



Оригинальная статья

УДК 53.043

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-573-580

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2369>

## УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СЛОЕВ КОМПОЗИТОВ WC – (Fe – Mn – C), ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СТАЛИ

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

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

**Аннотация.** В работе изучены упругопластические свойства формирующихся трибологических слоев композитов WC–(Fe–Mn–C) с матрицами, состоящими из  $\gamma$ -железа (в составе 4 % Mn (WC – 80G4)), и из  $\gamma$  +  $\alpha'$ -железа (в составе 20 % Mn (WC – 80G20)), после трения по диску из быстрорежущей стали при контактном давлении 5 МПа и скоростях скольжения в диапазоне от 10 до 37 м/с. Установлено, что основным фактором, который определяет морфологию изношенной поверхности, является скорость скольжения. При скоростях скольжения 10 и 20 м/с формируются мелкодисперсные механически перемешанные трибослои толщиной 3 – 4 мкм. С увеличением скорости скольжения до 30 – 37 м/с толщина трибослоев достигает 10 – 15 мкм, а структура состоит из окисленных фрагментов композитов WC–(Fe–Mn–C) и сложного оксида FeWO<sub>4</sub> и не имеет резкой границы как трибослои, формирующиеся при меньших скоростях скольжения. Наибольшие значения нанотвердости (~33 ГПа) и эффективного модуля Юнга (~523 ГПа) были достигнуты в трибослое WC – 80G4 после трения при скорости скольжения 10 м/с, когда наноиндентор внедряется в агломераты фрагментированных зерен WC. Это контрастирует со свойствами трибослоев, формирующихся при скоростях скольжения выше 20 м/с. Результаты наноиндентирования показали очевидный эффект трибохимически-индуцированного размягчения в формирующемся трибослое после высокоскоростного скольжения при скорости 37 м/с. Такой слой имеет композитную микроструктуру, которая состоит из фрагментированных компонентов, сцементированных *in-situ* трибохимически образованным FeWO<sub>4</sub>, и, помимо антифрикционных свойств обладает повышенным сопротивлением разрушению при индентировании.

**Ключевые слова:** металллокерамический композит, смазка, износ, трение, фазовое превращение, микротвердость, нанотвердость, адаптация, карбид вольфрама, высокомарганцевая сталь

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

**Для цитирования:** Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Тарасов С.Ю. Упругопластические свойства трибологических слоев композитов WC–(Fe–Mn–C), формирующихся после высокоскоростного скольжения по стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 573–580. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-573-580>

Original article

## ELASTOPLASTIC PROPERTIES OF TRIBOLOGICAL LAYERS OF WC – (Fe – Mn – C) COMPOSITES FORMED AFTER HIGH-SPEED SLIDING ON STEEL

N. L. Savchenko, I. N. Sevost'yanova, 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.** In this work, the authors studied the elastoplastic properties of the formed tribological layers of WC – (Fe – Mn – C) composites with matrices consisting of  $\gamma$ -iron (containing 4 % Mn (WC – 80G20)) and  $\gamma$  +  $\alpha'$  (containing 20 % Mn (WC – 80G4)) after friction on a high-speed steel disk at contact pressure of 5 MPa and sliding speeds in the range from 10 to 37 m/s. It was established that the main factor determining the morphology of the worn surface is sliding speed. At sliding speeds of 10 and 20 m/s, finely dispersed mechanically mixed tribolayers 3 – 4  $\mu$ m thick are formed. As the sliding speed increases to 30–37 m/s, the thickness of the tribolayers reaches 10 – 15  $\mu$ m, and the structure consists of oxidized fragments of WC – (Fe – Mn – C) composites and FeWO<sub>4</sub> complex oxide and does not have a sharp boundary, like the tribolayers formed at lower sliding speeds. The highest values of nanohardness (~33 GPa) and effective Young's modulus (~523 GPa) were achieved in the WC – 80G4 tribolayer after friction at 10 m/s when the nanoindenter was embedded into agglomerates of fragmented WC grains. This contrasted with the properties of the tribolayers formed at sliding speeds above 20 m/s. The results of nanoindentation showed an obvious effect of tribochemically induced softening in the emerging tribolayer after high-speed sliding at a speed of 37 m/s. Such a layer had a composite microstructure consisting of fragmented

composite components cemented *in-situ* by tribochemically formed  $\text{FeWO}_4$  and, in addition to antifriction properties, had an increased indentation fracture resistance.

**Keywords:** ceramic-metal composite, lubrication, wear, friction, phase transformation, microhardness, nanohardness, adaptation, tungsten carbide, high-manganese steel

**Funding:** The work was performed within the framework of the state task of the Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, projects FRS-2021-0006 and FRS-2021-0009.

