ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(12-1):149–163
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.23.05:62.03 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

М. Л. Хазин[1], **Р. А. Апакашев**[1]

[1] Уральский государственный горный университет (УГГУ), г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: При добыче полезных ископаемых для выемки, погрузки и транспортирования горной массы используются различные горные машины и оборудование. За время интенсивной эксплуатации подобной техники прогрессирует износ её узлов и исполнительных органов. Вследствие износа рабочих поверхностей деталей машин и оборудования увеличивается потребление горюче-смазочных материалов и/или расход электроэнергии. В результате дополнительных затрат себестоимость готовой продукции повышается. Для увеличения ресурса рабочих поверхностей деталей горных машин и оборудования применяют износостойкие стали и чугуны, наплавки и покрытия. Современное горное машиностроение предъявляет к материалам деталей требования легкого веса, высокой удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости. Этим требованиям во многом удовлетворяют композиционные металломатричные материалы, сочетающие данные свойства. В качестве наполнителя металломатричных композитов широко используются частицы оксидов, нитридов, боридов, силицидов, придающие композитам функциональные свойства. Рассмотрены способы получения, исследованы структура, трибологические свойства и механизмы изнашивания алюмоматричных композиционных материалов, дисперсно наполненных отмеченными частицами. Установлено повышение износостойкости изученных материалов с увеличением концентрации частиц наполнителя в матрице. Отмечено, что как интенсивность износа, так и коэффициент износа уменьшались с увеличением времени и пути скольжения и повышались с увеличением приложенной нагрузки. При этом интенсивность износа и коэффициент износа композитов уменьшались пропорционально содержанию частиц наполнителя в алюминиевой матрице. В качестве основных механизмов изнашивания установлены адгезия, истирание, вспахивание и расслоение.

Ключевые слова: горные машины, узлы, механизмы, абразивный износ, алюмоматричные композиты, дисперсное армирование, трибологические свойства, машиностроение, получение композитов, твердость, карбид хрома.

Для цитирования: *Хазин М. Л., Апакашев Р. А.* Новые материалы для деталей горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-1. – С. 149–163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149.

New materials in mining engineering

M. L. Khazin[1], **R. A. Apakashev**[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: During the extraction of minerals, various mining machines are used to excavate, load and transport the rock mass. During the operation of the equipment, the wear of its

© М. Л. Хазин, Р. А. Апакашев. 2023

components increases and the executive bodies wear out. Due to the wear of the working surfaces of machine parts and equipment, the consumption of fuels and lubricants and electricity consumption increase. As a result, the technical and economic indicators of enterprises are decreasing, and the cost of finished products is increasing. To increase the wear resistance of the working surfaces of parts of mining machines and equipment, wear-resistant steels and cast irons, surfacings and coatings are used. Modern mining engineering demands requirements light weight, high specific strength, excellent heat resistance and corrosion resistance to the materials of parts. These requirements are met by composite metal-matrix materials that combine these properties. Particles of oxides, nitrides, borides and silicides are widely used as fillers. The methods of obtaining, structure and tribological properties of alumina-matrix particulate-filled composite materials are considered. The wear resistance of materials increased with an increase in the concentration of filler particles in the matrix. The wear intensity and wear coefficient decreased with increasing time and sliding distance, and increased with increasing applied load. The wear intensity and wear coefficient of the composites decreased in proportion to the content of filler particles compared to the aluminum matrix. Wear mechanisms are also considered.

Key words: abrasive wear, aluminum matrix composites, components, chromium carbide, dispersed reinforcement, hardness, mechanical engineering, mechanisms, mining machines, production of composites, tribology, wear resistance.

For citation: Khazin M. L., Apakashev R. A. New materials in mining engineering. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):149–163. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149.

Введение

Конкурентоспособность современных горных предприятий в значительной мере определяется надежностью и производительностью используемого оборудования [1]. При эксплуатации землеройного, угледобывающего и размольного оборудования абразивный износ меняет форму и размеры деталей, что в определенный момент требует текущего или капитального ремонта и обуславливает снижение производительности горных машин и оборудования [2–4]. Износ рабочих поверхностей деталей машин и оборудования часто влечет увеличение потребления ГСМ и расхода электроэнергии. Износ бурового инструмента снижает производительность работ и повышает их стоимость [5, 6].

В результате технико-экономические показатели производственной деятельности предприятий снижаются, что отрицательно влияет на себестоимость готовой продукции. Поэтому повышение износостойкости и срока службы машин является актуальным, особенно при использовании высокопроизводительного оборудования в условиях высокой конкурентности [7, 8].

Для повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей горных машин и оборудования применяют износостойкие высокомарганцовистые стали, перлитные и мартенситные чугуны, наплавки и покрытия на изделия из углеродистых и низколегированных сталей, марганцовистых аустенитных сталей. В последние десятилетия в горной промышленности Российской Федерации применяются машины и оборудование из Европы, Китая, США и Японии. В 2011 г. доля импортного оборудования составляла 61,1% от общего объема на предприятиях отрасли, в 2014 г. — 72,5%, в 2016 г. — 75,5%, а в 2020–2021 гг. составила 76,6% (по шахтам — 53,1%, разрезам — 84,7%) [9]. Эти машины и оборудование изготовлялись из импортных марок стали. В настоящее время ситу-

ация существенно меняется — Россия взяла курс на импортозамещение высокотехнологичной продукции, которой нужно предложить достойную альтернативу, конкурентную и по цене, и по качеству, и по доступности.

Современное горное машиностроение характеризуется использованием новых материалов. Растущие требования легкого веса, высокой удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости [10, 11] стимулируют исследования по разработке технологических способов повышения износостойкости деталей горных машин. Это, например, применение электроэрозионной обработки [12], азотирования [13], плазменного напыления [14], а также специальных материалов, например композиционных [15, 16], для замены обычных материалов.

