

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 620.178.16:620.181:620.187:621.791

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.010

САМОСМАЗЫВАЮЩИЙСЯ ГИБРИДНЫЙ КОМПОЗИТ WC/Y-TZP-AL₂O₃ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМИ ЧАСТИЦАМИ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА

Михаил Владимирович Григорьев¹, Анастасия Алексеевна Ахмадиева²,
Виктория Денисовна Мирошкина³, Владислав Сергеевич Данько⁴,
Николай Леонидович Савченко⁵

^{1,2,3,4,5}Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

¹mygrigoriev@yandex.ru ORCID: 0009-0009-4214-0312

²nas99.9@yandex.ru ORCID: 0000-0001-8034-963X

³mir.vika28.02@gmail.com ORCID: 0009-0008-9504-8344

⁴danko0572@yandex.ru ORCID: 0009-0005-4549-3480

⁵savnick1965@yandex.ru ORCID: 0000-0001-8254-5853

Аннотация. Гибридные композиты с керамической матрицей WC/Y-TZP-AL₂O₃ и дисперсными частицами стали Гадфильда были спечены, а затем испытаны при скоростях скольжения в диапазоне 7–37 м/с и контактном давлении 5 МПа. Использование кратковременного (10 мин) и низкотемпературного (1350 °C) спекания под давлением позволило получить композит, состоящий из зерен WC микронного размера, и керамических зерен из частично стабилизированного окисью иттрия поликристаллического тетрагонального диоксида циркония и оксида алюминия (Y-TZP-AL₂O₃) субмикронного размера, и равномерно распределенных зерен стали Гадфильда. Такая микроструктура обеспечила новые гибридные характеристики, сочетающие высокие значения твердости (~14.8 ГПа) и вязкости разрушения (~11 МПа×м^{1/2}) с эффективной трибохимической адаптацией композита в условиях высокоскоростного скольжения по стали. Композиты продемонстрировали низкий коэффициент трения и высокую износостойкость, за счет in-situ механохимического образования вольфраматов железа FeWO₄ и Fe₂WO₆ на поверхностях трения. Эти сложные оксиды включались в структуры подповерхностных областей, что обеспечивало эффект самосмазывания и самовосстановления при высокоскоростном скольжении.

Ключевые слова: гибридный композит, сталь Гадфильда, трибология, адаптация, самосмазывание, вольфрамат железа.

Благодарности: Результаты были получены в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0010.

Для цитирования: Григорьев М.В., Ахмадиева А.А., Мирошкина В.Д., Данько В.С., Савченко Н.Л. Самосмазывающийся гибридный композит WC/Y-TZP-AL₂O₃ с диспергированными частицами стали Гадфильда // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 377-384. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.010.

Original article

SELF-LUBRICATING WC/Y-TZP- Al_2O_3 HYBRID COMPOSITE WITH DISPERSED HADFIELD STEEL PARTICLESMikhail V. Grigoriev¹, Anastasia A. Akhmadieva², Viktoria D. Miroshkina³, Vladislav S. Danko⁴, Nikolai L. Savchenko⁵^{1,2,3,4,5}National Research Tomsk State University, 36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia¹mvgrigoriev@yandex.ru ORCID: 0009-0009-4214-0312²nas99.9@yandex.ru ORCID: 0000-0001-8034-963X³mir.vika28.02@gmail.com ORCID: 0009-0008-9504-8344⁴danko0572@yandex.ru ORCID: 0009-0005-4549-3480⁵savnick1965@yandex.ru ORCID: 0000-0001-8254-5853

Abstract. Hybrid composites with a WC/Y-TZP- Al_2O_3 ceramic matrix and dispersed Hadfield steel particles were sintered and then tested at sliding velocities in the range of 7–37 m/s and a contact pressure of 5 MPa. The use of short-term (10 min) and low-temperature (1350 °C) sintering under pressure made it possible to obtain a composite consisting of micron-sized WC grains and submicron-sized ceramic grains of partially yttria-stabilized polycrystalline tetragonal zirconia and alumina (Y-TZP- Al_2O_3) and uniformly distributed Hadfield steel grains. This microstructure provided new hybrid properties, combining high hardness (~14.8 GPa) and fracture toughness (~11 MPa $\times\text{m}^{1/2}$) with effective tribochemical adaptation of the composite under high-speed sliding conditions on steel. The composites demonstrated a low coefficient of friction and high wear resistance due to the in-situ mechanochemical formation of iron tungstates FeWO_4 and Fe_2WO_6 on the friction surfaces. These complex oxides were incorporated into the subsurface structures, providing self-lubrication and self-healing properties during high-speed sliding.