**For citation:** Savchenko N.L., Sevost'yanova I.N., Tarasov S.Yu. Elastoplastic properties of tribological layers of WC – (Fe – Mn – C) composites formed after high-speed sliding on steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 573–580. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-573-580>

## ВВЕДЕНИЕ

Для снижения износа и трения в высокотемпературных условиях эксплуатации необходимо использовать композиты, устойчивые к высокотемпературному трибоокислению [1 – 4]. С другой стороны, трибоокисление компонентов композита может служить механизмом адаптации с образованием окисленных механически смешанных слоев на изношенных поверхностях, которые способны защитить нижележащий материал от разрушения, деформации и адгезионного износа [5 – 8]. Среди большого разнообразия металломатричных композитов композиты со связкой в виде высокомарганцевой стали широко используются в различных областях (при добыче нефти и цемента, для разведки шахт и добычи угля) из-за их уникальных свойств [9 – 12]. В работе [12] было показано, что композиты WC – сталь с матрицами из  $\gamma$ -железа (с содержанием марганца в стали 20 % (по массе)) и  $\gamma + \alpha'$ -железа (с содержанием марганца в стали 4 % (по массе)) 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  $\text{FeWO}_4$ . Максимальный антифрикционный эффект генерируемого *in situ* оксида  $\text{FeWO}_4$  был продемонстрирован на примере композита WC – сталь с двухфазной ( $\gamma + \alpha'$ )-матрицей, содержащей 4 % Mn (по массе) при скольжении со скоростью 37 м/с, где был достигнут коэффициент трения приблизительно 0,075.

Измерение упругопластических характеристик трибослоев дает возможность более детально изучить механизмы изнашивания и режимы оптимального смазывания поверхности трения в зависимости от параметров трибологических испытаний, таких как скорость скольжения, приложенная нагрузка, окружающая среда, температура фрикционного контакта и т. д. [13 – 15]. Твердые тонкие покрытия и трибослой характеризуются микротвердостью ( $H$ ), эффективным модулем Юнга ( $E$ ) и сопротивлением разрушению при индентировании ( $E/H$ ), которые можно легко определить по кривым нагрузки и разгрузки методами наноиндентирования [16 – 19].

Настоящее исследование направлено на изучение упругопластических характеристик поверхности композитов WC – железомарганцевая сталь с матрицами

из  $\gamma$ -железа и  $\gamma + \alpha'$ -железа, демонстрирующими самосмазывающий эффект за счет трибохимически синтезируемого сложного оксида  $\text{FeWO}_4$  при высокоскоростном трении по стали.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Композиты WC – (Fe – Mn – C) получали методом пропитки пористых каркасов из карбида вольфрама смесью эвтектического состава 30 % WC – 70 % сталь Fe – Mn – C (по массе) в атмосфере аргона при температуре 1350 °C. Более подробно методика получения композитов описана в работе [20]. Общее количество углерода в матрице составляло около 0,8 % (по массе) для всех образцов. Содержание марганца в связующей фазе составляло 4 % Mn (WC – 80Г4) или 20 % Mn (WC – 80Г20). Оба композита имели один и тот же тип микроструктуры со средним размером зерна карбида  $2,7 \pm 0,5$  мкм и расстоянием между частицами карбидов  $1,2 \pm 0,2$  мкм. Остаточная пористость не превышала 0,5 %. Предел прочности при сжатии и пластичность композита WC – 80Г4 ( $\sigma_t = 4080 \pm 50$  МПа и  $\varepsilon = 7,8 \pm 0,5$ ) выше, чем у композита WC – 80Г20 ( $\sigma_t = 3500 \pm 50$  МПа и  $\varepsilon = 5,1 \pm 0,5$  %).

Трибологические испытания композитов по схеме палец – диск проводили на универсальной машине трения УМТ-1. Размер образцов составлял  $5 \times 5 \times 7$  мм. 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. Образцы композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20 продемонстрировали достаточно стабильное скольжение с умеренными амплитудами колебаний момента трения в зависимости от пройденной дистанции. Такие стабильные участки зависимости момента трения от пройденной дистанции использовали для расчета средних значений коэффициента трения для каждого эксперимента. Интенсивность изнашивания ( $W$ , мм<sup>3</sup>/м) рассчитывали как отношение объема материала, потерянного образцом в ходе испытания на трение, к длине пути скольжения.

Исходные и изношенные поверхности исследовали с помощью прибора Philips SEM-515 с приставкой для энергодисперсионного микроанализа EDAX ECON IV. По данным микроанализа состав плотных композитов WC – 80Г4 следующий: 51 % W; 46 % Fe; 3 % Mn;