Композиты с металлической матрицей (КММ) — это передовые материалы, сочетающие в себе свойства металлической матричной основы с функциональными свойствами армирующих частиц. Это сочетание малой массы и высокой удельной прочности, химической инертности и коррозионной стойкости, повышенной износостойкости и жаропрочности.

Принимая во внимание необходимость постоянного совершенствования материалов и производственных процессов, КММ продолжают вытеснять традиционные материалы и учитывать последние достижения и требования в материаловедении, аэрокосмическом производстве, машиностроении, биомедицинской инженерии, обороне и многих других областях [15, 17–20].

Основная часть композиционных материалов с металлической матрицей, применяемых в промышленности, изготовляется по жидкофазным технологиям, которые являются наиболее универсальными, поскольку позволяют достигать больших объёмов производства, получать изделия различных форм и размеров. Основные недостатки жидкофазных методов — низкая смачиваемость армирующих частиц матричным расплавом и сложность управления их распределением для получения однородной структуры композиционного материала. При прекращении перемешивания армирующие частицы распределяются в объеме матрице неравномерно [21, 22], а также имеют тенденцию образовывать агломераты.

Методы порошковой металлургии (ПМ) на сегодняшний день являются наиболее предпочтительным основным процессом производства КММ. По сравнению с другими производственными маршрутами, ПМ является эффективным и универсальным способом производства КММ, обеспечивающим хорошую межфазную связь между дисперсной фазой и матрицей, способствует однородному распределению дисперсной фазы в матрице и предотвращает образование нежелательных фаз.

Композиты с алюминиевой матрицей (АМК) представляют собой наиболее интересную группу передовых легких материалов. В данных материалах в качестве наполнителя широко используются микро- и наноразмерные частицы Al_2O_3, SiC, AlN, ZrO_2, BN, TiC и др. [23–26]. Использование алюминия и его сплавов в качестве матричного материала постоянно возрастает, находя многочисленные применения во многих отраслях промышленности благодаря их низкой плотности, хорошей прочности и пластичности, отличной теплопроводности и коррозионной стойкости, а также низкой стоимости (по сравнению с другими легкими металлами, такими как Mg и Ti). Горное дело и оборудование для обработки полезных ископаемых также могут

быть потенциальными областями прикладных приложений для АММ. Исследования показывают повышенную твердость и высокую износостойкость композитов с увеличением содержания наполнителя. В то же время в литературе представлено ограниченное число исследований по механическим и трибологическим свойствам таких композитов, как Al-ZrC [15, 27], Al-WC [19, 28], а по соответствующим свойствам композитов состава Al-Cr_3C_2 данные практически отсутствуют.

Методика эксперимента

Для формирования матричной основы исследуемых композитов использовали порошок алюминия ПА-3 чистотой 99% (ГОСТ 6058–73) со средним размером частиц 250–450 мкм. В качестве функционального дисперсного наполнителя использовали порошок карбида хрома Cr_3C_2 (ГОСТ 28377–89) с размером частиц 40–100 мкм (табл. 1).

Навески порошков алюминия и карбида хрома, взятые в заданном соотношении, подвергали перемешиванию в течение 3 ч в цилиндре из полистирола, вращающемся со скоростью 100 об/мин. Полученную однородную порошковую смесь в количестве, достаточном для формирования компактных цилиндрических образцов диаметром 10 мм и высотой 8 мм, прессовали холодным способом в пресс-форме из закаленной стали на одноосном прессе ПГР400 при давлении 956 МПа и выдержке в течение 2 мин. В качестве смазки стенок пресс-формы использовали индустриальное масло. Уплотненные образцы, покрытые угольной засыпкой, спекали в алундовом тигле при температуре 640 °С в течение 1 ч.

Фазовый состав полученного композита изучали на рентгеновском дифрактометре XRD 7000 (Shimadzu) с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа XFlash Detector 630M (Bruker Nano GmbH). Фотографии микроструктуры алюмоматричного композиционного материала и карты распределения химических элементов получали на электронном сканирующем микроскопе VEGA LMS фирмы TESCAN. Визуальное исследование структуры также проводили на оптическом микроскопе Olympus BX61.

Испытание на твердость по Виккерсу проводили на поверхности образца с помощью твердомера ИТВ-30-АМ под нагрузкой 25 Н с выдерж-

Таблица 1
Основные свойства материалов[1]
Basic material properties Basic material properties

Свойства	Ед. изм.	Al	Cr_3C_2
Плотность	кг/м^3	2730	6920
Твердость	HRA		80
	HV	31,5	3700
HRA C			80
Модуль Юнга	ГПа	68,5	372

[1] Металлы и сплавы. Справочник / Под ред. Ю. П. Солнцева. — СПб.: Изд-во «Мир и Семья», 2003. — 1066 с.

[2] Стормс Э. Тугоплавкие карбиды. — М.: Атомиздат, 1970. — 304 с.

кой 15 с. Согласно ГОСТ 2999–75[1] измерения проводили в 5 точках вдоль поверхности образцов.

