

Исследование трибологических характеристик композиционных покрытий на основе никеля, формируемых с использованием детонационного газотермического напыления

В.В. Сирота✉, С.В. Зайцев, Д.С. Прохоренков, М.В. Лимаренко, А.С. Чуриков

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация
✉ zmas35@mail.ru

Резюме: В статье представлено исследование формирования износостойких покрытий для ответственных деталей горнопромышленного оборудования. Цель – изучить трибологические свойства покрытий на основе никеля, полученных методом высокоскоростного детонационного газотермического напыления в условиях сухого скольжения по схеме «шарик-диск». Понимание динамики износа этих покрытий в процессе эксплуатации имеет важное значение для определения наиболее эффективного материала в конкретных условиях эксплуатации. Основная задача – провести сравнительный анализ износостойкости различных типов напыляемых покрытий, таких как NiCrBSi, NiCrBSi/B4C, NiCrBSi/B4CNi и NiCr/WC. В качестве исходного материала для поверхностного нанесения покрытий использовали чистый порошок NiCrBSi и смеси порошков NiCrBSi/B4C (90/10); NiCrBSi/B4CNi (85/15); NiCr/WC (85/15). Для нанесения покрытий были использованы порошки NiCrBSi марки ПР-НХ17СР4 производства ОАО «ПОЛЕМА», NiCr/WC марки ВСНГН-85 ООО «ТЦ «Техникорд», порошок В4С марки F1200 производства ООО «Промхим» и В4CNi марки ПКБН-30 производства ООО НПО «Спецборзащита». Методом высокоскоростного детонационного газотермического напыления были получены композиционные покрытия, общей характеристикой которых является никелевая матрица. После испытаний на износ в условиях сухого скольжения по схеме «шарик-диск» поверхности композиционных покрытий были исследованы с применением сканирующей электронной микроскопии. В результате установлено, что покрытия NiCrBSi, NiCrBSi/B4CNi и NiCrBSi/B4C обладают коэффициентами трения в стабильном периоде износа на уровне 0,026, 0,024 и 0,028 соответственно, а их скорости изнашивания достигают $4,73 \times 10^{-11}$, $1,20 \times 10^{-11}$ и $1,18 \times 10^{-11}$ соответственно. Добавление В4С способствует улучшению износостойкости покрытий NiCrBSi. Покрытие NiCr/WC обладает лучшей износостойкостью среди всех рассматриваемых, но при этом характеризуется высоким коэффициентом трения, равным 0,055. Сделан вывод, что износостойкость композиционных покрытий с керамическим наполнителем превосходит износостойкость сплава NiCrBSi.

Ключевые слова: композиционные покрытия, трибология, механизм износа, микроструктура

Благодарности: Работа выполнена по соглашению №075-11-2023-017 от 13 февраля 2023 г. (государственного контракта 000000S407523Q900002). Исследование проведено на оборудовании Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета с использованием научно-исследовательского комплекса по нанесению и исследованию свойств наноструктурных функциональных покрытий (№3552744).

Для цитирования: Сирота В.В., Зайцев С.В., Прохоренков Д.С., Лимаренко М.В., Чуриков А.С. Исследование трибологических характеристик композиционных покрытий на основе никеля, формируемых с использованием детонационного газотермического напыления. *Горная промышленность*. 2024;(5S):210–214. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-210-214>

Studies of tribological characteristics of nickel-based composite coatings formed using detonation gas thermal spray

V.V. Sirota✉, S.V. Zaitsev, D.S. Prokhorenkov, M.V. Limarenko, A.S. Churikov

Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation
✉ zmas35@mail.ru

Abstract: The article presents a research into the formation of wear-resistant coatings on critical parts of the mining equipment. The objective is to study the tribological properties of the nickel-based coatings obtained by high-speed detonation gas-thermal spraying in dry sliding conditions under the “ball-disk” scheme. Understanding the wear dynamics of these coatings during operation is important for determining the most efficient material for particular operating conditions. The main task is to perform