состав композитов WC – 80Г20: 50 % W; 44 % Fe; 6 % Mn (ат.). Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 с излучением  $\text{Cu-K}_\alpha$ . Наноиндентирование осуществляли с применением нанотвердомера NanoIndenter G200 с индентором Берковича при нагрузках 10 и 50 мН.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рентгеноструктурный анализ поверхностей износа композиционных образцов с разным содержанием марганца в связующей фазе показал, что помимо фаз WC,  $\gamma\text{-Fe}$  и  $\alpha\text{-Fe}$  в композите WC – 80Г4 и фаз WC,  $\gamma\text{-Fe}$  в композите WC – 80Г20 наблюдается фаза  $\text{FeWO}_4$ , образовавшаяся в процессе трения. В табл. 1 представлены данные по количеству  $\text{FeWO}_4$ , полученные в результате полуколичественного анализа соответствующих отражений от изношенных поверхностей. Количество вольфрамата  $\text{FeWO}_4$ , образовавшегося при трибоокислении образцов, растет с увеличением скорости скольжения (температуры) [12]. При фиксированных скоростях скольжения на поверхности трения композита WC – 80Г4 вольфрамата железа образуется больше. При этом интенсивность изнашивания ( $W$ ) увеличивается, а коэффициент трения ( $f$ ) снижается с увеличением скорости скольжения (табл. 1). Причем при фиксированных скоростях скольжения коэффициент трения у композита WC – 80Г4 ниже, чем у WC – 80Г20. Это означает, что увеличивающееся с возрастанием скорости скольжения количество  $\text{FeWO}_4$  является одной из причин снижения трения.

После скольжения со скоростью 10 и 20 м/с изношенные поверхности обоих композитов характеризуются

наличием светлых и серых участков (рис. 1, а, область 1). По данным энергодисперсионного микроанализа (34,64 % W; 6,68 % Fe; 1,1 % Mn; 54,87 % O; 1,42 % V; 1,29 % Cr (ат.)) яркие контрастные области идентифицированы как зерна и фрагменты WC, которые агломерировались и уплотнялись, вытесняя стальную связку в процессе скольжения по стальному диску. Серые области (4,78 % W; 20,58 % Fe; 1,3 % Mn; 72,01 % O; 0,88 % V; 0,46 % Cr (ат.)) представляют собой зоны, занятые слоем переноса, которые включают в себя сильно фрагментированные зерна WC, окисленные компоненты стального контртела и стальной связки композита (рис. 1, а, область 2). После скольжения со скоростью 30 и 37 м/с на изношенных поверхностях обоих композитов формировался сплошной трибослой, состоящий из мелких фрагментов окисленных компонентов композита и стального контртела (29,47 % W; 32,06 % Fe; 1,05 % Mn; 35,04 % O; 1,32 % V; 1,06 % Cr (ат.)) (рис. 1, б, область 3).

Необходимо отметить, что если после скольжения со скоростью 10 и 20 м/с на поверхности трения наблюдаются следы хрупкого разрушения в виде выкрошенных участков и поперечных трещин (рис. 1, а), то на

Таблица 1

**Коэффициент трения и интенсивность изнашивания композитов после трения по стальному диску и количество  $\text{FeWO}_4$**

Table 1. Friction coefficient and wear rate of composites after friction on a steel disk and amount of  $\text{FeWO}_4$

| Скорость, м/с | $W$ , мм <sup>3</sup> /м | $f$   | $\text{FeWO}_4$ , % (об.) |
|---------------|--------------------------|-------|---------------------------|
| WC – 80Г4     |                          |       |                           |
| 10            | 0,0011                   | 0,145 | 10                        |
| 20            | 0,0030                   | 0,089 | 12                        |
| 30            | 0,0434                   | 0,085 | 14                        |
| 37            | 0,1229                   | 0,080 | 16                        |
| WC – 80Г20    |                          |       |                           |
| 10            | 0,0014                   | 0,160 | 4                         |
| 20            | 0,0037                   | 0,098 | 6                         |
| 30            | 0,1385                   | 0,095 | 9                         |
| 37            | 0,4246                   | 0,090 | 10                        |

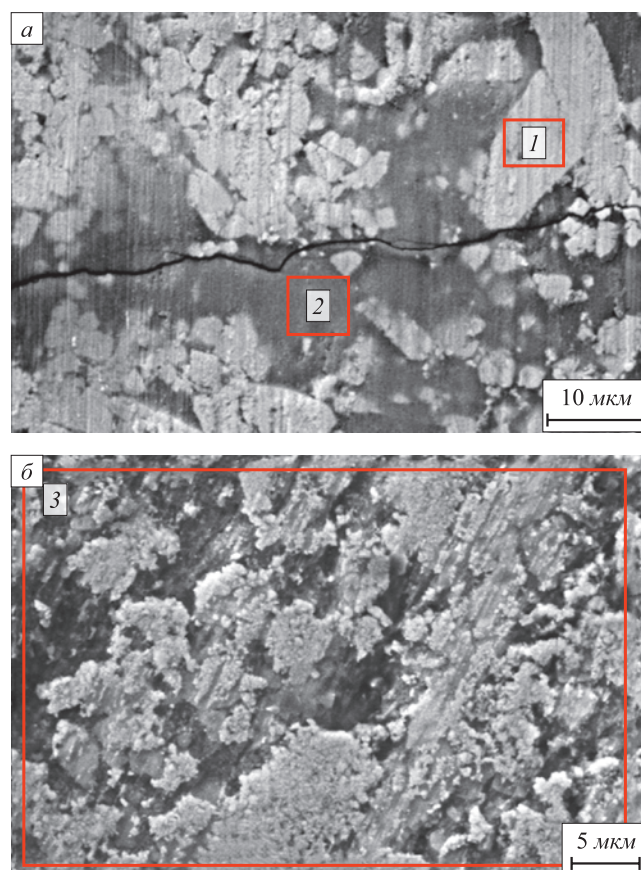


Рис. 1. Изображения РЭМ изношенных поверхностей композита WC – 80Г4 после трения при скорости скольжения 10 – 20 (а) и 30 – 37 м/с (б)