Испытания на изнашивание. Трибологические свойства образцов определяли при скольжении всухую на испытательной машине трения ИИ 5018 типа «штифт на диске» в соответствии с ГОСТ 23.21080[2] при комнатной температуре. Скорость скольжения составляла 0,52 м/с (200 об/мин) по диску из закаленной стали 45ХН с твердостью HRC55 при постоянной нагрузке 80 Н. Испытания на износ проводились на цилиндрических образцах (Ø10 мм х 8 мм), которые имели плоские поверхности в области контакта и закругленный угол. Штифт неподвижно удерживается на противоположной поверхности вращающегося диска диаметром 50 мм. Каждое испытание на износ проводилось для общей дистанции скольжения 1, 2 и 3 км. Вес штифта до и после испытания измеряли для определения потери массы с точностью 0,1 мг на электронных аналитических весах AND GR300. Контактные поверхности образца и диска шлифовали на наждачной бумаге с убывающим размером абразивных частиц, с последующим полированием на сукне с алмазной пастой. Перед проведением испытаний поверхности промывали ацетоном. После проведения испытания штифт вынимали из держателя, а диск очищали ацетоном от продуктов износа. В качестве результата исследований принимали среднее значение из трех измерений.

Износ образцов определяли по потере массы Δm по формуле

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (1)$$

где m_1, m_2 — масса образца до и после испытания.

Интенсивность изнашивания определяли по уравнению

$$I_v = \frac{\Delta m}{\gamma L}, \quad (2)$$

где γ — плотность исследуемого материала, L — путь трения.

Обсуждение результатов

Интенсивность износа чистого алюминия была изначально высокой и уменьшалась с увеличением дистанции прохождения. Введение армирующих частиц уменьшает интенсивность изнашивания материала. Скорость изнашивания композитов ниже, чем наблюдаемая в основном металле, и уменьшается с увеличением массовой доли содержания Cr_3C_2 в композите, что свидетельствует о существенном влиянии увеличения скорости скольжения на скорость изнашивания (рис. 1). Отчетливо видно, что скорость износа уменьшается с увеличением массовой доли Cr_3C_2 и расстояния скольжения. Следует отметить, что влияние пути скольжения и весового процента армирования на скорость износа имеет одинаковую природу при различных условиях, т. е. обратно пропорционально.

Безразмерный коэффициент износа рассчитывали по формуле Арчарда [29]:

$$K = \frac{I_v H}{F_н}, \quad (3)$$

где H — твердость материала, HV, $F_н$ — осевая нагрузка, Н, прикладываемая к торцу образца.

Величина коэффициента износа матричного металла и композитов

[1] ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы метод измерения твердости по Виккерсу. — М.: Изд-во стандартов, 1987. –31 с.

[2] ГОСТ 23.210-80 Обеспечение износостойкости изделий метод оценки фрикционной теплостойкости материалов. — М.: Изд-во стандартов, 1980. –12 с.

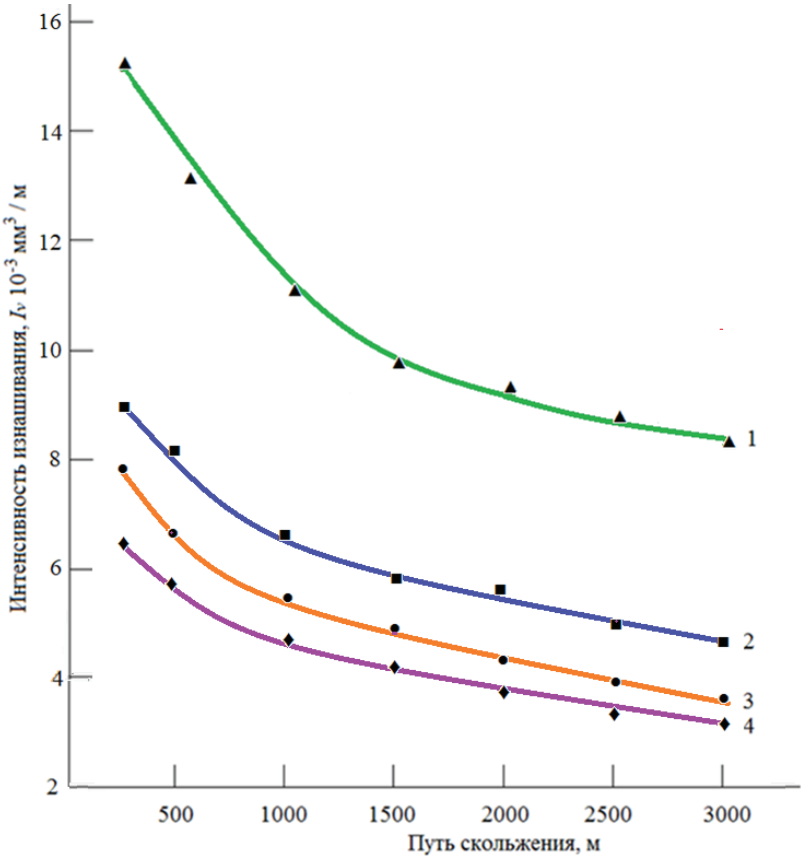


Рис. 1. Интенсивность изнашивания композитов Al-Cr_3C_2 в зависимости от содержания Cr_3C_2: 1–0%; 2–4%; 3–7%; 4–10%
Fig. 1. Wear intensity of Al-Cr_3C_2 composites depending on the content of Cr_3C_2: 1–0%; 2–4%; 3–7%; 4–10%

уменьшается с увеличением пути скольжения и повышением доли частиц карбида (рис. 2). Коэффициент износа матрицы варьируется от $1{,}73 \cdot 10^{-6}$ до $1{,}51 \cdot 10^{-6}$ для пути скольжения от 1 до 3 км, а коэффициенты износа композитов последовательно демонстрируют более низкое значение по сравнению с матричным металлом, что согласуется с данными литературы [30–32].

Интенсивность изнашивания и коэффициенты износа с увеличением расстояния скольжения постепенно уменьшаются и стремятся к постоянному значению. Интенсивность изнашивания и коэффициенты износа композитов снижены по сравнению с матричным материалом. Увеличение содержания частиц карбида приводит к уменьшению интенсивности изнашивания и коэффициентов износа образцов (см. рис. 1 и 2). Фиксируемое повышение износостойкости композита с повышенным содержанием армирующего компонента может быть объяснено повышением твердости.