Keywords: hybrid composite, Hadfield steel, tribology, adaptation, self-lubrication, iron tungstate.

Acknowledgments: This work was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (State assignment No. FSWM-2025-0010).

For citation: Grigoriev M.V., Akhmadieva A.A., Miroshkina V.D., Danko V.S. & Savchenko N.L. (2026).

Self-lubricating WC/Y-TZP- Al_2O_3 hybrid composite with dispersed Hadfield steel particles. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 377-384 (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.010.

Введение

Существует немало технологических применений, в которых взаимодействие двух твердых поверхностей, контактирующих друг с другом происходит при высоких температурах [1–3]. Кроме того, постоянно растущий спрос на компактные, легкие и высокопроизводительные машины привел к резкому увеличению плотности передаваемой энергии механическими системами. Поэтому функционирование трибологических интерфейсов движущихся деталей машин в таких системах происходит все чаще и чаще в жестких условиях контакта, в том числе, с высокими температурами, главным образом из-за фрикционного нагрева. В трибологии «высокая температура» может быть определена как температура, когда традиционные смазочные материалы, такие как масла и смазки, не могут использоваться (обычно выше 300 °C), поскольку они быстро разлагаются и

теряют свою смазочную эффективность. Аэрокосмическая, металлообрабатывающая и энергетическая промышленность – это технологические применения, в которых трибологические контакты работают при чрезвычайно высоких температурах, иногда выше 900 °C [4, 5]. Существенными эффектами, вызванными работой трибологических интерфейсов при повышенных температурах, являются повышенная скорость трибохимических реакций (главным образом реакций окисления). В последнее десятилетие наблюдается интерес к получению и изучению керамических материалов, способных демонстрировать механизмы адаптации к внешним факторам, таким как механическая нагрузка, тепло, трение и т.д. [6]. Известно, что существует значительный потенциал для разработки самовосстанавливающихся и самосмазывающихся керамических материалов для современных трибологических применений. Концепция структурной адаптивности при трении

скольжения была разработана Костецким [7]. В настоящее время эта концепция может быть переформулирована как часть концепции интеллектуальных материалов, в которых механикохимическое взаимодействие и подповерхностная деформация при скольжении в условиях сильного фрикционного нагрева приводят к образованию несущего трибологического слоя, способного к самовосстановлению и самосмазыванию поверхности трения и приповерхностных областей.

В данной статье представлено фундаментальное исследование, связанное с получением и изучением механических и трибологических свойств новых антифрикционных гибридных композитов WC/Y-TZP-Al₂O₃/сталь Гадфильда с повышенной адаптационной способностью в условиях экстремального трения за счет трибохимического развития контактной поверхности с образованием легко сдвигающихся твердых оксидов.

Материалы и методы

В данной работе для приготовления композиции WC/Y-TZP-Al₂O₃/сталь Гадфильда использовали исходные порошки, такие как порошок стали Гадфильда (Тулачермет, Россия) с размером частиц ~40 мкм; порошок WC (Узбекский завод тугоплавких и жаропрочных металлов, г. Чирчик, Узбекистан) с размером частиц ~35 мкм; наноразмерная порошковая смесь оксидов (Сибирский химический завод, Северск, Россия), состоящая из 76 масс. % ZrO₂ + 20 масс. % Al₂O₃ + 4 масс. % Y₂O₃ (Y-TZP-Al₂O₃).

Соотношение компонентов в порошковой смеси для приготовления композита WC/Y-TZP-Al₂O₃/сталь Гадфильда составило 10 об. % / 65 об. % / 25 об. %, соответственно. Исходную порошковую смесь смешивали с этиловым спиртом и затем обрабатывали с помощью планетарной шаровой мельницы. Затем этиловый спирт выпаривали из смеси перед холодным прессованием высушенных исходных порошков при 8,5 МПа. Окончательную консолидацию проводили методом спекания под давлением в среде защитного газа при температуре 1350 °C в течение 20 мин. Образцы после спекания, имели плотность, равную ~98 % от теоретической плотности.