Fig. 1. SEM images of worn surfaces of WC – 80G4 composite after friction at a sliding speed of 10 – 20 m/s (a) and 30 – 37 m/s (b)

изношенных поверхностях образцов, испытанных при скоростях 30 и 37 м/с, подобные дефекты отсутствуют (рис. 1, б).

Наблюдения за подповерхностными структурами выявили следующие особенности. После скольжения со скоростью 10 и 20 м/с формируются относительно тонкие механически перемешанные трибослои толщиной 3–4 мкм (рис. 2, а, область 1), под которыми наблюдается сильная деформация зерен WC (рис. 2, а, область 2). Состав слоев: 45,63 % W; 25,97 % Fe; 2,94 % Mn; 18,52 % O; 1,94 % V; 2,23 % Cr (ат.). Зерна WC частично окислены и имеют участки с темно-серым контрастом. Увеличение скорости скольжения до 30 и 37 м/с приводит к образованию на изношенных поверхностях обоих композитов толстых трибослоев толщиной 10–15 мкм (рис. 2, б, область 3). Эти слои состоят из мелких частиц WC и Fe, сцементированных  $\text{FeWO}_4$  (12,74 % W; 9,45 % Fe; 2,06 % Mn; 68,82 % O; 4,76 % V; 2,17 % Cr), и не имеют такой резкой и четкой границы как трибослои, формирующиеся при меньших скоростях скольжения.

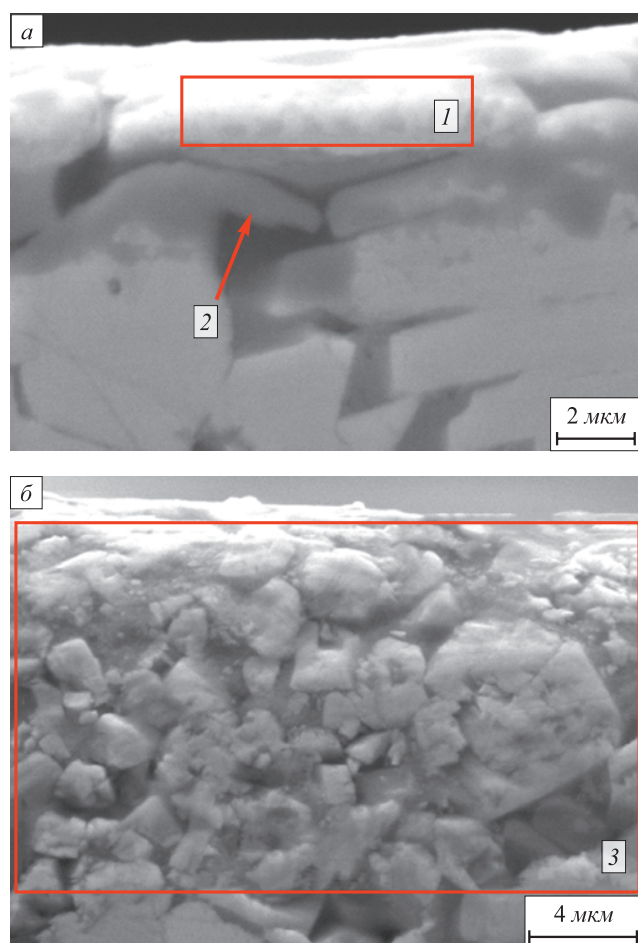


Рис. 2. Изображения РЭМ приповерхностных областей WC – 80Г4 после скольжения по стали после трения при скорости скольжения 20 (а) и 37 м/с (б)

Fig. 2. SEM images of WC – 80G4 near-surface areas after sliding on steel after friction at a sliding speed of 20 m/s (a) and 37 m/s (b)

Кривые нагрузка – глубина наноиндентирования (рис. 3) получены для определения деформационного поведения и сопротивления разрушению областей, покрытых слоем переноса, и областей, свободных от этого слоя (где  $P_{\max}$  – максимальная приложенная нагрузка;  $h_{t1}$ ,  $h_{t2}$  – остаточные глубины отпечатков после снятия нагрузки для 1 и 2 измерения соответственно;  $h_{1\max}$ ,  $h_{2\max}$  – максимальная глубина проникновения ин-