a comparative analysis of the wear resistance of different types of sprayed coatings such as NiCrBSi, NiCrBSi/B₄C, NiCrBSi/B₄CNi and NiCr/WC. Pure NiCrBSi powder and mixtures of NiCrBSi/B₄C (90/10); NiCrBSi/B₄CNi (85/15); and NiCr/WC (85/15) powders were used as the initial material for surface coating. The following powders were used for coating: the NiCrBSi powders of the PR-NKh17SR4 grade produced by POLEMA JSC, the NiCr/WC powders of the VSNGN-85 grade produced by TC Technikord LLC, the B₄C powder of the F1200 grade produced by Promkhim LLC and the B₄CNi powder of the PKBN-30 grade produced by NPO Spetsborzaschita LLC. Composite coatings with a common characteristic of the nickel matrix were obtained using the high-speed detonation gas-thermal spraying method. Following the wear tests in dry sliding conditions under the “ball-disk” scheme, the surfaces of the composite coatings were examined using the scanning electron microscopy. It was found that the NiCrBSi, NiCrBSi/B₄CNi and NiCrBSi/B₄C coatings demonstrate the friction coefficients during the stable wear period at 0.026, 0.024 and 0.028, respectively, while their wear rates reach 4.73×10^{-11} , 1.20×10^{-11} and 1.18×10^{-11} , respectively. Addition of B₄C improves the wear resistance of the NiCrBSi coatings. The NiCr/WC coating offers the best wear resistance among all the coatings considered, but it is characterized with a high friction coefficient of 0.055. A conclusion is made that the wear resistance of the composite coatings with the ceramic filler is superior to the wear resistance of the NiCrBSi alloy.

Keywords: composite coatings, tribology, wear mechanism, microstructure

Acknowledgments: The work was performed under agreement No. 075-11-2023-017 dated February 13, 2023 (state contract 000000S407523Q900002). The study was carried out on the equipment of the High Technology Center of the Belgorod State Technological University using a research complex for the application and study of the properties of nanostructured functional coatings (No. 3552744).

For citation: Sirota V.V., Zaitsev S.V., Prokhorenkov D.S., Limarenko M.V., Churikov A.S. Studies of tribological characteristics of nickel-based composite coatings formed using detonation gas thermal spray. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):210–214. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-210-214>

Введение

Покрyтия, противостоящие механическому износу, позволяют продлить время эксплуатации различных механизмов и, как следствие, дорогостоящего оборудования в целом. В современной горной промышленности износостойкие покpытия стали неотъемлемой частью различных рабочих поверхностей машин и механизмов [1; 2]. Детонационное напыление выделяется среди различных методов термического напыления как одно из наиболее экономичных и востребованных благодаря свойствам получаемых покpытий, таких как однородность по составу и структуре, низкой пористости и прочному сцеплению с поверхностью подложки [3–5]. Технология детонационного напыления позволяет создавать защитные покpытия с выдающимися термобарьерными, коррозионностойкими и износостойкими свойствами путем введения в вязкую матрицу, чаще металлическую, нескольких твердых керамических армирующих фаз или твердых смазочных материалов [6–8].

Сплавы на основе никеля, в частности NiCrBSi, являются популярными материалами в области защиты поверхности из-за их высокой стойкости к износу и коррозии. Добавление твердых керамических фаз, таких как Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, ZrB, SiC и Cr₃C₂, к матрице NiCrBSi позволяет повысить трибологические характеристики [9–14]. Многие исследователи в течение многих лет применяют различные газотермические методы для создания покpытий на основе матрицы NiCrBSi с керамическими фазами и продолжают работать над совершенствованием данных покpытий, стремясь повысить трибологические характеристики.

Цель данного исследования заключается в изучении трибологических свойств покpытий на основе Ni, полученным методом высокоскоростного детонационного газотермического напыления в условиях сухого скольжения по схеме «шарик-диск». Понимание динамики износа этих покpытий в процессе эксплуатации имеет важное значение для определения наиболее эффективного материала в конкретных условиях эксплуатации. Основная задача

исследования заключается в сравнительном анализе износостойкости различных типов напыляемых покpытий, таких как NiCrBSi, NiCrBSi/B₄C, NiCrBSi/B₄CNi и NiCr/WC, в условиях сухого скольжения.

Материал и методы исследования

В качестве исходного материала для поверхностного нанесения покpытий использовали чистый порошок NiCrBSi и смеси порошков NiCrBSi/B₄C (90/10); NiCrBSi/B₄CNi (85/15); NiCr/WC (85/15).