Микрофотографии поверхности композитов показывают равномерное распределение частиц карбида в матрице (рис. 3). Механические свойства композиционного материала (твердость и прочность на сжатие) значи-

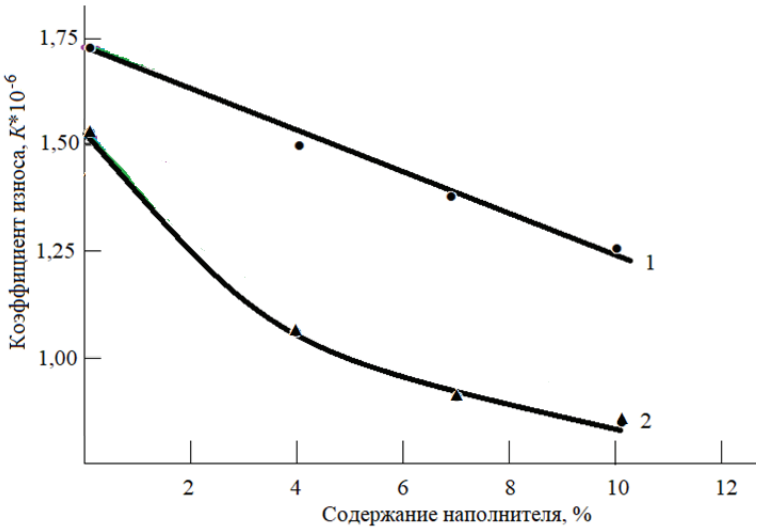
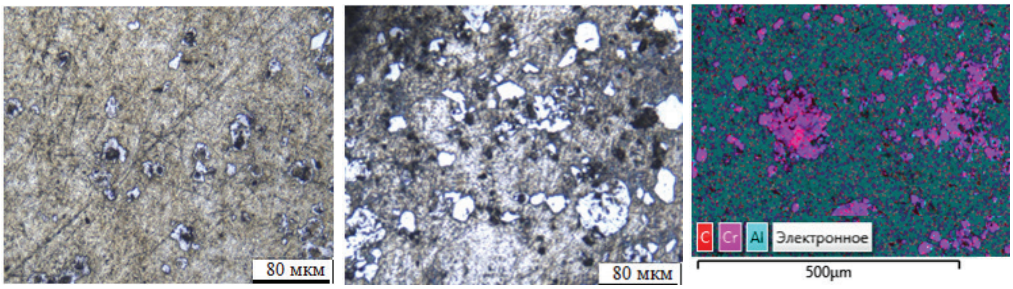


Рис. 2. Изменение коэффициента износа композитов Al-Cr_3C_2 в зависимости от содержания наполнителя на дистанции 1000 м (1) и 3000 м (2)
Fig. 2. Change in the wear coefficient of aluminum composites Al-Cr_3C_2 depending on the filler content at a distance of 1000 m (1) and 3000 m (2)



а *б* *в*

Рис. 3. Поверхность композита состава Al-4%Cr_3C_2 (а), Al-10%Cr_3C_2 (б) до истирания и суммарное распределение элементов (в) по поверхности образца Al-4%Cr_3C_2
Fig. 3. The surface of the composite composition Al-4% Cr_3C_2 (a), Al-10% Cr_3C_2 (b) before abrasion and the total distribution of elements (c) over the surface of the sample Al-4% Cr_3C_2

тельно улучшаются за счет добавления Cr_3C_2. Износостойкость композитов также значительно повышается.

При металлографическом анализе образцов после испытаний на износостойкость выявлено, что, начиная с малых нагрузок (18 Н), под влиянием рельефа контртела на поверхности трения образцов в направлении скольжения образуются канавки глубиной примерно 10 мкм и шагом между выступами рельефа 0,02–0,2 мм (рис. 4).

Возможно, что часть царапин и канавок, параллельных направлению скольжения, появляется вследствие царапающего и режущего воздействия твердых частиц наполнителя, который выкрашивается из матрицы. В композиционном материале армирующие частицы упрочняют структуру, поэтому количество и размер канавок меньше по срав-

нению с традиционными сплавами. Это может быть связано с тем, что частицы наполнителя являются эффективными препятствиями для движения дислокаций, что приводит к упрочнению материала, снижению пластической деформации и потерь материала матрицы.

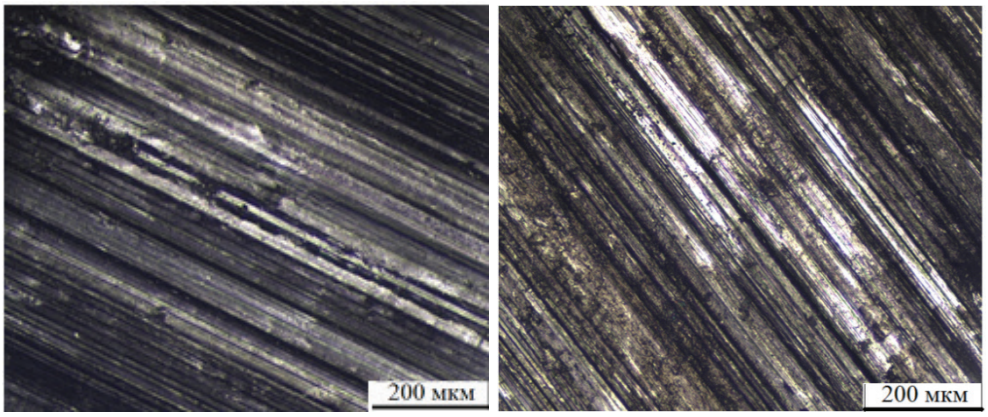
Исследование поверхности износа матричного металла показывает более грубые и глубокие канавки и гребни, идущие параллельно друг другу, что является типичной характеристикой износа скольжения. Было замечено, что изначально износ является адгезионным и наблюдается пластическое течение материала вместе с небольшой полостью в подповерхностном слое. Из микрофотографий следует, что канавки в композитах намного мельче, чем в матричном материале, вследствие присутствия частиц карбидов. Видно, что с добавлением армирующего материала кратеры уменьшаются и появляются некоторые гладкие следы износа. Это указывает на то, что за счет армирования повышается твердость композита. При этом изнашиваемые поверхности композитов были более гладкими, чем у матричного материала, а глубина канавок износа была относительно меньше в участках, содержащих армирующие частицы карбидов. При приложенной нагрузке мягкий алюминиевый сплав проявляет более высокую пластическую деформацию за счет более глубоких канавок, идущих параллельно друг другу (см. рис. 4).