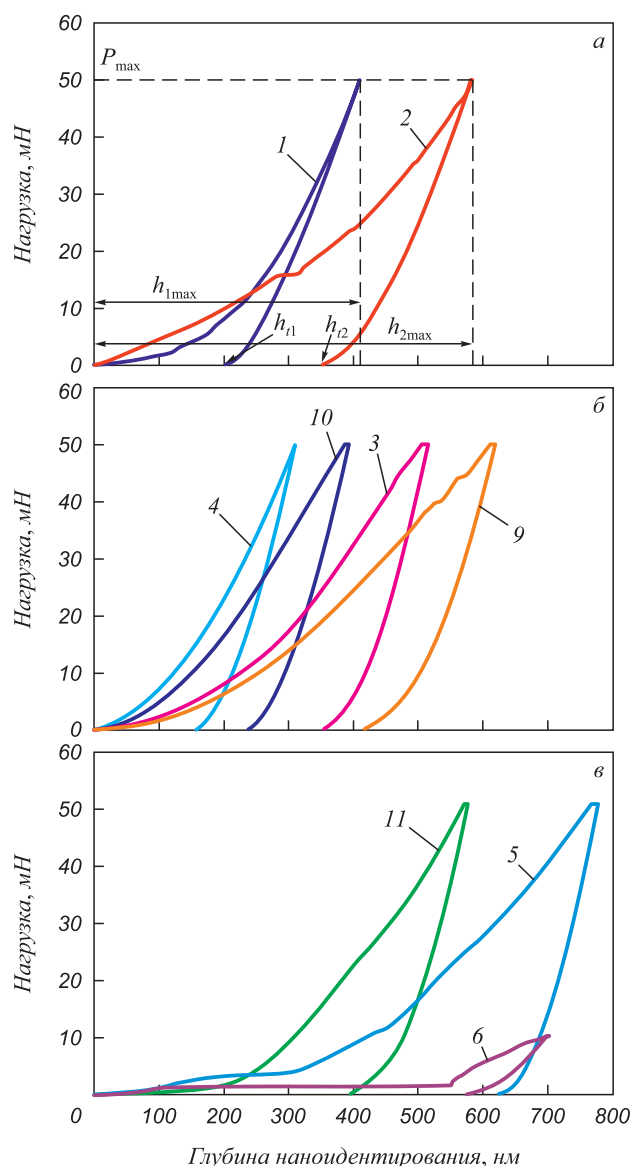


Рис. 3. Кривые нагрузка – глубина наноиндентирования, полученные при наноиндентировании поверхностей композитов WC – (Fe – Mn – C) (цифры над кривыми соответствуют номерам измерений из табл. 2)

а – полированные поверхности композита до трения;  
б и в – изношенная поверхность после скольжения со скоростью 10 и 37 м/с

Fig. 3. Curves of load – nanoindentation depth obtained during nanoindentation of the surface of WC – (Fe – Mn – C) composites (the numbers above the curves correspond to the measurement numbers from Table 2):

а – polished surfaces of the composite before friction;  
б и в – worn surface after sliding at a speed of 10 and 37 m/s

дентора в 1 и 2 измерении соответственно). Все кривые наноиндентирования демонстрировали два типичных типа поведения. Первый тип поведения характеризуется наличием одного или нескольких плато и изгибов на участке нагрузки кривой (рис. 3, а, изм. 2; рис. 3, б, изм. 9; рис. 3, в, изм. 5 и 6). Второй тип поведения характеризуется отсутствием таких плато или изгибов (рис. 3, а, изм. 1; рис. 3, б, изм. 3, 4, 10).

Влияние структуры поверхности проявлялось на максимальной глубине проникновения индентора в материал  $h_{1\max}$  и  $h_{2\max}$  (рис. 3, а), а после снятия нагрузки при наноиндентировании – на остаточной глубине отпечатков  $h_{t1}$  и  $h_{t2}$  (рис. 3, а).

В табл. 2 приведены значения эффективного модуля Юнга ( $E$ ), нанотвердости ( $H$ ), величина отношения  $E/H$ . Как известно [18, 19], отношение  $E/H$  характеризует сопротивление структуры разрушению при вдавливании и прогнозирует увеличение сопротивления разрушению при вдавливании с увеличением отношения  $E/H$ .

В исходном состоянии композиты характеризуются наличием областей с относительно низким и относительно высоким эффективным модулем Юнга и нанотвердостью (табл. 2). Примерами служат измерение 2 ( $E = 140$  ГПа,  $H = 9,4$  ГПа) и измерение 7 ( $E = 335$  ГПа,  $H = 27,9$  ГПа). При индентировании исходных композитов индентор, как правило, попадает не только в карбидное зерно, но и частично в прослойки стальной связки. Соответственно, измерение 1 (рис. 3, а) характеризует преимущественно зерна WC, а измерение 2 с плато на кривой нагрузки – преимущественно плас-

тичную стальную связку. Скольжение со скоростью 10 м/с приводит к повышению эффективного модуля Юнга и нанотвердости в белой области на поверхности трения WC – 80Г4 ( $E = 523$  ГПа,  $H = 32,9$  ГПа). Индентирование белой области на поверхности трения WC – 80Г20 не показало такого прироста нанотвердости и эффективного модуля Юнга.

