ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):5-17
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.23.05:62.03 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_5

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Р.А. Апакашев[1], М.Л. Хазин[1], В.Е. Адас[1]

[1] Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия, e-mail: Khasin@ursmu.ru

Аннотация: При разработке месторождений полезных ископаемых применяются разнообразные горные машины и механизмы, сборочные единицы и отдельные детали, которые в процессе работы подвергаются абразивному износу. Износ деталей приводит к повышению расхода горюче-смазочных материалов и электроэнергии, необходимых для эксплуатации машин и оборудования, что сказывается на увеличении себестоимости процесса добычи. Для повышения долговечности деталей машин используют износостойкие стали и чугуны, специальные покрытия и наплавки. Современному горному машиностроению необходимы детали с повышенной удельной прочностью, износостойкостью и малым весом. Таким условиям в большой мере удовлетворяют композиционные материалы с металлической матрицей и наполнителями из боридов, нитридов, оксидов и силицидов. Рассмотрены способы получения, исследованы трибологические свойства, механизмы изнашивания и структура алюмоматричных композиционных материалов с наполнителем из частиц карбида циркония. Показано увеличение износостойкости материалов и понижение коэффициента трения с повышением содержания частиц наполнителя в матрице. Отмечено, что интенсивность износа снижается с увеличением времени и длины пути скольжения и возрастает с повышением приложенной нагрузки. При этом интенсивность износа и коэффициент трения образцов композитов снижаются пропорционально количеству частиц наполнителя в алюминиевой матрице. В качестве основных механизмов изнашивания установлены адгезия, истирание, вспахивание и расслоение.

Ключевые слова: машиностроение, горные машины, алюмоматричные композиты, дисперсное армирование, карбид циркония, трибологические свойства, абразивный износ.

Для цитирования: *Апакашев Р. А., Хазин М. Л., Адас В. Е.* Композиционные материалы для деталей горных машин и механизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_5.

Coposite materials for parts of mining machines and mechanisms

R.A. Apakashev[1], M.L. Khazin[1], V.E. Adas[1]

[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: Khasin@ursmu.ru

Abstract: When developing mineral deposits, a variety of mining machines and mechanisms are used. During operation, their assembly units and individual parts are subject to abrasive wear. Wear of parts leads to an increase in the consumption of fuels, lubricants and electricity necessary for the operation of machines and equipment, which affects the increase in the cost of finished products. To increase the service life of machine parts, wear-resistant steels and cast irons, special coatings and surfacing are used. Modern mining engineering requires parts with

increased specific strength, wear resistance and low weight. These requirements are largely satisfied by composite materials with a metal matrix and fillers of borides, nitrides, oxides and silicides. Production methods are considered, tribological properties, wear mechanisms and structure of aluminum matrix composite materials strengthened with zirconium carbide particles are studied. An increase in the wear resistance of materials and a decrease in the coefficient of friction with an increase in the content of filler particles in the matrix is shown. It is noted that the wear rate decreases with increasing time and sliding distance and increases with increasing applied load. In this case, the wear rate and friction coefficient of composites are reduced in proportion to the content of filler particles in the aluminum matrix. Adhesion, abrasion, plowing and delamination are identified as the main wear mechanisms.

Key words: abrasive wear, aluminum matrix composites, mining machines, dispersed reinforcement, zirconium carbide, tribological properties, mechanical engineering, production of composites

For citation: Apakashev R. A., Khazin M. L., Adas V. E. Coposite materials for parts of mining machines and mechanisms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):5-17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_5.

Введение

Конкурентоспособность горного оборудования на современном рынке машиностроительной продукции определяется совокупностью факторов, среди которых основными являются надежность и долговечность, они играют существенную роль в обеспечении эффективной и экономически целесообразной эксплуатации техники в сложных условиях, характерных для горнодобывающей отрасли. Надежность оборудования подразумевает его способность функционировать без отказов в течение заданного времени, что напрямую влияет на производительность и экономическую эффективность производственных процессов. Долговечность же характеризует ресурс работы оборудования до момента капитального ремонта или замены, что позволяет минимизировать затраты на техническое обслуживание и увеличить срок окупаемости инвестиций.

В условиях высокой конкуренции на мировом рынке производители горного оборудования вынуждены постоянно совершенствовать технологии и материалы, чтобы обеспечить оптимальные значения этих параметров и соответствовать высоким стандартам качества, предъявляемым к данной продукции [1].