Причина уменьшения глубины канавок может быть связана с сопротивлением, обеспечиваемым частицами карбидов, и их более высокой твердостью. Увеличение содержания частиц карбидов и уменьшение глубины канавок по сравнению с чистым алюминием изменяет механизм износа — адгезионный износ превращается в абразивный износ с более мелкими следами износа. Образующиеся канавки становятся намного тоньше и расположены близко друг к другу из-за скользящего действия большего количества твердых частиц и осколков материала и абразива. Во всех случаях равномерно по всей изношенной поверхности располагаются несколько участков богатого кислородом материала, которые в конечном итоге отрывались, образуя рыхлые обломки. Считается [31], что наличие кратеров в трибослое связано с растрескиванием и разрушением отслоившегося слоя на фрагменты, что может привести к образованию частиц износа с высоким коэффициентом удлинения или абразивов третьего тела.

Низкие скорости износа композиционного металломатричного материала и устойчивые значения коэффициента изнашивания обусловлены формированием на поверхности трения стабильных промежуточных слоев.

Однако при повышении приложенной нагрузки до 60 Н и более поверхность трения образцов изменяется и на ней в направлении скольжения дополнительно появляются макроскопические борозды. Такая картина характерна как для чистого алюминия, так и для композитов.

Адгезия, истирание, вспахивание и расслоение износа являются процессами износа, наблюдаемыми при испытаниях образцов. Оксидная пленка на поверхности алюминия предотвращает взаимодействие металла с металлом. Неподвижный контакт между штифтом и контртелом вызывает сильное напряжение на поверхности образца. Деформация матрицы под действием приложенной нагрузки и силы трения приводит к упрочнению поверхностного слоя, что проявляется в значительном повышении твердости поверхности после изнашивания (рис. 5).



а б

Рис. 4. Поверхность композита состава Al-4%Cr_3C_2 (а), Al-10%Cr_3C_2 (б) после истирания на дистанции 3000 м

Fig. 4. The surface of the composite composition Al-4% Cr_3C_2 (*a*), Al-10%Cr_3C_2 (*b*) after abrasion at a distance of 3000 m

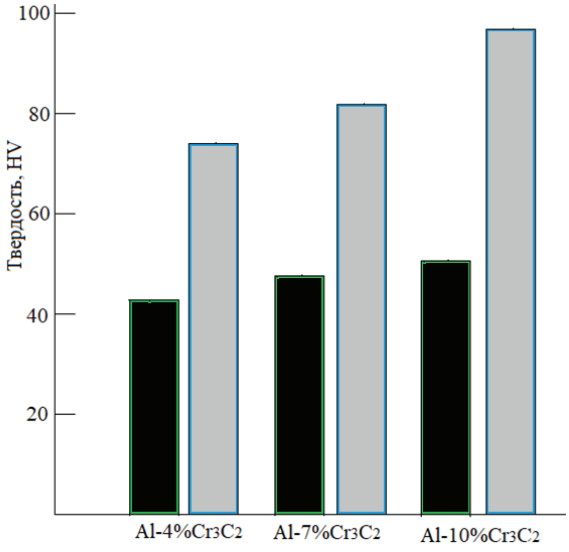


Рис. 5. Изменение твердости образцов до ■ и после ■ испытания на истирание на дистанции 3000 м

Fig. 5. Change in the hardness of samples before ■ and after ■ the abrasion test at a distance of 3000 m

По мере истирания матрицы в процессе скольжения частицы карбидов начинают выступать из поверхности образца. В процессе испытаний эти керамические частицы разрушаются под действием приложенной нагрузки и относительно равномерно разносятся по поверхности образца, формируя сплошную пленку карбида хрома. Образующиеся осколки частиц карбидов, оксидной пленки и контртела взаимодействуют с поверхно-

стью образца и образуют бороздки на поверхности мягкого материала, что вызывает повышенное расслоение в композитном образце. Увеличение пути скольжения, повышающее температуру на границе композитного штифта и диска, приводит к образованию трибослоя.

Вследствие этого происходит удаление материала и появление трещин в межфазной области матрицы и частиц карбида. Эти трещины приводят к расслаивающему износу и увеличиваются с увеличением расстояния скольжения. При анализе изношенной поверхности установлено, что изнашивание композита происходило преимущественно за счет истирания и расслоения. Площадь расслоения образца зависит от области, в которой происходит распространение трещины и пластическая деформация, что приводит к образованию глубоких канавок неправильной формы. При этом с увеличением расстояния скольжения с поверхности композита удаляется больше материала.