Для нанесения покpытий были использованы порошки NiCrBSi марки ПР-НХ17СР4 производства ОАО «ПОЛЕМА», NiCr/WC марки ВСНГН-85 ООО «ТЦ “Техникорд”», порошок В₄С марки F1200 производства ООО «Промхим» и В₄CNi марки ПКБН-30 производства ООО НПО «Спецборзащита». На рис. 1 показана морфология порошков, исследованная методами сканирующей электронной микроскопии с помощью SEM-микроскопа, Tescan Mira 3 XMU. Порошок NiCrBSi (рис. 1, а) имеет сферическую форму, размер частиц менее 45 мкм. Порошок В₄С имеют осколочную форму частиц с острыми гранями. Частицы порошка В₄CNi имеют неправильную форму и покpыты слоем синтезированного металлического Ni. Порошок NiCr/WC имеет неправильную глобулярную форму. Отдельная частица порошка состоит из частиц карбида вольфрама, заключенных в металлическую каплю NiCr. В качестве материала подложки для нанесения покpытий использовали конструкционную сталь 40Г в виде квадратных образцов (40×40×4 мм) без какой-либо термической обработки.

Нанесение покpытий из композиции порошков осуществлялось с использованием уникальной научной установки рег. №3552744, включающей устройство высокоскоростного детонационного газотермического напыления (УВДГН). Управление технологическим процессом осуществлялось при помощи роботизированного комплекса портального типа IntelMashin LLC (Россия). С методикой подготовки подложек и нанесения покpытий методом вы-

сокоскоростного детонационного газотермического напыления можно ознакомиться в [15; 16].

Исследование трибологических характеристик покрытий проводилось на трибометре MFT-2000A (США) в условиях сухого скольжения по схеме «шарик-диск». Для проведения испытаний в качестве фрикционного материала использовался корундовый шарик диаметром 10 мм, твердостью HV 16 ГПа. Нагрузка на тело износа – 15 Н. Скорость скольжения контртела 120 об/мин по радиусу 6 мм. Коэффициент трения регистрировался автоматически в процессе скольжения. Перед трибологическими испытаниями поверхность покрытия была отшлифована до толщины 250 мкм и отполирована алмазной пастой 2,5 мкм. Глубина износа покрытий измерялась оптическим профилометром-интерферометром белого света Lambda (США). Коэффициент трения и скорость износа определяли по среднему значению результатов трех испытаний. Исследование морфологии и состава поверхности износа покрытий проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (TESCAN MIRA 3 LMU), оборудованного энергодисперсионной спектроскопией (ЭДС).

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлена морфология отшлифованных поверхностей покрытий.

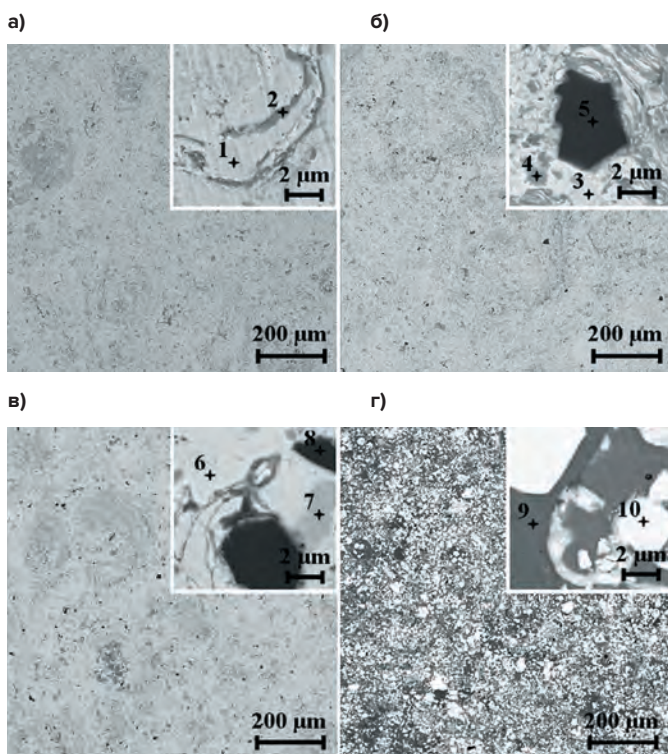


Рис. 1
Микроструктура шлифованной поверхности покрытия:
а – NiCrBSi; б – NiCrBSi/B₄C;
в – NiCrBSi/B₄CNi; г – NiCr/WC