В процессе добычи и последующей транспортировки горной массы элементы оборудования подвергаются значительным механическим нагрузкам. Одним из основных факторов, существенно сокращающих эксплуатационный ресурс горных машин и механизмов, является абразивное изнашивание, обусловленное взаимодействием деталей с твердыми частицами горной массы. Вследствие износа поверхностей изменяются размеры, форма и взаимное расположение деталей машин, что является одной из наиболее распространенных причин выхода из строя горнодобывающей техники. Наиболее подвержены износу рабочие поверхности шеек валов и осей, кулачков, зубья шестерен и др., что повышает объем ремонтных работ [2, 3].

С целью придания долговечности рабочим поверхностям деталей механизмов и машин применяют материалы с повышенной износостойкостью, например, мартенситные и перлитные чугуны, высокомарганцовистые стали, а также

различные покрытия. В настоящее время конструкционные материалы для изготовления деталей машин и оборудования выбираются исходя из их способности удовлетворять высоким техническим требованиям по соотношению прочности и веса, прочности на разрыв, коррозионной стойкости и технологичности. Необходимость в обеспечении машиностроения высокотехнологичными и недорогими конструкционными материалами способствует расширению области исследований композитных материалов. Поэтому современные исследования в области материаловедения направлены на создание простых в изготовлении и эффективных в применении композиционных материалов с высокими механическими свойствами [4]. В этом направлении проводятся многочисленные исследования по изготовлению металломатричных композитов, армированных различными дисперсными наполнителями.

Композиционные материалы постепенно вытесняют традиционные материалы в технике. Композиционный материал представляет собой комбинацию двух или более фаз, химически различных и нерастворимых, свойства и структурные характеристики которых превосходят свойства отдельных компонентов. Широкое использование композитов будет способствовать значительной экономии материалов и энергии.

Основная доля металломатричных композиционных материалов изготавливается по жидкофазным технологиям с перемешиванием, позволяющим изготавливать детали различных размеров и конфигурации. Основной недостаток этих методов — частицы наполнителя плохо смачиваются расплавленным материалом матрицы. Кроме того, сложно добиться однородной структуры композита. В процессе литья с перемешиванием сложно достичь равномерного распределения частиц наполнителя по всей основе, поэтому композиционный материал часто получается неоднородным по физико-механическим свойствам [5—7]. Тогда как применение метода порошковой металлургии обеспечивает равномерное распределения армирующих частиц наполнителя в объеме матрицы и исключает образование нежелательных фаз. Вследствие этого метод порошковой металлургии имеет преимущество над обычными процессами литья при производстве как простых, так и сложных деталей.

Алюминий и его сплавы занимают третье место среди промышленно используемых конструкционных материалов. В качестве матрицы алюминий используется чаще других легких металлов. Композиты с алюминиевой матрицей — это инновационные материалы, уникальные свойства которых делают их незаменимыми в различных областях.

В процессе изготовления алюмоматричных композитов (АМК) в качестве наполнителя применяют порошки боридов, карбидов, нитридов, оксидов или их сочетания. Чаще всего применяют карбиды кремния и титана, оксид алюминия и углерод [8—11]. Для сравнения, Al_2O_3 немного более плотный, и имеет более низкие характеристики смачиваемости, чем SiC, но он обладает более высокой стойкостью к окислению, и более химически стабилен. Как правило, применение частиц SiC обеспечивает более высокие механические свойства композита [12, 13], а карбид титана отличается высокой твердостью и стабильностью при высоких температурах [14].

Алюмоматричные композиционные материалы обладают улучшенными механическими и трибологическими свойствами по сравнению с обычными металлами [15—18], и в настоящее время считаются потенциально легкими материалами, которые хорошо подходят для

авиационной, автомобильной, горной и других машиностроительных отраслей. Кроме того, алюминий дешевле титана и магния. Сочетание высокой прочности на разрыв и долговечности, высокого соотношения прочности и веса, хорошей износостойкости делают алюминиевые сплавы и композиты с алюминиевой матрицей хорошим вариантом для разнообразного применения в промышленности [19 — 22].

Машины и механизмы горного производства также могут быть потенциальной областью применения алюмоматричных материалов. Поэтому исследование механических и трибологических свойств перспективных алюмоматричных композитов, армированных карбидом циркония, является актуальным.

Методика эксперимента

Для синтеза алюмоматричных композитов использовали алюминиевый порошок ПА-3 с чистотой 99% (ГОСТ 6058-73), средний размер частиц которого составлял 250 — 450 мкм. В качестве наполнителя взяли порошок карбида циркония (ГОСТ 28377-89), размер частиц которого составлял 40 — 100 мкм (табл. 1).

Порошки алюминия и карбида циркония в нужной пропорции смешивали в течение трех часов в полистироловом цилиндре, который вращался со скоростью 100 об/мин. После этого однородную смесь уплотняли на одноосном прессе ПГР400 под давлением 980 МПа. Для получения заготовок длиной 8 мм и диаметром 10 мм использовалась закаленная стальная пресс-форма, а в качестве смазки — индустриальное масло. Затем заготовки спекали в алундовом тигле под плотным слоем угольного порошка в течение одного часа при температуре 640 °С.