В значительной мере износ зависит от условий образования и роста трещин на трущихся поверхностях. В композиционных материалах образование трещин чаще всего происходит на границах раздела матрица–наполнитель. Первоначально частицы карбидов упрочняют и защищают поверхность, снижая износ. Когда приложенная нагрузка превышает предел прочности частиц наполнителя, они разрушаются, и защита от износа понижается. Поэтому на изношенных поверхностях композитов наблюдаются многочисленные канавки и короткие трещины, располагающиеся почти по нормали к направлению скольжения. Не исключено, что эти трещины формировались под поверхностью износа образца, а затем вышли на поверхность. Следовательно, в приповерхностной области, прилегающей к контактным поверхностям, протекает локализованная пластическая деформация.

Заключение

В результате проведенных исследований алюмоматричных композитов состава Al-Cr_3C_2, синтезированных методом холодного прессования, получены следующие выводы:

• твердость композитов Al-Cr_3C_2 увеличивается с повышением содержания Cr_3C_2 в матрице;

• износостойкость композитов повышается пропорционально увеличению количества армирующих частиц Cr_3C_2, а потеря массы композитов при испытании возрастает пропорционально увеличению приложенной нагрузки и расстоянию скольжения;

• коэффициент износа композитов уменьшается пропорционально увеличению количества частиц Cr_3C_2, армирующих матрицу;

• композиты состава Al-Cr_3C_2 проявляют меньшую скорость абразивного износа по сравнению с матричным материалом.

Выполненные исследования свидетельствуют о высоких трибологических свойствах и перспективности использования новых алюмоматричных композиционных материалов в трибоузлах горной, дорожно-строительной и автомобильной техники.

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в эту работу. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Громыка Д. С.*, *Утенкова Т. Г.*, *Короткова О. Ю.* Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 2. — С. 75–86. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0–75–86.

2. *Побегайло П. А.*, *Крицкий Д. Ю.*, *Гильманшина Т. Р.* Износ элементов карьерных экскаваторов: анализ современного состояния проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 2. — С. 64–74. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0–64–74.

3. *Линник Ю. Н.*, *Линник В. Ю.*, *Жабин А. Б.*, *Цих А.* Закономерности влияния надежности исполнительных органов и свойств угольных пластов на производительность очистных комбайнов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 11. — С. 169–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_169.

4. *Белов Н. В.*, *Бородина М. Б.*, *Смирнова О. А.*, *Часовских А. С.* Анализ отказов элементов конусных дробилок и причин их возникновения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 3. — С. 17–27. DOI: 10.25018/0236-1493-20213-0-17–27.

5. *Боярских Г. А.*, *Симисинов Д. И.* Сравнительная оценка эффективности упрочнения элементов опоры шарошечных долот // Известия вузов. Горный журнал. — 2002. — № 5. — С. 65–72.

6. *Боярских Г. А.*, *Симисинов Д. И.* Ретроспективный анализ исследований и предпосылки обеспечения надежности бурового инструмента // Известия вузов. Горный журнал. — 2009. — № 7. — С. 58–65.

7. *Галкин В. А.*, *Макаров А. М.*, *Росляков С. В.* Продуктивность труда на горнодобывающих предприятиях как фактор обеспечения их конкурентоспособности // Известия УГГУ. — 2020. — Вып. 4(60). — С. 228–235. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4- 228–235.

8. *Соколов А. С.* Некоторые аспекты конкурентоспособности горнодобывающих предприятий // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. — 2021. — № 3. — С. 73–82. DOI: 10.24412/2071-6435-2021-3-74–82.

9. *Никитин А. Ю.* Развитие горного машиностроения в новых реалиях зависит от консолидированных усилий участников отрасли // Горная промышленность. — 2022. — № 2. — С. 10–11.

10. *Дунаев А. В.* Инновационные методы повышения ресурса изношенной техники // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 5. — С. 144–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0–144–150.

11. *Щербаков А. П.* Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин // Вестник СибАДИ. — 2020. — Т. 17. — № 4. — С. 464–475. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17–4-464–475.

12. *Сьянов С. Ю.* Технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2020. — № 12 (114). — С. 18–21. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-12–18–21.

13. *Криони Н. К.*, *Мингажева А. А.* Повышение износостойкости деталей машин азотированием с комплексной подготовкой поверхности // Materials. Technologies. Design. — 2021. — Т. 3. — № 2 (4). — С. 43–50. DOI: 10.54708/26587572_2021_32443.

14. *Жачкин С. Ю.*, *Трифонов Г. И.* Влияние плазменного напыления композиционных порошковых материалов на износостойкость деталей машин // Master›s Journal. — 2017. — № 1. — С. 30–36.

15. *Aynalem G. F.* Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, vol. 2020, article 3765791, 19 p. https://doi.org/10.1155/2020/3765791.

16. *Panwar N.*, *Chauhan A.* Fabrication methods of particulate reinforced Aluminium metal matrix composite-a review // Materials Today: Proceedings. 2018, vol. 5, no. 2, pp. 5933–5939. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.194.

17. *Курганова Ю. А.*, *Колмаков А. Г.* Конструкционные металломатричные композиционные материалы. — М.: Изд-во МГТУ, 2015. — 144 с.

18. *Бикмухаметов М. В.*, *Житников Д. С.* Композиционные материалы как двигатель прогресса // Интернаука. — 2020. — № 45–2 (174). — С. 19–20.

19. *Ujah C. O.*, Von *Kallon D. V.* Trends in Aluminium Matrix Composite Development // Crystals. 2022, vol. 12, no. 10, p. 1357. https://doi.org/10.3390/cryst12101357.

20. *Памфилов Е. А.*, *Шевелева Е. В.* Композиционные материалы в узлах трения технологического оборудования // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. — 2017. — № 10. — С. 28–32.

21. *Ali M.* Review of stir casting technique and technical challenges for ceramic reinforcement particulate and aluminium matrix composites // Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2020, vol. 72, no. 6, pp. 198–204. Doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.32.