Серая область на поверхности трения WC – 80Г4 и WC – 80Г20 характеризуется сравнительно низкими нанотвердостью и эффективным модулем Юнга, но повышенным сопротивлением разрушению при вдавливании, судя по величине отношения  $E/H = 23 \div 24$  (табл. 2, изм. 3 и 9). У трибослоя, сформировавшегося на поверхности WC – 80Г4 после скольжения при скорости 37 м/с, наблюдаются самые низкие нанотвердость и эффективный модуль Юнга, этот слой характеризуется повышенным сопротивлением разрушению при вдавливании ( $E/H \sim 37$ ) (табл. 2, изм. 5). Соответственно, в таком трибослое наблюдаются максимальная глубина проникновения индентора и максимальная остаточная глубина отпечатков после снятия нагрузки (рис. 3, в, изм. 5). С уменьшением нагрузки на индентор с 50 до 10 мН нанотвердость и эффективный модуль Юнга еще больше уменьшаются (рис. 3, в, изм. 6; табл. 2, изм. 6).

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты работы наглядно показывают, что коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости скольжения и, соответственно, температуры

Т а б л и ц а 2

**Значения нанотвердости, эффективного модуля Юнга и соотношения  $E/H$  после наноиндентирования поверхностей исходных композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20 и изношенных поверхностей этих композитов**

Table 2. Values of nanohardness, effective Young's modulus and  $E/H$  ratio after nanoindentation of the surfaces of initial WC – 80G4 and WC – 80G20 composites and the worn surfaces of these composites

| Измерение  | Скорость, м/с | $P$ , мН | $H$ , МПа | $E$ , ГПа | $E/H$ | Примечание    |
|------------|---------------|----------|-----------|-----------|-------|---------------|
| WC – 80Г4  |               |          |           |           |       |               |
| 1          | исх           | 50       | 21 950    | 228       | 10,4  | WC + сталь    |
| 2          | исх           | 50       | 9462      | 140       | 14,7  | Сталь         |
| 3          | 10            | 50       | 10 584    | 251       | 23,7  | Серая область |
| 4          | 10            | 50       | 32 868    | 523       | 15,9  | Белая область |
| 5          | 37            | 50       | 4428      | 161       | 36,6  | Трибослой     |
| 6          | 37            | 10       | 1066      | 39        | 35,5  | Трибослой     |
| WC – 80Г20 |               |          |           |           |       |               |
| 7          | исх           | 50       | 27 883    | 335       | 12,0  | WC + сталь    |
| 8          | исх           | 50       | 23 127    | 331       | 14,3  | WC + сталь    |
| 9          | 10            | 50       | 7670      | 175       | 22,7  | Серая область |
| 10         | 10            | 50       | 19 717    | 335       | 17,0  | Белая область |
| 11         | 37            | 50       | 8269      | 221       | 26,6  | Трибослой     |

фрикционного контакта (табл. 1). С другой стороны, в процессе высокоскоростного скольжения композитов WC – (Fe – Mn – C) по диску из быстрорежущей стали образуется вольфрамат железа (табл. 1), который может служить высокотемпературной смазкой и, следовательно, уменьшать трение между поверхностью пальца и диска. При скольжении композитов WC – (Fe – Mn – C) со скоростью 30 и 37 м/с контактным давлением 5 МПа по стальному контртелу удалось создать трибологический слой переноса, состоящий из мелких фрагментов зерен WC и богатых железом частиц, сцементированных с механохимически образованным  $\text{FeWO}_4$  (рис. 1, б; рис. 2, б). Такой композитный слой может воспринимать динамические нагрузки, снижая трение (табл. 1) и образуя защиту нижележащих зерен композита от деформации и разрушения, способствуя повышенной толерантности структуры изношенной поверхности к возникающим при трении дефектам. Формирование эффективного защитного слоя при более низких скоростях (более низких температурах) маловероятно, поэтому на изношенных поверхностях обоих композитов формируются трещины (рис. 1, а) и сильно деформируются зерна WC (рис. 2, а). Качественных различий между изношенными поверхностями на композитах WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученных при одной и той же скорости скольжения, не наблюдалось, несмотря на разницу в скорости изнашивания, которая фактически возрастала с ростом скорости скольжения (табл. 1). Таким образом, основным фактором, который определяет морфологию изношенной поверхности, является скорость скольжения.

Принято считать, что появление плато и изгибов на диаграммах нагрузка – разгрузка при наноиндентировании (в литературе они имеют термин “*pop-in event*” [17]) свидетельствует о микропластичности в металлах, полупроводниках, керамиках, а также в тонких твердых пленках [17]. Известно также, что “*pop-in event*” могут возникать из-за плохой адгезии и отслоения между трибослоем и нижележащим материалом основы [14].