Для анализа фазового состава композиционного материала использовали рентгеновский дифрактометр XRD 7000 (Shimadzu) и приставку для рентгеноспектрального микроанализа XFlash Detector 630M от Bruker Nano GmbH.

Для исследования микроструктуры образцов и распределения химических элементов был использован электронный сканирующий микроскоп VEGA LMS (TESCAN). Визуальное изучение структуры проводили на оптическом микроскопе Olympus BX61.

Определение твердости образцов с использованием метода Виккерса осуществлялось с помощью прибора ИТВ-30-АМ.

Нагрузка при измерении составляла 25 Н, а время выдержки — 15 с. Согласно ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, измерения проводили на поверхности образцов в пяти зонах.

Таблица 1

Основные свойства материалов[1,2]
Basic material properties

Свойства	Единица измерения	Al	ZrC
Плотность	кг/м^3	2700	6730
Твердость	HRA	—	88,5
	HV	31,5	4940
HRA C			88,5
Модуль Юнга	ГПа	68,5	412

[1] Металлы и сплавы. Справочник: Под ред. Ю.П. Солнцева. — СПб., 2003. — 1066 с.
[2] Стормс Э. Тугоплавкие карбиды. — М.: Атомиздат, 1970. — 304 с.

Изучение трибологических характеристик образцов проводили на машине трения ИИ 5018, работающей по схеме «штифт на диске». Эксперименты проводились при комнатной температуре в условиях сухого трения в соответствии с ГОСТ 23.21080 [ГОСТ 23.210-80 Обеспечение износостойкости изделий метод оценки фрикционной теплостойкости материалов. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 12 с.]. Штифт (образец) перемещался по диску диаметром 50 мм, изготовленному из закаленной стали 45ХН с твердостью HRC 55. Скорость скольжения составляла 0,52 м/с (200 об/мин). Расстояние скольжения составляло от 1 до 3 км, а нагрузка на образец изменялась от 18 до 80 Н. Износ определяли по потере массы образца Δm по формуле (1).

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

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

Для определения потери массы образцы взвешивали на электронных аналитических весах AND GR300 с точностью 0,1 мг.

Интенсивность изнашивания определяли по выражению (2):

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

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

Коэффициент трения f рассчитывали по формуле:

$$f = F/N, \qquad (3)$$

где F — сила трения, Н; N — нормальная нагрузка, Н.

Перед проведением испытаний контактные поверхности диска и образца шлифовали на наждачной бумаге, постепенно уменьшая размер абразивных частиц. Затем поверхности полировали алмазной пастой, нанесенной на сукно, после чего промывали ацетоном. Итоговый результат определяли как среднее значение из трех измерений.

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований установлено, что интенсивность износа матричного металла является достаточно высокой, и плавно понижается

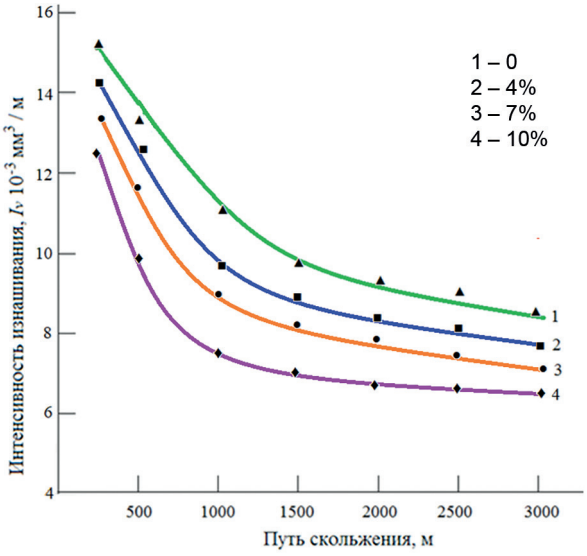

Рис. 1. Интенсивность изнашивания композитов Al-ZrC в зависимости от содержания ZrC
Fig. 1. Wear intensity of Al- ZrC composites depending on the content of ZrC

