254-5853

E-mail: savnick@ispms.ru

Irina N. Sevost'anova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Physical Mesomechanics and Non-Destructive Testing, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-6706-6512

E-mail: sevir@ispms.ru

Sergei Yu. Tarasov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Physics of Surface Hardening, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0003-0702-7639

E-mail: tsy@ispms.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. Л. Савченко – написание текста рукописи, получение и анализ данных, обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.

И. Н. Севостьянова – получение, анализ данных, доработка текста.

С. Ю. Тарасов – научное руководство, формирование основной концепции, определение цели и задачи исследования.

N. L. Savchenko – writing the text, data obtaining and analysis, reviewing publications on the article topic.

I. N. Sevost'anova – data obtaining and analysis, revision of the text.

S. Yu. Tarasov – scientific guidance, formation of the basic concept, goals and objectives of the study.

Поступила в редакцию 24.02.2022

После доработки 20.04.2022

Принята к публикации 26.08.2022

Received 24.02.2022

Revised 20.04.2022

Accepted 26.08.2022