Трибологические испытания проводились при номинальном контактном давлении 5 МПа

в диапазоне скоростей 7–37 м/с (7 м/с, 10 м/с, 20 м/с, 37 м/с) при температуре окружающей среды около 25 °C и относительной влажности 40–50 %. Интенсивность изнашивания оценивали путем измерения высоты образца до и после испытания, а затем потерю объема (мм³), относили к длине пути скольжения (м).

Поверхности трения и подповерхностные трибослой композитов исследовались с использованием рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновский дифрактометр ДРОН-8Н) с CuKα излучением и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Carl Zeiss LEO EVO 50 с приставкой микрорентгеноспектрального анализа (МРСА).

Результаты и обсуждение

Рентгенофазовый анализ показал, что все образцы после спекания содержали WC, γ-железо и t-ZrO₂. Пиков оксида алюминия на рентгенограммах не было видно.

Изображения, полученные с помощью растрового электронного микроскопа в режиме обратно-отраженных электронов полированных поверхностей спеченных образцов, продемонстрировали наличие ярко-белых агломератов зерен WC, средние размеры которых составляли ~100 мкм (рисунок 1а, в, д). Контраст в обратно-отраженных электронах соответствовал распределению других компонентов, таких как керамика и сталь Гадфильда, наряду с агломератами зерен WC. Карты распределений элементов, полученные с помощью энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на спеченных образцах, позволили установить, что сталь Гадфильда находится преимущественно в межзеренных пространствах агломератов WC. Керамические компоненты ZrO₂ и Al₂O₃ размером 0,1–0,3 мкм, выглядят как образования со светло-серым и темно-серым контрастом соответственно (рисунок 1). Кроме того, присутствуют сферические эвтектические зерна с внутренними структурными компонентами размером

50–100 нм т.е. практически такие же, как в исходных порошках Y-TZP-Al₂O₃. Образцы характеризовались высокими значениями твердости и вязкостью разрушения, ~14.8 ГПа и ~11 МПа×м^{1/2} соответственно

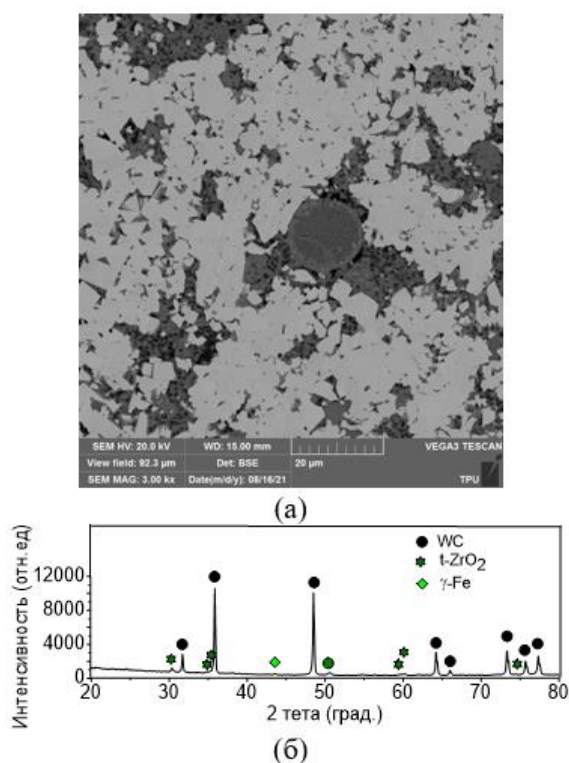
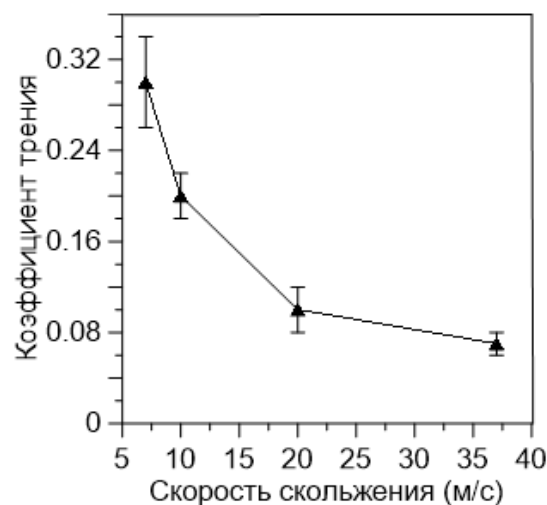