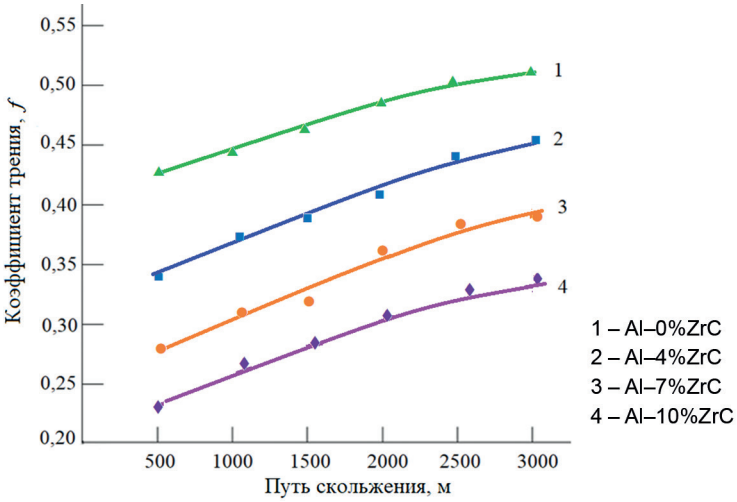

Рис. 2. Изменение коэффициента трения композитов в зависимости от содержания наполнителя и пути скольжения

Fig. 2. Friction coefficient as a function of depending on filler content and sliding distance

с удлинением пути скольжения вследствие деформации и упрочнения поверхности. Интенсивность изнашивания образцов композитного материала меньше в сравнении с матричным металлом, и, кроме того, понижается с ростом доли наполнителя (частиц ZrC) в композите и увеличением пути скольжения (рис. 1).

С увеличением пути скольжения интенсивность изнашивания образцов плавно понижается и стремится к постоянной величине, что согласуется с данными литературы [7, 23, 24]. Наблюдаемое повышение износостойкости композита с увеличением содержания доли наполнителя может быть связано с повышением твердости материала.

Коэффициент трения образцов понижается с увеличением содержания карбида циркония и повышается с увеличением пути скольжения (рис. 2).

Микроскопический анализ поверхности образцов показывает, что частицы карбида распределены в матрице относительно равномерно (рис. 3). Морфология изношенной поверхности образца характеризуется наличием канавок и валов, располагающихся параллельно друг другу. При нагрузке более 18 Н на поверхности образцов вдоль направления скольжения появляются канавки с шагом от 0,02 до 0,2 мм и глубиной свыше 8 мкм, что указывает на износ скольжения (рис. 4). Канавки, идущие параллельно направлению скольжения, вероятно, образуются из-за твердых частиц карбида, которые выкрашиваются из матрицы и царапают поверхность.

С повышением содержания наполнителя размеры и глубина канавок снижаются, и следы износа сглаживаются. В композите частицы наполнителя становятся дополнительными препятствиями для перемещения дислокаций, что повышает прочность и твердость материала, но уменьшает его пластичность. Вследствие этого потери материала матрицы уменьшаются, а количество и размеры канавок становятся значительно меньше, чем при испытаниях обычных сплавов.

Первоначально износ является адгезионным, также отмечается пластиче-

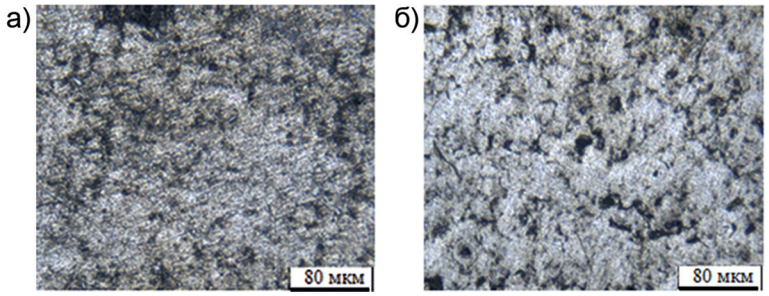

Рис. 3. Поверхность композита состава Al–4% ZrC (а), Al–10% ZrC (б) до истирания
Fig. 3. Composite composition surface Al–4% ZrC (a), Al–10% ZrC (b) before abrasion

ское течение материала с образованием небольшой полости в подповерхностном слое. Добавление в состав композитов большего количества частиц наполнителя приводит к тому, что канавки на поверхности образцов становятся менее глубокими по сравнению с чистым алюминием. Износ материала происходит уже не за счет адгезии, а за счет трения, и начинает преобладать абразивный механизм износа. Множество твердых частиц карбидов, перемещаются по поверхности и оставляют на ней мелкие царапины, которые располагаются близко друг к другу. Уменьшение глубины канавок может быть связано с тем, что частицы карбидов обладают высокой твердостью и оказывают сопротивление трению.

На поверхности, которая подверглась износу, формируются области, где концентрация кислорода выше, чем в других местах. Со временем эти области отделяются, формируя рыхлые элементы. В исследовании [24] выдвигается гипотеза, что углубления в трибослое могут появляться из-за того, что отслоившиеся части разрушаются и трескаются, образуя мелкие частицы.