Fig. 1
Microstructure of the polished coating surface: а – NiCrBSi, б – NiCrBSi/B₄C, в – NiCrBSi/B₄CNi, г – NiCr/WC

Поверхности каждого покрытия имеют свою уникальную морфологию. Все покрытия плотные, без трещин и пор. Как видно из рис. 1, а, покрытия NiCrBSi характеризуются компактной структурой и равномерным распределением фаз. Согласно данным ЭДС состав покрытий включает CrB (серый цвет) и матрицу на основе Ni (светло-серый цвет).

Изображения покрытий NiCrBSi/B₄C и NiCrBSi/B₄CNi на рис. 1, б, в очень похожи, полученные покрытия имеют практически одинаковую lamellarную структуру металлической матрицы с равномерным внедрением частиц карбида бора. При анализе локальных объектов микроструктуры обоих покрытий при большом увеличении (рис. 1, б, в – вставки) видно, что керамические частицы B₄C (темные участки) в покрытии полностью «облеплены» материалом металлической матрицы, не имеют пор по границе раздела керамики и металла. На рис. 1, г видно, что покрытие NiCr/WC состоит из светло-серых контрастных областей и связывающей фазы темно-серых контрастных областей. Согласно EDS-картированию присутствие светло-серых контрастных областей соответствует карбиду вольфрама. В темно-серых контрастных областях сосредоточены Ni и Cr. На рис. 2 приведены результаты определения коэффициента трения покрытий в процессе испытаний на сухое скольжение покрытий по схеме «шарик-диск».

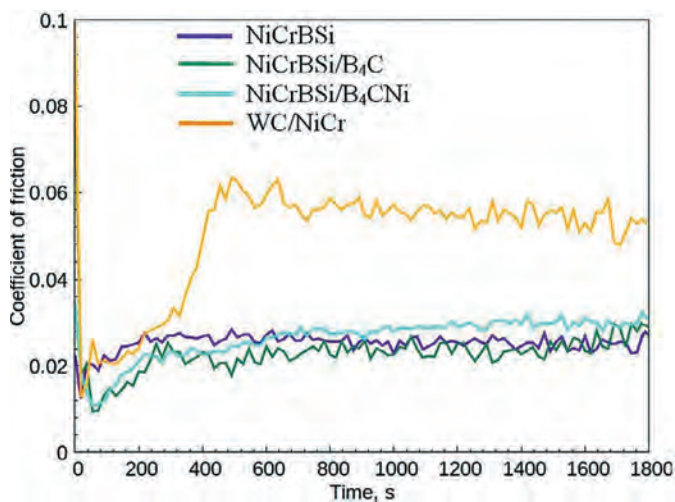


Рис. 2
Коэффициент трения

Fig. 2
Coefficient of friction

Покрытия NiCrBSi, NiCrBSi/B₄C и NiCrBSi/B₄CNi показали низкий уровень коэффициента трения на протяжении всего испытания – 0,026, 0,024 и 0,028 соответственно, что свидетельствует об их отличных трибологических свойствах. Коэффициент трения покрытия NiCr/WC остается относительно низким только на протяжении первой четверти испытания, после чего он резко возрастает до уровня выше 0,055 и остается стабильно высоким до конца испытаний. Результаты исследования глубины износа покрытий в условиях сухого трения по схеме «шарик-диск» представлены на рис. 3.

Покрытие NiCr/WC продемонстрировало минимальную глубину износа, объем и скорость износа составили $4,71 \times 10^{-9} \text{ м}^3$ и $1,85 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ соответственно. Покрытие NiCrBSi имеет самый глубокий и широкий профиль износа, объема износа $1,21 \times 10^{-7} \text{ м}^3$ и скорость изнашивания $4,73 \times 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$. Однако при введении 10 масс. % частиц B₄C в NiCrBSi скорость изнашивания покрытий снижается в 2 раза. Покрытия NiCrBSi/B₄C и NiCrBSi/B₄CNi продемонстрировали практически одинаковое поведение в процессе испытания. Объем и скорость износа для покрытий NiCrBSi/B₄C и NiCrBSi/B₄CNi составили $3,09 \times 10^{-8} \text{ м}^3$