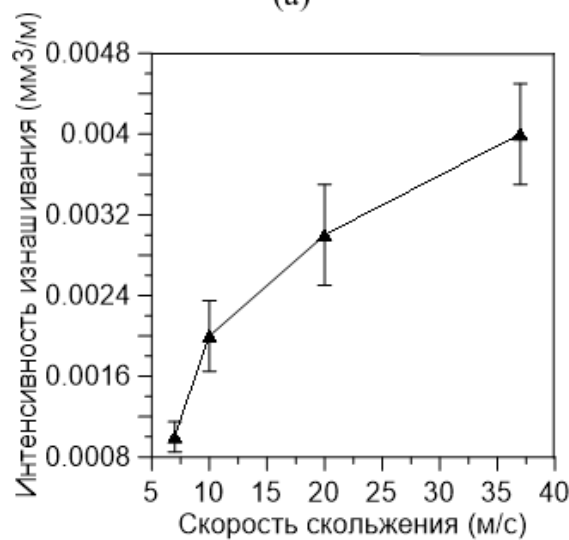
Рис. 1. (а) Изображение РЭМ микроструктуры спеченного композита. (б) Рентгеновская дифрактограмма, полученная с полированной поверхности спеченного композита.

Fig. 1. (a) SEM image of the sintered composite microstructure. (b) X-ray diffraction pattern obtained from the polished surface of the sintered composite.

Трибологические испытания позволили получить зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от скорости скольжения композита, чтобы охарактеризовать их антифрикционные свойства. С ростом скорости скольжения от 7 м/с до 37 м/с значения коэффициента трения уменьшались с 0.3 до 0.07 (рисунок 2а), а интенсивности изнашивания увеличивались от 0.0001 мм³/м до 0.004 мм³/м (рисунок 2б).



(а)



(б)

Рис. 2. Зависимости коэффициента трения (а) и интенсивности изнашивания (б) от скорости скольжения для образцов WC/Y-TZP-Al₂O₃ при трении о поверхность диска из литой быстрорежущей стали

Fig. 2. Dependences of the friction coefficient (a) and wear rate (b) on the sliding speed for WC/Y-TZP-Al₂O₃ specimens sliding against a cast high-speed steel disk surface

Наряду с обнаружением WC и t-ZrO₂ рентгеноструктурный анализ поверхностей трения позволил обнаружить присутствие сложных оксидов FeWO₄ и Fe₂WO₆ (рисунок 3).

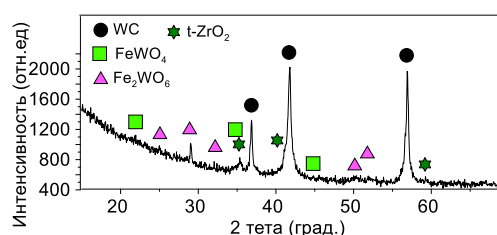


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы поверхности трения образцов WC/Y-TZP-Al₂O₃ после трения о поверхность диска из литой быстрорежущей стали при скорости скольжения 37 м/с.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the friction surface of WC/Y-TZP-Al₂O₃ specimens after sliding against a cast high-speed steel disk surface at a sliding speed of 37 m/s.

Скольжение со скоростью 37 м/с привело к образованию на поверхностях трения образцов трибологического слоя (рисунок 4).

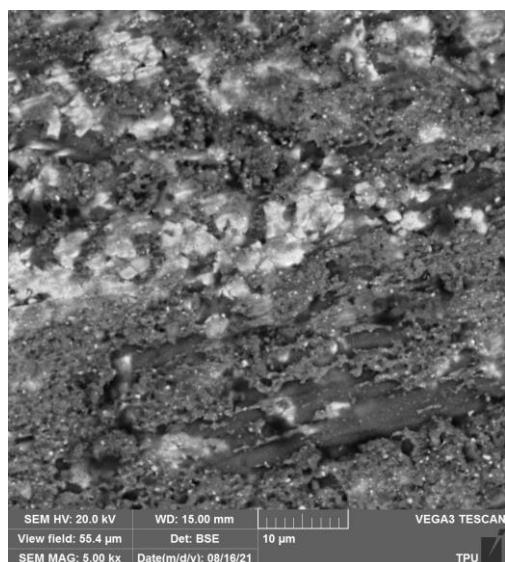


Рис. 4. Изображения РЭМ поверхности трения образцов WC/Y-TZP-Al₂O₃ после трения о поверхность диска из литой быстрорежущей стали при скорости скольжения 37 м/с