Уменьшение скорости износа образцов композита происходит вследствие формирования стабильных промежуточных слоев на поверхности трения. При нагрузке более 60 Н морфология образцов существенно меняется. На поверхности трения появляются макроскопические углубления, идущие в направлении скольжения, в сочетании с канавками. Эти изменения наблюдаются как у образцов из чистого алюминия, так и у композитов.

При испытаниях износостойкости образцов отмечены процессы истирания, адгезии, вспахивания и расслоения. При соприкосновении образца с контртелом на его поверхности формируются зна-

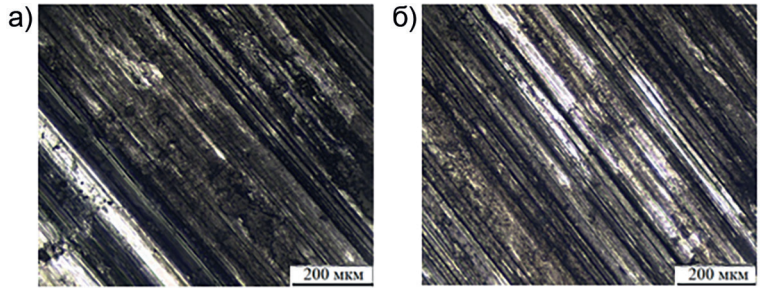

Рис. 4. Поверхность композита состава: Al–4% ZrC (а); Al–10% ZrC (после истирания на пути 3000 м) (б)
Fig. 4. Composite composition surface of the Al–4% ZrC (a); Al–10% ZrC (after abrasion at a distance of 3000 m) (b)

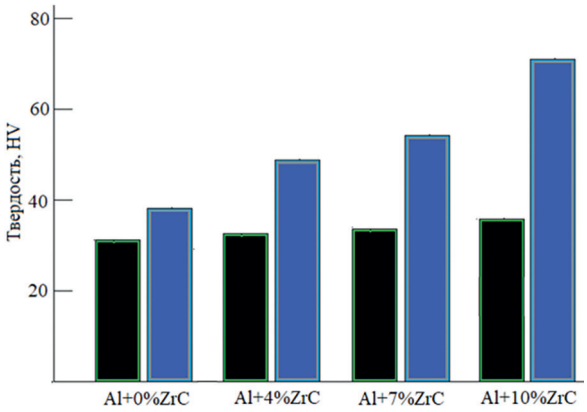

Рис. 5. Изменение твердости образцов до ■ и после ■ испытания на истирание на пути 3000 м
Fig. 5. Change in the hardness of samples before ■ and after ■ the abrasion test at a distance of 3000 m

чительные напряжения. Вследствие трения и приложенной нагрузки материал образца деформируется. Это приводит к его упрочнению и существенному увеличению твердости поверхностного слоя (рис. 5).

Повышение твердости образцов композитов после испытаний на истирание также отмечено рядом исследователей для композитов Al-Mg-ZrC [25] и Al-Si-ZrC [26].

По мере износа металла матрицы частицы карбидов выходят на поверхность образца, разрушая оксидную пленку. Фрагменты частиц контртела и оксидной пленки алюминия, контактируя с образцом, образуют канавки на его поверхности, что способствует расслоению композита.

С увеличением времени и расстояния скольжения температура на границе диск — композит повышается, формируя трибослой. В результате часть материала удаляется, что приводит к зарождению микротрещин на границе матрица — частицы наполнителя.

С увеличением пути скольжения микротрещины растут и постепенно приводят к расслаивающему износу.

Анализ поверхности образцов показывает, что износ композита происходит преимущественно из-за истирания и расслоения. Площадь расслоения образца определяется параметрами пластически деформируемых участков, где зарождаются трещины. Затем эти трещины переходят в глубокие неровные канавки. По мере увеличения расстояния скольжения с поверхности образца происходит удаление большего объема материала.

Степень износа в значительной мере определяется условиями возникновения и роста трещин на соприкасающихся поверхностях. Ключевым фактором, провоцирующим появление трещин в композитных материалах, являются межфазные границы матрица — частицы наполнителя.

В процессе износа композиционного материала образуются продукты изнашивания в основном в форме порошков и чешуек. Введение частиц наполнителя в матрицу приводит к повышению количества продуктов износа, которые возникают в процессе окислительного истирания. После проведения испытаний были обнаружены три типа продуктов износа, которые соответствуют различным механизмам изнашивания:

- частицы, имеющие примерно одинаковую форму и размер, не превыша-

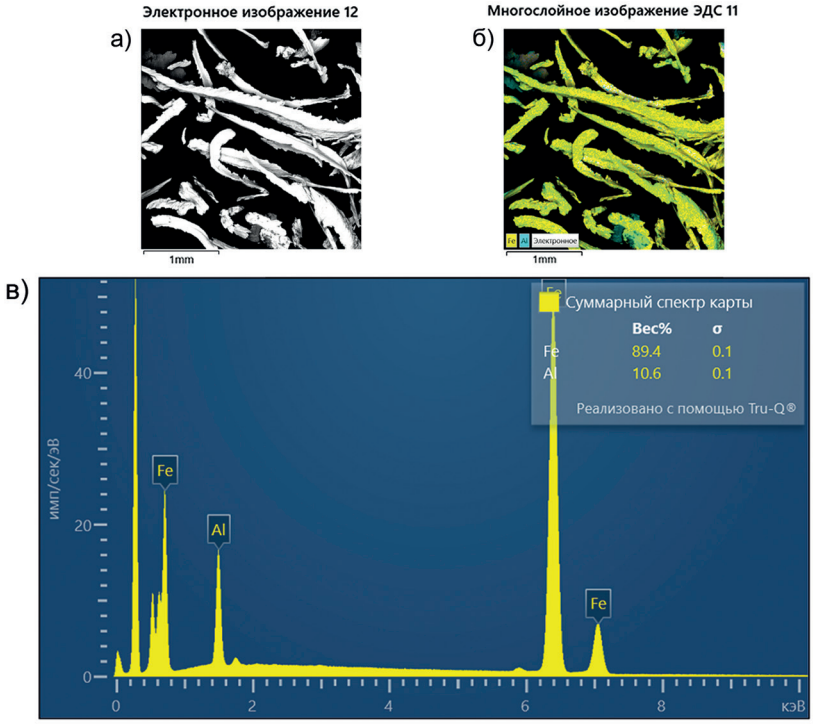

Рис. 6. Вид продуктов изнашивания композитов состава и карты распределения элементов Al–10% ZrC (а, б) и суммарные спектры карт (в) на пути 3000 м

Fig. 6. SEM images of Al–10%ZrC (a, b), Al–2ZrC and EDX analysis of reinforced composites (v)

ющий 10 мкм, которые, вероятно, образовались в результате окислительного износа;

• частицы в форме пластинок, размер которых варьируется от 15 до 90 мкм, что соотносится с механизмом адгезионного разрушения;

• фрагменты материала в форме полосок длиной до 150 мкм со следами резания на поверхности, которые образовались в результате абразивного износа.

При наибольших приложенных нагрузках (80 Н) и сухом трении формируются частицы в форме пластинок. В случае алюминия их средний размер составляет 70 мкм, а в композитных материалах — 50 мкм. Исследование с помощью рентгенофлуоресцентного анализа выявило присутствие железа в частицах, которое образовалось в результате трения армирующих элементов о контртело. В образцах композита Al-ZrC твердые частицы карбида не истираются, а как микрорезцы — строгают стальной диск.

На это указывает наличие стальной стружки, значительное количество железа и практически полное отсутствие циркония в продуктах износа (рис. 6).

Заключение

На основании проведенных исследований алюмоматричных композитов состава Al-ZrC, изготовленных методом порошковой металлургии, можно сделать следующее выводы:

• сканирующие электронные микрофотографии исследованного композита свидетельствуют о равномерном распределении армирующих частиц карбида циркония в матрице алюминия;

• прочность и твердость композитов Al-ZrC увеличиваются с повышением концентрации частиц наполнителя;

• износостойкость композитов повышается с увеличением содержания частиц карбида ZrC;

• изнашивание образцов (потеря массы) при испытаниях повышается с увеличением приложенной нагрузки и удлинением пути скольжения;

• величина коэффициента трения композитов снижается соответственно увеличению содержания частиц ZrC в матрице;

• введение частиц карбида циркония в матрицу алюминия в количестве 4—10 масс.% повышает износостойкость композита от 9—10% до 23—25%, и твердость — от 3 до 14%.

Выполненные исследования свидетельствуют о высоких механических свойствах алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных карбидом циркония, и перспективности их применения в машиностроении, в том числе, для изготовления деталей горных машин и механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Andreeva L., Abramov S.* Methods of mining machine components reconditioningand hardening by means of concentrated energy fluxes // Известия вузов. Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 7—15. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-7-15.

3. *Khazin M. L., Volegov S. A.* Mining machine parts restoration by laser surfacing // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2024. — № 4. — С. 17—25. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-17-25.

4. *Cvijović-Alagić I., Maksimović V., Jovanović M. T.* Fractographic analysis of the aluminum matrix composite prepared by accumulative roll bonding // Metallurgical and Materials Engineering. 2020, vol. 26, no. 4, pp. 349—355. DOI: 10.30544/569.

5. *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: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.32.

6. *Aynalem G. F.* Processing methods and mechanical properties of aluminium matrix composites // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, vol. 2020, no. 2, pp.1—19. DOI: 10.1155/2020/3765791.