Исходя из низких значений  $E$  и  $H$  и, одновременно, высоких значений  $E/H$  трибослоев, формирующихся при скоростях скольжения 30 и 37 м/с, “*pop-in events*”, проявляющиеся при наноиндентировании (рис. 3, в, изм. 5 и б), могут свидетельствовать о пластической деформации трибослоев. Тот факт, что образцы WC – 80Г4, испытанные при скорости 10 м/с, не обнаруживают таких особенностей (в виде “*pop-in events*”) (рис. 3, б, изм. 10), можно интерпретировать в пользу относительно бездефектной и однородной структуры слоя переноса, который, вероятно, формируется в условиях стационарного скольжения.

В случае WC – 80Г20 слои имеют с подложкой гораздо более дефектную границу, что обуславливает плохую адгезию и приводит к формированию плато и всплески на кривой нагружения при индентировании (рис. 3, б, изм. 9). По этой же причине белые области

агломератов фрагментированных зерен WC имеют на поверхности WC – 80Г4 гораздо более высокие нанотвердость и эффективный модуль Юнга по сравнению с WC – 80Г20 (табл. 2, изм. 4 и 10). По всей видимости, менее податливая к нагрузке в условиях высокоскоростного трения подложка WC – 80Г4 является причиной аккумуляции в формирующемся трибослое высокой плотности деформационно-индуцированных дефектов, определяющей его высокие значения нанотвердости и эффективного модуля Юнга.

Таким образом, при относительно малых скоростях начинаются процессы пластической деформации и хрупкого разрушения зерен карбида вольфрама, которые приводят к перераспределению структурных компонентов композита и к формированию скоплений фрагментов зерен WC без связующей фазы, что охрупчивает и одновременно упрочняет приповерхностные области. По мере развития пластической деформации и разогрева приповерхностной области в процесс фрагментации включается все большее количество материала, в результате возникает мягкий, низкомодульный, гетерофазный композиционный слой толщиной 15 – 20 мкм (рис. 2, б). В этом слое фрагменты разрушившегося при износе материала цементируются трибохимически синтезируемым сложным оксидом  $\text{FeWO}_4$ , способным служить твердой смазкой за счет наличия кристаллографических плоскостей легкого скольжения [6, 12], что обеспечивает снижение коэффициента трения (табл. 1) и высокое сопротивление разрушению при вдавливании (табл. 2, изм. 5, 6, 11). В условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности структурно-фазовое состояние подложки материала, на которой формируется этот трибослой, оказывается очень важным.

## Выводы

Установлено, что в процессе трения композитов WC – (Fe – Mn – C) по стальному контртелу при контактом давлении 5 МПа и скоростях скольжения в диапазоне от 10 до 37 м/с на поверхности трения формируется вольфрамат железа  $\text{FeWO}_4$ , количество которого растет с увеличением скорости скольжения в WC – 80Г4 с 10 до 16 %, а в WC – 80Г20 с 4 до 10 %, что является одной из причин снижения коэффициента трения.

Показано, что скорость скольжения влияет на формирование толщины и структуры трибослоев. При скоростях скольжения 10 и 20 м/с формируются мелкодисперсные механически перемешанные трибослои толщиной 3 – 4 мкм. С увеличением скорости скольжения до 30 – 37 м/с толщина трибослоев достигает 10 – 15 мкм, а структура состоит из окисленных фрагментов композитов WC – (Fe – Mn – C) и сложного оксида  $\text{FeWO}_4$  и не имеет резкой границы как трибослои, формирующиеся при меньших скоростях скольжения.

Наибольшие нанотвердость (~33 ГПа) и эффективный модуль Юнга (~523 ГПа) достигнуты в трибослое WC – 80Г4 после трения со скоростью 10 м/с в случае внедрения наноиндентора в агломераты фрагментированных зерен WC. Результаты наноиндентирования показали очевидный эффект трибохимически-индуцированного размягчения в формирующемся трибослое

после высокоскоростного скольжения при скорости 37 м/с. Такой слой имеет композитную микроструктуру, состоящую из фрагментированных компонентов композита, сцементированных *in-situ* трибохимически образованным  $\text{FeWO}_4$  и (помимо антифрикционных свойств) обладает повышенным сопротивлением разрушению при индентировании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- 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/adv.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>
- Kübarsepp 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.jrmhm.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 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>
- Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N. Features of high-speed wear of WC-steel 11G13 material in contact with cast tool steel // *Journal of Friction and Wear*. 2009. Vol. 30. No. 1. P. 46–52. <https://doi.org/10.3103/S1068366609010085>
- Savchenko N., Sevostyanova I., Tarasov S. Self-lubricating effect of  $\text{FeWO}_4$  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>
- Gadge M., Chinchani S. Characterization of pre-and/or post-treated PVD-AlTiN coating: Nanohardness, modulus of indentation and percent elastic portion of the nanoindentation // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. No. 17. P. 8386–8392. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.439>
- He J., Cao Y., Li Z., Wang Y. Study of tribological properties of polymer derived  $\text{ZrB}_2$ -SiC ceramics // *Ceramics International*. 2018.
- 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/adv.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>
- Kübarsepp 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.jrmhm.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 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>
- Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N. Features of high-speed wear of WC-steel 11G13 material in contact with cast tool steel. *Journal of Friction and Wear*. 2009, vol. 30, no. 1, pp. 46–52. <https://doi.org/10.3103/S1068366609010085>
- Savchenko N., Sevostyanova I., Tarasov S. Self-lubricating effect of  $\text{FeWO}_4$  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>
- Gadge M., Chinchani S. Characterization of pre-and/or post-treated PVD-AlTiN coating: Nanohardness, modulus of indentation and percent elastic portion of the nanoindentation. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 46, no. 17, pp. 8386–8392. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.439>
- He J., Cao Y., Li Z., Wang Y. Study of tribological properties of polymer derived  $\text{ZrB}_2$ -SiC ceramics. *Ceramics International*. 2018,