Fig. 4. SEM images of the friction surface of WC/Y-TZP-Al₂O₃ specimens after sliding against a cast high-speed steel disk surface at a sliding speed of 37 m/s

Исследование РЭМ подповерхностных областей позволило охарактеризовать трибологический слой (TL), образующийся на поверхности трения композита в процессе высокоскоростного скольжения. Наиболее четко трибологический слой наблюдается на образцах, испы-

танных при скорости скольжения 37 м/с (рисунок 5), ниже которого находилась переходная зона (TrZ), с менее интенсивным деформационным воздействием, но где имели место разрушение и окисление WC и керамических зерен.

Трибологический слой (TL) микроструктурно представлен двумя различными компонентами, такими как однородные темно-серые области (рисунок 5, области 3, 4) и светло-серые области, состоящие из ярких наноразмерных фрагментов (рисунок 5, области 1, 2). Данные МРСА показывают, что эти области обогащены вольфрамом, железом, хромом, марганцем и кислородом. Различие между темно-серыми и светло-серыми участками заключается в том, что первые содержат больше ванадия, хрома и вольфрама и меньше марганца по сравнению с составом светло-серых областей (рисунок 5), т. е. темно-серые области обогащены окисленными элементами, перенесенными из стального диска.

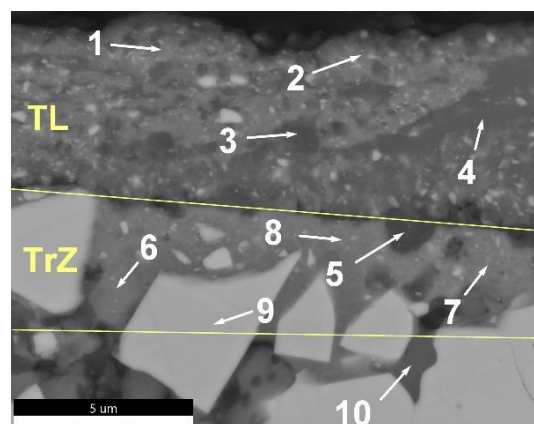
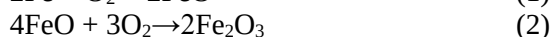


Рис. 5. Изображения РЭМ подповерхностной области образцов WC/Y-TZP-Al₂O₃ после трения о поверхность диска из литой быстрорежущей стали при скорости скольжения 37 м/с. Цифры обозначают зоны зондирования, для которых были определены концентрации химических элементов

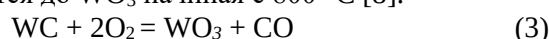
Fig. 5. SEM images of the subsurface region of WC/Y-TZP-Al₂O₃ specimens after sliding against a cast high-speed steel disk surface at a sliding speed of 37 m/s. The numbers indicate the probing zones for which the chemical element concentrations were determined

Рассмотренное выше трибологическое поведение можно представить следующим образом. Композиты интенсивно нагреваются во время скольжения со скоростью 37 м/с, так что

температура под поверхностью может быть близка к температуре плавления стали Гадфильда. Такая термическая пластификация облегчает перенос компонентов из быстрорежущей стали с контртела на композит, а также выделение компонентов стали Гадфильда из основной массы композита. Все эти компоненты могут смешиваться и окисляться в соответствии со следующими реакциями:



Подповерхностная фрагментация зерен WC дает мелкие фрагменты, которые легко окисляются до WO_3 начиная с 800°C [8]:



Положительный эффект такого окисления заключается в создании условий для синтеза самосмазывающихся вольфраматов железа из оксидов железа (реакции (1) и (2)) и WO_3 (реакция (3)) начиная с $\sim 600^\circ\text{C}$ согласно следующим реакциям [9, 10]:



На рисунке 5 отчетливо видны атрибуты квазивязкого характера течения трибологического слоя. Во время такого движения не образовывались пустоты, и, наоборот, даже наблюдалось некоторое самовосстановление, когда эта квазивязкая масса заполняла межфрагментарные пространства и трещины. Такой эффект аналогичен эффекту, продемонстрированному при высокоскоростном скольжении по сверхвысокотемпературной керамике ZrB_2 –20 об. % SiC с помощью in-situ образованного расплавленного боросиликатного стекла [11, 12].