7. *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 // Applied Sciences. 2022, vol. 12, article 8843. DOI: 10.3390/app12178843.

8. *Kim D. Y., Choi H. J.* Recent developments towards commercialization of metal matrix composites // Materials (Basel). 2020, vol. 13, no. 12, article 2828. DOI: 10.3390/ma13122828.

9. *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. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028.

10. *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.

11. *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. DOI: 10.3390/cryst12030372.

12. *Mussatto A., Ahad I. U. I., Mousavian R. T., Delaure Y., Brabazon D.* Advanced production routes for metal matrix composites // Engineering Reports. 2021, vol. 3, no. 5, article e12330. DOI: 10.1002/eng2.12330.

13. *Shinde D. M.*, *Sahoo P.*, *Davim J. P.* Tribological characterization of particulate-reinforced aluminum metal matrix nanocomposites: A review // Advanced Composites Letters. 2020, vol. 29, no. 10, 2633366X20921403. DOI: 10.1177/2633366X20921403.

14. *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, article 1255. DOI: 10.3390/ma10111255.

15. *Samal P., Vundavilli P. R., Meher A.*, *Mahapatra M. M.* Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties // Journal of Manufacturing Processes. 2020, vol. 59, pp. 131—152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.0.010.

16. *Aynalem G. F.* Processing methods and mechanical properties of aluminium matrix composites // Advances in Materials Science and Engineering. 2020, vol. 2020, article 3765791. DOI: 10.1155/2020/3765791.

17. *Kumar T. S.*, *Shalini S., Ramu M., Thankachan T.* Characterization of ZrC reinforced AA6061 alloy composites produced using stir casting process // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020, vol. 34, no. 1, pp. 143—147. DOI: 10.1007/s12206-019-1214-0.

18. *Ujah C. O.*, *Von Kallon D. V.* Trends in aluminium matrix composite development // Crystals. 2022, vol. 12, no. 10, article 1357. DOI: 10.3390/cryst12101357.

19. *Purohit R., Qureshi M. M. U., Jain A.* Forming behaviour of aluminium matrix nano Al_2O_3 composites for automotive applications // Advances in Materials and Processing Technologies. 2020, vol. 6. no. 2, pp. 272—283. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1731665.

20. *Ayar M. S.*, *George P. M.*, *Patel R. R.* Advanced research progresses in aluminium metal matrix composites: An overview // AIP Conference Proceedings. 2021, vol. 2317, article 020026. DOI: 10.1063/5.0036141.

21. *Lee K.-B., Nayak K. C., Shim C.-H., Lee H.-I., Kim S.-H., Choi H.-J, Ahn J.-P.* Tensile properties of aluminum matrix composites produced via a nitrogen-induced self-forming process // Journal of Composites Science. 2023, vol. 7, no. 11, article 457. DOI: 10.3390/jcs7110457.

22. *Kar A., Sharma A., Kumar S.* A critical review on recent advancements in aluminium-based metal matrix composites // Crystals. 2024, vol. 14, article 412. DOI: 10.3390/cryst14050412.

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

24. *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 Review. 2022, vol. 9, no. 26, pp. 1—17. DOI: 10.1051/mfreview/2022025.

25. *Sankaranarayanan G., Balaji A. N., Velmanirajan K., Gangatharan K.* Mechanical and wear behaviour of the Al-Mg-nano ZrC composite obtained by means of the powder metallurgy method // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. 2018, vol. 66, no. 5, pp. 729—735. DOI: 10.24425/125340.

26. *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. 2017, vol. 65, no. 2, pp. 149—154. DOI: 10.1515/bpasts-2017-0018. MAS

REFERENCES

1. Nikitin A. Yu. The development of mining engineering in the new realities depends on the consolidated efforts of industry participants. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 2, pp. 10—11. [In Russ].

2. Andreeva L., Abramov S. Methods of mining machine components reconditioningand hardening by means of concentrated energy fluxes. *Minerals and Mining Engineering*. 2023, no. 1, pp. 7—15. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-7-15.

3. Khazin M. L., Volegov S. A. Mining machine parts restoration by laser surfacing. *Minerals and Mining Engineering*. 2024, no. 4, pp. 17—25. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-17-25.

4. Cvijović-Alagić I., Maksimović V., Jovanović M. T. Fractographic analysis of the aluminum matrix composite prepared by accumulative roll bonding. *Metallurgical and Materials Engineering*. 2020, vol. 26, no. 4, pp. 349—355. DOI: 10.30544/569.

5. 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: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.32.

6. Aynalem G. F. Processing methods and mechanical properties of aluminium matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 2020, no. 2, pp.1—19. DOI: 10.1155/2020/3765791.

7. 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. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, article 8843. DOI: 10.3390/app12178843.