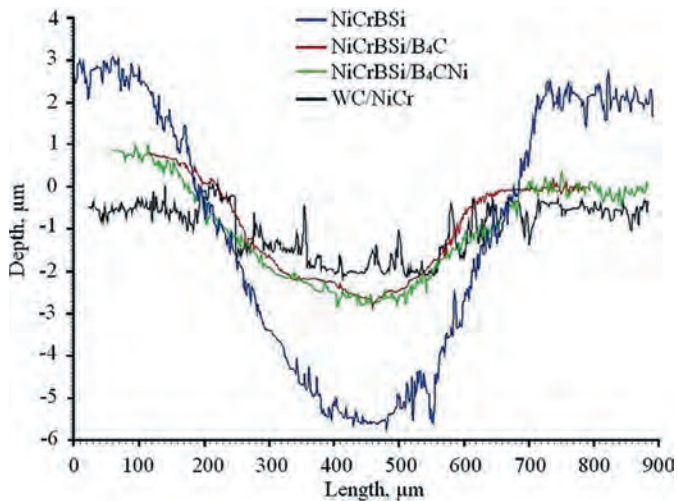


Рис. 3
Профиль поперечного сечения следов износа покрытий

Fig. 3
A cross-sectional profile of the wear marks on the coatings

и $1,20 \times 10^{-11}$ м³/Н·м, и $3,02 \times 10^{-8}$ м³ и $1,18 \times 10^{-11}$ м³/Н·м соответственно. Введение керамических частиц В₄С в матрицу NiCrBSi значительно повысило износостойкость покрытий по сравнению с металлическим покрытием NiCrBSi.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Competing Interests

The authors declare that there is no conflict of interest.

Вклад авторов

Авторы заявляют о равноценном вкладе всех соавторов в работу.

Authors' contributions

The authors declare the equal contribution of all co-authors to the work.

Список литературы / References

- Orlov V., Tynchenko V., Nizameeva A., Shalaeva D., Ageev D. Development of a multifunctional cross-platform system for automation of energy data and resource management. *E3S Web of Conferences*. 2023;460:07002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346007002>
- Shamarova N., Suslov K., Ilyushin P., Shushpanov I. Review of battery energy storage systems modeling in microgrids with renewables considering battery degradation. *Energies*. 2022;15(19):6967. <https://doi.org/10.3390/en15196967>
- Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*. 2014;880:141–145. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141>
- Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: Methodological aspect. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:912–916. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912>
- Панфилова Т.А., Тынченко В.С., Кукарцев В.А., Башмур К.А., Кондратьев В.В. К концепции выщелачивания металлосо-державшего сырья в дезинтеграторе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):239–251. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_239
Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Kukartsev V.A., Bashmur K.A., Kondratiev V.V. To the concept of leaching metal-containing raw materials in the dizintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):239–251. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_239
- Tynchenko V.S., Stashkevich A., Muzyka P., Leontieva A.A., Degtyareva K.V. Effective energy management tools: inventory management and monitoring of energy consumption by personnel. *E3S Web of Conferences*. 2023;458:01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801011>

Выводы

В рамках данного исследования изучены характеристики трения и износостойкости покрытий NiCrBSi, NiCrBSi/B₄C, NiCrBSi/B₄CNi и NiCr/WC, полученных с применением установки высокоскоростного детонационного газотермического напыления из композиционных порошков на основе никеля. Трибологические испытания проводились в условиях сухого скольжения по схеме «шарик-диск» при комнатной температуре. Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

В результате проведенного исследования установлено, что покрытия NiCrBSi, NiCrBSi/B₄CNi и NiCrBSi/B₄C обладают коэффициентами трения в стабильном периоде износа на уровне 0,026, 0,024 и 0,028 соответственно, а их скорости изнашивания достигают $4,73 \times 10^{-11}$, $1,20 \times 10^{-11}$ и $1,18 \times 10^{-11}$ соответственно. Добавление В₄С способствует улучшению износостойкости покрытий NiCrBSi. В свою очередь, покрытие NiCr/WC обладает лучшей износостойкостью среди всех рассматриваемых, но при этом характеризуется высоким коэффициентом трения, равным 0,055.

В ходе исследования установлено, что основными факторами, вызывающими износ всех изученных покрытий, являются трибоокисление и абразивный износ.