Приведенные выше результаты позволяют утверждать, что гибридный композит WC/Y–TZP– Al_2O_3 с диспергированными частицами стали Гадфильда, продемонстрировал структурную адаптацию к высокоскоростному скольжению.

Полученные результаты открывают новые перспективы создания большого семейства функционально-улучшенных композитов для задач экстремального трения. Именно гибридные композиты, сочетающие за счет выверенного структурного дизайна: (1) способность противостоять высокотемпературному воздействию в сочетании со значительными сдвиговыми нагрузками и (2) имеющие в составе такие химические элементы и фазы, которые позволяют им проявлять в процессе скольжения эффекты самосмазывания и самозалечивания за

счет происходящих трибохимических окислительных реакций с образованием квазивязких трибослоев с низким напряжением на сдвиг будут демонстрировать свойства антифрикционности, высокую износостойкость и одновременно повышенную устойчивость к возникающим при износе дефектам. Выполнение перечисленных факторов улучшения структуры позволит использовать такие новые гибридные композиты в качестве перспективных антифрикционных материалов для работы в ответственных узлах трения.

Заключение

После кратковременного (10 мин) и низкотемпературного (1350°C) спекания под давлением был получен композит WC/Y–TZP– Al_2O_3 с диспергированными частицами стали Гадфильда, с высокими значениями твердости (~ 14.8 ГПа) и вязкости разрушения ($\sim 11 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$).

В условиях высокоскоростного трения при скоростях скольжения до 37 м/с такие композиты демонстрировали приемлемую износостойкость с одновременно сверхнизким значением коэффициента трения ($\sim 0,07$). В процессе скольжения композиты WC/Y–TZP– Al_2O_3 с диспергированными частицами стали Гадфильда проявляли эффекты самосмазывания и самовосстановления за счет трибохимического образования квазивязких трибологических слоёв, которые служили в качестве защитного покрытия для нижележащих зерен композитов от прямого механического дробления. Такой синергетический адаптационный эффект был достигнут за счет in-situ синтеза вольфраматов железа FeWO_4 и Fe_2WO_6 , способных капсулировать частицы износа, заполнять пустоты и каверны, формирующиеся в процессе изнашивания и одновременно понижать коэффициент трения за счет квазивязкого поведения и кристаллографически легкого сдвига формирующихся in-situ сложных оксидов.

Список литературы

1. Kumar R., Antonov M. Self-lubricating materials for extreme temperature tribo-applications. // Materials Today Proceedings. - 2020. - Vol. 44. - P. 4583-4589. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.824.

2. 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. - P. 2003739. DOI: 10.1002/advs.202003739.

3. Torres H., Ripoll M.R., Prakash B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures. // *International Materials Reviews*. - 2017. - Vol. 63. - P. 309-340. DOI: 10.1080/09506608.2017.1410944

4. Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review. // *Tribology International*. - 2019. - Vol. 133. - P. 206-223. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.12.037.

5. Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid Lubrication at High-Temperatures—A Review. // *Materials*. - 2022. - Vol. 15. - P. 1695. DOI: 10.3390/ma15051695.

6. 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. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.04.046.

7. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении. // *Трение и износ*. - 1985. - Т. 6. - № 2. - С. 201-212.

8. Basu S.N., Sarin V.K. Oxidation behavior of WC-Co. // *Materials Science and Engineering: A*. - 1996. - Vol. 209. - P. 206-212. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10145-4.

9. Yang G., Liu X., Sun X., Liang E., Zhang W. Synthesis process control of low-thermal-expansion Fe₂W₃O₁₂ by suppressing the intermediate phase Fe₂WO₆. // *Ceramics International*. - 2018. - Vol. 44. - P. 22032-22035. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.08.274.

10. 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. DOI: 10.1007/s40544-017-0194-2.