8. Kim D. Y., Choi H. J. Recent developments towards commercialization of metal matrix composites. *Materials (Basel)*. 2020, vol. 13, no. 12, article 2828. DOI: 10.3390/ma13122828.

9. 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. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.06.028.

10. Lovshenco F. G., Lozikov LA., Khabibulin A. 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]. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-3-99-111.

11. 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. DOI: 10.3390/cryst12030372.

12. Mussatto A., Ahad I. U. I., Mousavian R. T., Delaure Y., Brabazon D. Advanced production routes for metal matrix composites. *Engineering Reports*. 2021, vol. 3, no. 5, article e12330. DOI: 10.1002/eng2.12330.

13. Shinde D. M., Sahoo P., Davim J. P. Tribological characterization of particulate-reinforced aluminum metal matrix nanocomposites: A review. *Advanced Composites Letters*. 2020, vol. 29, no. 10, 2633366X20921403. DOI: 10.1177/2633366X20921403.

14. 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, article 1255. DOI: 10.3390/ma10111255.

15. Samal P., Vundavilli P. R., Meher A., Mahapatra M. M. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, vol. 59, pp. 131—152. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.0.010.

16. Aynalem G. F. Processing methods and mechanical properties of aluminium matrix composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 2020, article 3765791. DOI: 10.1155/2020/3765791.

17. Kumar T. S., Shalini S., Ramu M., Thankachan T. Characterization of ZrC reinforced AA6061 alloy composites produced using stir casting process. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2020, vol. 34, no. 1, pp. 143—147. DOI: 10.1007/s12206-019-1214-0.

18. Ujah C. O., Von Kallon D. V. Trends in aluminium matrix composite development. *Crystals*. 2022, vol. 12, no. 10, article 1357. DOI: 10.3390/cryst12101357.

19. Purohit R., Qureshi M. M. U., Jain A. Forming behaviour of aluminium matrix nano Al_2O_3 composites for automotive applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2020, vol. 6. no. 2, pp. 272—283. DOI: 10.1080/2374068X.2020.1731665.

20. Ayar M. S., George P. M., Patel R. R. Advanced research progresses in aluminium metal matrix composites: An overview. *AIP Conference Proceedings*. 2021, vol. 2317, article 020026. DOI: 10.1063/5.0036141.

21. Lee K.-B., Nayak K. C., Shim C.-H., Lee H.-I., Kim S.-H., Choi H.-J, Ahn J.-P. Tensile properties of aluminum matrix composites produced via a nitrogen-induced self-forming process. *Journal of Composites Science*. 2023, vol. 7, no. 11, article 457. DOI: 10.3390/jcs7110457.

22. Kar A., Sharma A., Kumar S. A critical review on recent advancements in aluminium-based metal matrix composites. *Crystals*. 2024, vol. 14, article 412. DOI: 10.3390/cryst14050412.

23. Mikheev R. S., Chernyshova T. A. *Alyumomatrichnye kompozitsionnye materialy s karbidnym uprochneniem dlya resheniya zadach novoy tekhniki* [Aluminum matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology], Moscow, 2013, 360 p.

24. 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 Review*. 2022, vol. 9, no. 26, pp. 1—17. DOI: 10.1051/mfreview/2022025.

25. Sankaranarayanan G., Balaji A. N., Velmanirajan K., Gangatharan K. Mechanical and wear behaviour of the Al-Mg-nano ZrC composite obtained by means of the powder metallurgy method. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2018, vol. 66, no. 5, pp. 729—735. DOI: 10.24425/125340.

26. 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*. 2017, vol. 65, no. 2, pp. 149—154. DOI: 10.1515/bpasts-2017-0018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Апакашев Рафаил Абдрахманович[1] — д-р хим. наук, профессор, профессор,
e-mail: Rafail.Apakashev@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9006-3667,
Хазин Марк Леонтьевич[1] — д-р техн. наук, профессор, профессор, e-mail: Khasin@ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6081-4474,
Адас Виталий Егорович[1] — старший преподаватель,
e-mail: adas.v@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7912-8047,
[1] Уральский государственный горный университет.
Для контактов: Хазин М.Л., e-mail: Khasin@ursmu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.A. Apakashev[1], Dr. Sci. (Chem.), Professor, Professor,
e-mail: Rafail.Apakashev@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9006-3667,
M.L. Khazin[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, e-mail: Khasin@ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6081-4474,
V.E. Adas[1], Senior Lecturer,
e-mail: adas.v@m.ursmu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7912-8047,
[1] Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: M.L. Khazin, e-mail: e-mail: Khasin@ursmu.ru.

Получена редакцией 21.07.2025; получена после рецензии 11.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 21.07.2025; received after the review 11.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.