22. *Khazin M. L.*, *Apakashev R. A.*, *Davydov S. Y.* Obtaining Aluminum — Matrix Composite Materials Particulate — Reinforced with Ceramic Panicles // Refractories and industrial Ceramics. 2022, vol. 63, no. 3, pp. 291–296.

23. *Kim D. Y.*, *Choi H. J.* Recent Developments towards Commercialization of Metal Matrix Composites // Materials (Basel). 2020, vol. 13, no. 12, p. 2828. DOI: 10.3390/ma13122828.

24. *Garg P.*, *Jamwal A.*, *Kumar D.*, *Sadasivuni K. K.*, *Hussain C. M.*, *Gupta P.* Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications // Journal of Materials Research and Technology. 2019, vol. 8, no. 5, pp. 4924–4939. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.028.

25. *Ловшенко Ф. Г.*, *Лозиков И. А.*, *Хабибуллин А. И.* Алюминиевые механически легированные композиционные жаропрочные материалы с особыми физико-механическими свойствами // Литье и металлургия. — 2020. — № 3. — С. 99–111. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-3-99–111.

26. *Alam M. A.*, *Ya H. H.*, *Azeem M.*, *Yusuf M.*, *Soomro I. A.*, *Masood F.*, *Shozib I. A.*, *Sapuan S. M.*, *Akhter J.* Artificial Neural Network Modeling to Predict the Effect of Milling Time and TiC Content on the Crystallite Size and Lattice Strain of Al7075-TiC Composites Fabricated by Powder Metallurgy // Crystals. 2022, vol. 12, pp. 372–392. https://doi.org/10.3390/cryst12030372.

27. *John C. F.*, *Paul R. C.*, *Singh S. C.* E., *Ramkumar T.* Tribological behavior, mechanical properties and microstructure of Al-12Si-ZrC composite prepared by powder metallurgy // Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences (Bull. Pol. Ac.: Tech.). 2017, vol. 65, no. 2, pp. 149–154. DOI: 10.1515/bpasts-2017–0018.

28. *Ghasali E.*, *Fazili A.*, *Alizadeh M.*, *Shirvanimoghaddam K.*, *Ebadzadeh T.* Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Al-TiC Metal Matrix Composite Prepared by Conventional, Microwave and Spark Plasma Sintering Methods // Materials (Basel). 2017, vol. 10, no. 11, p.1255. DOI: 10.3390/ma10111255. PMID: 29088114; PMCID: PMC5706202.

29. *Varenberg M.* Adjusting for Running-in: Extension of the Archard Wear Equation // Tribology Letters. 2022, vol. 70, no. 2, p. 59. DOI :10.1007/s11249-022-01602-6.

30. *Михеев Р. С.*, *Чернышова Т. А.* Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. — М.: Издательская группа URSS, 2013. — 360 с.

31. *Adiga K.*, *Herbert M. A.*, *Rao S. S.*, *Shettigar A.* Applications of reinforcement particles in the fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing —

A Review // Manufacturing Rev. 2022, vol. 9, no. 26, pp. 1–17. https://doi.org/10.1051/mfreview/2022025.

32. *Nayak K. C.*, *Rane K. K.*, *Date P. P.*, *Srivatsan T. S.* Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy: Role of Sintering Parameters // Appl. Sci. 2022, vol. 12, p. 8843. https://doi.org/10.3390/app12178843. MAS

REFERENCES

1. Gromyka D. S., Utenkova T. G., Korotkova O. Yu. Estimation methods of wear mechanisms in cutting heads of mining machines: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2021, no. 2, pp. 75–86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0–75–86.

2. Pobegailo P. A., Kritsky D. Yu., Gilmanshina T. R. Wear of mining shovel components: Current situation and analysis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2021, no. 2, pp. 64–74. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0–64–74.

3. Linnik Yu. N., Linnik V. Yu., Zhabin A. B., Tsikh A. Patterns of influence exerted by cutting drum reliability and coal seam properties on cutter–loader capacity. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2021, no. 11, pp. 169–180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_169.

4. Belov N. V., Borodina M. B., Smirnova O. A., Chasovskikh A. S. Failure analysis of main components of cone crushers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2021, no. 3, pp. 17–27. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-20213-0-17–27.

5. Boyarskikh G. A., Simisinov D. I. Comparative evaluation of the effectiveness of hardening of the support elements of ball bits. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2002, no. 5, pp. 65–72. [In Russ].

6. Boyarskikh G. A., Simisinov D. I. Retrospective analysis of studies and prerequisites for ensuring the reliability of the drilling tool. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2009, no. 7, pp. 58–65.

7. Galkin V. A., Makarov A. M., Roslyakov S. V. Labor productivity at mining enterprises as a factor in ensuring their competitiveness. *Izvestiya USMU*. 2020, no. 4(60), pp. 228–235. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-4- 228–235.

8. Sokolov A. S. Some aspects of the competitiveness of mining enterprises // *ETAP: ekonomicheskaya teoriya, analiz, praktika*. 2021, no. 3, pp. 73–82. [In Russ]. DOI: 10.24412/2071-6435-2021-3-74–82.

9. Nikitin A. Yu. The development of mining engineering in the new realities depends on the consolidated efforts of industry participants. *Gornaya promyshlennost*. 2022, no. 2, pp. 10–11. [In Russ].

10. Dunaev A. V. Innovative methods to extend life of foreworn machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2018, no. 5, pp. 144–150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0–144–150.

11. Shcherbakov A. P. Material and method selection for increasing the wear resistance of construction machines components. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020, vol. 17, no. 4, pp. 464–475. [In Russ]. Doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17–4-464–475.

12. Syanov S. Yu. Technological support of machinery wear-resistance with electro-erosion treatment. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2020, no. 12 (114), pp. 18–21. [In Russ]. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-12–18–21.