- Vol. 44. No. 13. P. 15627–15630.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.231>
15. Tai P., Pang L., Shen T., Wang Z., Jin P., Huang S., Chang H., Wei K., Cui M., Sun J., Chai J. Microstructure evolution and nano-hardness of nanostructured TiAlN coating under N<sup>+</sup> ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 441. Article 128494. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128494>
  16. Tian Z., Zheng L., Wang J., Wang J. Capacity and mechanisms of plastic deformation in  $\beta$ -Lu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 131. P. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.023>
  17. Maharaj D., Bhushan B. Friction, wear and mechanical behavior of nano-objects on the nanoscale // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015. Vol. 95. P. 1–43. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2015.07.001>
  18. Ni W., Cheng Y.-T., Lukitsch M.J., Weiner A.M., Lev L.C., Grummon D.S. Effects of the ratio of hardness to Young's modulus on the friction and wear behavior of bilayer coatings // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. No. 18. P. 4028–4030. <https://doi.org/10.1063/1.1811377>
  19. Dusza J., Csanádi T., Medved D., Sedlak R., Vojtko M., Ivor M., Ünsal H., Tatarko P., Tatarková M., Šajgalík P. Nanoindentation and tribology of a (Hf-Ta-Zr-Nb-Ti)C high-entropy carbide // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Vol. 41. No. 11. P. 5417–5426. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.002>
  20. Севостьянова И.Н., Саблина Т.Ю., Федоров Д.В., Голуб А.В., Кульков С.Н. Исследование фазового состава и его влияние на механические свойства карбидосталей WC-(Fe-Mn-C) // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 2. С. 76–88. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.2-76-88>
- vol. 44, no. 13, pp. 15627–15630.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.231>
15. Tai P., Pang L., Shen T., Wang Z., Jin P., Huang S., Chang H., Wei K., Cui M., Sun J., Chai J. Microstructure evolution and nano-hardness of nanostructured TiAlN coating under N<sup>+</sup> ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*. 2022, vol. 441, article 128494. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128494>
  16. Tian Z., Zheng L., Wang J., Wang J. Capacity and mechanisms of plastic deformation in  $\beta$ -Lu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. *Scripta Materialia*. 2017, vol. 131, pp. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.023>
  17. Maharaj D., Bhushan B. Friction, wear and mechanical behavior of nano-objects on the nanoscale. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2015, vol. 95, pp. 1–43. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2015.07.001>
  18. Ni W., Cheng Y.-T., Lukitsch M.J., Weiner A.M., Lev L.C., Grummon D.S. Effects of the ratio of hardness to Young's modulus on the friction and wear behavior of bilayer coatings. *Applied Physics Letters*. 2004, vol. 85, no. 18, pp. 4028–4030. <https://doi.org/10.1063/1.1811377>
  19. Dusza J., Csanádi T., Medved D., Sedlak R., Vojtko M., Ivor M., Ünsal H., Tatarko P., Tatarková M., Šajgalík P. Nanoindentation and tribology of a (Hf-Ta-Zr-Nb-Ti)C high-entropy carbide. *Journal of the European Ceramic Society*. 2021, vol. 41, no. 11, pp. 5417–5426. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.002>
  20. Sevost'yanova I.N., Sablina T.Yu., Fedorov D.V., Golub A.V., Kul'kov S.N. Study of the phase composition and its effect on the mechanical properties of WC-(Fe-Mn-C) carbide steels. *Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science)*. 2020, vol. 22, no. 2, pp. 76–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.2-76-88>

#### 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 СО РАН  
**ORCID:** 0000-0001-8254-5853  
**E-mail:** savnick@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

**Ирина Николаевна Севостьянова**, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
**ORCID:** 0000-0001-6706-6512  
**E-mail:** sevir@ispms.ru

**Irina N. Sevost'yanova**, 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

**Сергей Юльевич Тарасов**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
**ORCID:** 0000-0003-0702-7639  
**E-mail:** tsy@ispms.ru

**Sergei Y. 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, цели и задачи исследования.

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

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

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

Поступила в редакцию 20.06.2022  
 После доработки 29.06.2022  
 Принята к публикации 29.06.2022

Received 20.06.2022  
 Revised 29.06.2022  
 Accepted 29.06.2022