11. Savchenko N.L., Mirovoy Y.A., Buyakov A.S., Burlachenko A.G., Rudmin M.A., Sevostyanova I.N., Buyakova S.P., Tarasov S.Y. Adaptation and self-healing effect of tribo-oxidizing in high-speed sliding friction on ZrB₂-SiC ceramic composite. // *Wear*. - 2020. - Vol. 446-447. - P. 203204. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203204.

12. Savchenko N.L., Mirovoy Y.A., Burlachenko A.G., Sevostyanova I.N., Buyakov

A.S., Rudmin M.A., Vorontsov A.V., Buyakova S.P., Tarasov S.Y. Subsurface multilayer evolution of ZrB₂-SiC ceramics in high-speed sliding and adhesion transfer conditions. // *Wear*. - 2021. - Vol. 482-483. - P. 203956. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203956.

Информация об авторах

Григорьев М.В. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Физико-технического факультета Томского государственного университета

Ахмадиева А.А. – младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Физико-технического факультета Томского государственного университета

Мирошкина В.Д. – младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Физико-технического факультета Томского государственного университета

Данько В.С. – лаборант лаборатории нанотехнологий металлургии Физико-технического факультета Томского государственного университета

Савченко Н.Л. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Физико-технического факультета Томского государственного университета.

References

1. Kumar R., Antonov M. Self-lubricating materials for extreme temperature tribo-applications. // *Materials Today Proceedings*. - 2020. - Vol. 44. - P. 4583-4589. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.824.

2. 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. - P. 2003739. DOI: 10.1002/advs.202003739.

3. Torres H., Ripoll M.R., Prakash B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures. // *International Materials Reviews*. - 2017. - Vol. 63. - P. 309-340. DOI: 10.1080/09506608.2017.1410944

4. Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review. // *Tribology International*. - 2019. - Vol. 133. - P. 206-223. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.12.037.

5. Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid Lubrication at High-Temperatures—A Review. // *Materials*. - 2022. - Vol. 15. - P. 1695. DOI: 10.3390/ma15051695.
6. 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. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.04.046.
7. Kostetsky B.I. Strukturno-energeticheskaya prisposablivayemost' materialov pri trenii. // *Treniye i Iznos*. - 1985. - Vol. 6. - No. 2. - P. 201–212. (In Russ.)
8. Basu S.N., Sarin V.K. Oxidation behavior of WC-Co. // *Materials Science and Engineering: A*. - 1996. - Vol. 209. - P. 206-212. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10145-4.
9. 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. - P. 22032-22035. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.08.274.
10. 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. DOI: 10.1007/s40544-017-0194-2.
11. Savchenko N.L., Mirovoy Y.A., Buyakov A.S., Burlachenko A.G., Rudmin M.A., Sevostyanova I.N., Buyakova S.P., Tarasov S.Y. Adaptation and self-healing effect of tribo-oxidizing in high-speed sliding friction on ZrB₂-SiC ceramic composite. // *Wear*. - 2020. - Vol. 446-447. - P. 203204. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203204.
12. Savchenko N.L., Mirovoy Y.A., Burlachenko A.G., Sevostyanova I.N., Buyakov A.S., Rudmin M.A., Vorontsov A.V., Buyakova S.P., Tarasov S.Y. Subsurface multilayer evolution of ZrB₂-SiC ceramics in high-speed sliding and adhesion transfer conditions. // *Wear*. - 2021. - Vol. 482-483. - P. 203956. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203956.

Information about the authors

M.V. Grigoriev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Nanotechnologies in Metallurgy, Faculty of Physics and Engineering, Tomsk State University.

A.A. Ahmadiyeva – Junior Researcher at the Laboratory of Nanotechnologies in Metallurgy, Faculty of Physics and Engineering, Tomsk State University.

V.D. Miroshkina – Junior Researcher at the Laboratory of Nanotechnologies in Metallurgy, Faculty of Physics and Engineering, Tomsk State University.

V.S. Danko – Laboratory Assistant at the Laboratory of Nanotechnologies in Metallurgy, Faculty of Physics and Engineering, Tomsk State University.

N.L. Savchenko – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Nanotechnologies in Metallurgy, Faculty of Physics and Engineering, Tomsk State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 27 May 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.