13. Krioni N. K., Mingazheva A. A. Increasing the wear resistance of machine parts by nitriding with complex surface preparation. *Materials. Technologies. Design*. 2021, vol. 3, no. 2(4), pp. 43–50. [In Russ]. DOI: 10.54708/26587572_2021_32443.

14. Zhachkin S. Yu., Trifonov G. I. Influence of plasma spraying of composite powder materials on the wear resistance of machine parts. *Master's Journal*. 2017, no. 1, pp. 30–36.

15. Aynalem G. F. Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites. A*dvances in Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 2020, article 3765791, 19 p. https://doi.org/10.1155/2020/3765791.

16. Panwar N., Chauhan A. Fabrication methods of particulate reinforced Aluminium metal matrix composite-a review. *Materials Today: Proceedings*. 2018, vol. 5, no. 2, pp. 5933–5939. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.194.

17. Kurganova Yu. A., Kolmakov A. G. Structural metal-matrix composite materials, Moscow, Publishing house MSTU, 2015, 144 p. [In Russ].

18. Bikmukhametov M. V., Zhitnikov D. S. Composite materials as an engine of progress. *Internauka*. 2020, no. 45–2 (174), pp. 19–20. [In Russ].

19. Ujah C. O., Von Kallon D. V. Trends in Aluminium Matrix Composite Development. *Crystals*. 2022, vol. 12, no. 10, p. 1357. https://doi.org/10.3390/cryst12101357.

20. Pamfilov E. A., Sheveleva E. V. Composite materials in friction units of technological equipment. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2017, no. 10, pp. 28–32.

21. Ali M. Review of stir casting technique and technical challenges for ceramic reinforcement particulate and aluminium matrix composites. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2020, vol. 72, no. 6, pp. 198–204. https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.32.

22. Khazin M. L., Apakashev R. A., Davydov S. Y. Obtaining Aluminum – Matrix Composite Materials Particulate-Reinforced with Ceramic Panicles. *Refractories and industrial Ceramics*. 2022, vol. 63, no. 3, pp. 291–296.

23. Kim D. Y., Choi H. J. Recent Developments towards Commercialization of Metal Matrix Composites. *Materials (Basel)*. 2020, vol. 13, no. 12, p. 2828. DOI: 10.3390/ma13122828.

24. Garg P., Jamwal A., Kumar D., Sadasivuni K. K., Hussain C. M., Gupta P. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 5, pp. 4924–4939. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.028.

25. Lovshenco F. G., Lozikov I. A., Khabibutin A. I. High-temperature aluminum composite materials with special physical and mechanical properties produced by mechanical alloying. *Foundry production and metallurgy*. 2020, no. 3, pp. 99–111. [In Russ]. https://doi.org/10.21122 16X3-6065-2020-3-99–111.

26. Alam M. A., Ya H. H., Azeem M., Yusuf M., Soomro I. A., Masood F., Shozib I. A., Sapuan S. M., Akhter J. Artificial Neural Network Modeling to Predict the Effect of Milling Time and TiC Content on the Crystallite Size and Lattice Strain of Al7075-TiC Composites Fabricated by Powder Metallurgy. *Crystals*. 2022, vol. 12, pp. 372–392. https://doi.org/10.3390/cryst12030372.

27. John C. F., Paul R. C., Singh S. C. E., Ramkumar T. Tribological behavior, mechanical properties and microstructure of Al-12Si-ZrC composite prepared by powder metallurgy. *Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences (Bull. Pol. Ac.: Tech.)*. 2017, vol. 65, no. 2, pp. 149–154. DOI: 10.1515/bpasts-2017–0018.

28. Ghasali E., Fazili A., Alizadeh M., Shirvanimoghaddam K., Ebadzadeh T. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Al-TiC Metal Matrix Composite Prepared by Conventional, Microwave and Spark Plasma Sintering Methods. *Materials (Basel)*. 2017, vol. 10, no. 11, p. 1255. DOI: 10.3390/ma10111255. PMID: 29088114.

29. Varenberg M. Adjusting for Running-in: Extension of the Archard Wear Equation. *Tribology Letters*. 2022, vol. 70, no. 2, p. 59. DOI: 10.1007/s11249-022-01602-6.

30. Mikheev R. S., Chernyshova T. A. Aluminum matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology. Moscow, Izdatel'skaya gruppa URSS, 2013, 360 p. [In Russ].

31. Adiga K., Herbert M. A., Rao S. S., Shettigar A. Applications of reinforcement particles in the fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing — A Review. *Manufacturing Rev*. 2022, vol. 9, no. 26, pp. 1–17. https://doi.org/10.1051/mfreview/2022025.

32. Nayak K. C., Rane K. K., Date, P. P., Srivatsan T. S. Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy: Role of Sintering Parameters. *Appl. Sci*. 2022, vol. 12, p. 8843. https://doi.org/10.3390/app12178843.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хазин Марк Леонтьевич — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Эксплуатация горного оборудования», ORCID iD: 0000-0002-6081-4474, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144, e-mail: Khasin@ursmu.ru;

Апакашев Рафаил Абдрахманович — докт. хим. наук, профессор, проректор по научной работе, ORCID iD 0000-0002-9006-3667, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, 620144, e-mail: parknedra@yandex.com;

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khazin M. L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, ORCID iD: 0000-0002-6081-4474, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: Khasin@ursmu.ru;

Apakashev R. A., Dr. Sci. (Chem.), Professor, vice-rector for scientific work, ORCID iD 0000-0002-9006-3667, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, 620144, e-mail: parknedra@yandex.com.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 21.08.2023; принята к печати 10.11.2023.
Received by the editors 15.05.2023; received after the review 21.08.2023; accepted for printing 10.11.2023.