7. Голик В.И., Кукарцев В.А., Панфилова Т.А., Тынченко В.С., Конюхов В.Ю. К механохимической активации процессов выщелачивания в дезинтеграторе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):175–189. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_175
Golik V.I., Kukartsev V.A., Panfilova T.A., Tynchenko V.S., Konyukhov V.Yu. The mechanochemical activation of leaching processes in a disintegrator. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):175–189. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_175
8. Kravtsov K., Tynchenko V., Semenova E., Shalaeva D., Pinchuk I. Workflow automation and performance improvement based on PostgreSQL. *E3S Web of Conferences*. 2023;458:09022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809022>
9. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014;66:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>
10. Konyukhov V.Yu., Oparina T.A., Matasova I.Y., Modina M.A., Martyushev N.V. Ecologization of underground coal mining by means of ash use in backfill preparation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(10):123–135. Available at: <https://giab-online.ru/en/catalog/ekologizaciya-podzemnoy-ugledobychi-na-osnove-utilizacii-zoly-dl> (accessed: 04.10.2024).
11. Кукарцев В.В., Кравцов К.И., Тынченко Я.А., Панфилова Т.А. Влияние горных факторов на избыточность солей и токсичность почвы в горных условиях. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):784–797. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-784-797>
Kukartsev V.V., Kravtsov K.I., Tynchenko Ya.A., Panfilova T.A. Influence of mountain factors on salt excess and soil toxicity in mountain conditions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):784–797. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-784-797>
12. Тынченко Я.А., Кукарцев В.В., Гладков А.А., Панфилова Т.А. Оценка качества технической воды в горнопромышленном производстве на основе методов машинного обучения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(1):56–69. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-56-69>
Tynchenko Ya.A., Kukartsev V.V., Gladkov A.A., Panfilova T.A. Assessment of technical water quality in mining based on machine learning methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):56–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-56-69>
13. Vasileva V., Kukartsev V., Suprun E., Shalaeva D., Ageev D. Integration of automated information systems and architectural solutions in industrial enterprises. *E3S Web of Conferences*. 2023;458:09021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345809021>
14. Kukartsev V.A., Trunova A.I., Kukartsev V.V., Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko Y.A. et al. Increasing the efficiency of synthetic iron production by the use of new kit lining. *Metals*. 2023;13(7):1184. <https://doi.org/10.3390/met13071184>
15. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating source. *Key Engineering Materials*. 2016;712:105–111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105>
16. Tananykhin D., Grigorev M., Korolev M., Solovyev T., Mikhailov N., Nesterov M. Experimental evaluation of the multiphase flow effect on sand production process: prepack sand retention testing results. *Energies*. 2022;15(13):4657. <https://doi.org/10.3390/en15134657>

Информация об авторах

Сирота Вячеслав Викторович – кандидат физико-математических наук, Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4634-7109>; e-mail: zmas35@mail.ru

Зайцев Сергей Викторович – инженер-исследователь, Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0122-1908>; e-mail: sergey-za@mail.ru

Прохоренков Дмитрий Станиславович – инженер-исследователь, Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6455-8172>; e-mail: bstu-cvt-sem@yandex.ru

Лимаренко Михаил Витальевич – младший научный сотрудник, Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6699-6910>; e-mail: mclam@mail.ru

Чуриков Антон Сергеевич – инженер-исследователь, Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1829-2676>; e-mail: churikov.toni@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.09.2024

Поступила после рецензирования: 28.10.2024

Принята к публикации: 02.11.2024

Information about the authors

Viacheslav V. Sirota – Cand. Sci. (Phys.&Math.), Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4634-7109>; e-mail: zmas35@mail.ru

Sergey V. Zaitsev – Research Engineer, Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-0122-1908>; e-mail: sergey-za@mail.ru

Dmitriy S. Prokhorenkov – Research Engineer, Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6455-8172>; e-mail: bstu-cvt-sem@yandex.ru

Mikhail V. Limarenko – Junior Research Associate, Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6699-6910>; e-mail: mclam@mail.ru

Anton S. Churikov – Research Engineer, Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1829-2676>; e-mail: churikov.toni@mail.ru

Article info

Received: 24.09.2024

Revised: 28.10.2024

Accepted: 02.11.2024