ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(11-1):5-23
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622:62.408.8 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_5

ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПЫЛИ НА ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Абдельвахаб Агагена[1], А.В. Михайлов[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Agagena_A@pers.spmi.ru

Аннотация: Показан негативный характер воздействия абразивной мелкодисперсной железорудной пыли в рабочей зоне на интенсивность изнашивания штока и уплотнений гидроцилиндра карьерного экскаватора при погрузке железной руды. Подтверждена возможность применения бесконтактного оптического метода измерения топографии поверхности штока при его изнашивании в абразивной пылевоздушной среде, что может быть основанием для научных обсуждений с целью развития новых технологий диагностирования состояния поверхности деталей. Показаны преимущества системы оптического бесконтактного метода измерения топографии поверхности с использованием фрактальной размерности как меры шероховатости. Программное построение опорной кривой (Эббота-Файерстоуна) профиля шероховатости и вычисления на ее основе количественных параметров шероховатости делает данный метод диагностирования перспективным для текущего обслуживания штоков гидроцилиндров. Рост коэффициента шероховатости поверхности как отношение площадей контактных поверхностей к площадям неконтактируемых поверхностей на изнашиваемой протяженности штока свидетельствует в целом о снижении шероховатости поверхностей штока. Отмечено, что при значении числа рабочих циклов гидроцилиндра z = 320 тыс. наблюдается минимальное значение фрактальной размерности поверхности штока D = 2,666 и минимум среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q при постепенном снижении шероховатости поверхности штока. Значение числа циклов (z = 320 тыс.) может использоваться при корректировке регламента технического обслуживания и ремонта гидроцилиндров экскаватора в качестве 90%-го ресурса наработки на отказ.

Ключевые слова: железная руда, мелкодисперсная железорудная пыль, экскаватор, запыленность рабочей зоны, гидравлический цилиндр, изнашивание штока, шероховатость, топографии поверхности, фрактальная размерность.

Для цитирования: *Абдельвахаб Агагена, Михайлов А. В.* Влияние железорудной пыли на изнашивание поверхности штоков гидроцилиндров карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 5–23. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_5.

Iron ore dust influence on the wear surface of quarry excavator hydraulic cylinder rods

Abdelwahab Agaguena[1], A.V. Mikhailov[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Agagena_A@pers.spmi.ru

© Абдельвахаб Агагена, А.В. Михайлов. 2023.

Abstract: This article shows the negative nature of the impact of abrasive fine iron-ore dust with high concentration in the dusty working area on the intensity of the wear of the rod and seals of the hydraulic cylinder of a mining excavator when loading iron ore. The possibility of application of non-contact optical method of measuring the surface topography of the rod during its wear in the abrasive dust-air environment verified, which could be the basis for scientific discussions with the aim of developing new technologies of diagnosing the condition of the parts surface. The advantages of the system of optical non-contact method of measuring surface topography using fractal dimensionality as a roughness measure shown. The software construction of the reference roughness profile curve (Abbott-Firestone) and calculation of quantitative roughness parameters on its basis makes this method of diagnostics promising for routine maintenance of hydraulic cylinder rods. The growth of surface roughness coefficient as a ratio of the areas of contact surfaces to the areas of non-contact surfaces on the wear length of the rod indicates a decrease in the roughness of the rod surfaces. It is noted that at the number of cycles of 320 thousand. There is a minimum value of the fractal dimension of the rod surface D = 2.666 and a minimum value of the rod surface height S_q with a gradual decrease in the surface roughness of the rod. The value of the number of cycles (z = 320 thousand) can be used when adjusting the maintenance and repair schedule of excavator hydraulic cylinders as a 90% service life to failure.

Key words: iron ore, fine iron ore dust, excavator, hydraulic cylinder, dusty working area, rod wear, roughness, surface topography, fractal dimension

For citation: Abdelwahab Agaguena, Mikhailov A. V. Iron ore dust influence on the wear surface of quarry excavator hydraulic cylinder rods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1): 5-23. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_5.

Введение

В настоящее время в мире добывается 2,5 млрд т железной руды; 90% мирового объема добывается крупнейшими мировыми компаниями (Vale, Rio Tinto, BHP, FMG, Anglo American) [1]. Уровень мировой добычи железной руды по данным геологической службы США (U.S. Geological Survey) в 2019 г. составил 2,5 млрд т. Крупнейшими производителями железорудного сырья являются Австралия, Бразилия и Китай, Россия занимает пятое место (Австралия — 930, Бразилия — 480, Китай — 350, Индия — 210, Россия — 99 млн т) [2].

Увеличение объемов разработки железной руды открытым способом в значительной степени зависит от эффективности применения одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов, на работоспособность которых оказывают отрицательное влияние ряд внешних факторов: климатические и горно-геологические условия, несвоевременность замен расходных и изнашивающихся элементов гидравлических систем машин [3, 4].

Ухудшение состояния воздушного бассейна, обусловленное выбросами промышленности и транспортным комплексом, оказывает негативное воздействие на окружающую среду в целом [5]. К основным источникам выбросов в атмосферу при открытой добыче полезных ископаемых относятся движение транспортных средств по подъездным дорогам, а также погрузка рудных материалов [6].

Добыча железной руды при высоких температурах окружающей среды является характерной особенностью рудника Boukhadra, Алжир. При этом наблюдается значительное количество отказов гидроцилиндров ковша, рукояти, разрыв шлангов высокого давления и пр. Кроме того, имеется ряд дополнительных факторов, снижающих надежность элементов гидропривода и качества рабочей жидкости: высокий уровень запыленности воздуха; высокие температуры гидравлического масла; необходимость искусственного ограничения давления; низкий уровень организации технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) [7, 8].

Повышенная запыленность рабочей зоны может негативно влиять на работоспособность гидроцилиндров экскаватора. Эксплуатация оборудования в запыленной среде ведет к появлению статического слоя железорудной пыли на поверхности штоков гидроцилиндров. Свойства измельченных сыпучих материалов существенно зависят от их дисперсного состава. Железистые кварциты достаточно контрастны по прочности. Коэффициент крепости колеблется от 7,1 до 20,7 [9, 10].

Согласно документу, разработанному Британским институтом стандартов BSI (Characterization of air quality, 1994), пыль определяется как мелкие твердые частицы, условным диаметром менее 75 мкм, которые оседают под действием собственного веса, но могут некоторое время оставаться во взвешенном состоянии. Частицы пыли из образцов горных пород имеют размер от 1 до 100 мкм и обычно имеют неправильную форму [11]. Исследования Американского института стандартов US EPA (Technical assessment paper: Available information for estimating air emissions from stone mining and quarrying operations, 1998) показали, что размер частиц, концентрация и химический состав являются наиболее важными свойствами пыли. Такие индикаторы, как PM10 (частицы с аэродинамическим диаметром меньше или равным номинальным 10 мкм) и PM2,5 (частицы с аэродинамическим диаметром меньше или равным номинальным 2,5 мкм), обычно используются для определения стандартов и пределов.

В каждом рабочем цикле погрузки абразивная мелкая железорудная пыль, согласно регламенту Французского национального института исследований и безопасности о контроле концентрации кристаллического кремнезема в атмосфере на рабочем месте (1998 г.) содержание PM10 и PM2,5 составляет 25% от общего количества пыли в воздухе (35 мкг/м^3); пыль оседает на поверхностях штоков силовых гидроцилиндров экскаватора, вызывая повышение интенсивности изнашивания поверхности штоков и уплотнений гидроцилиндров. Этот процесс характерен для экскаваторов, работающих в условиях жаркого сухого климата при температуре выше 40 °С.

Триботехнические испытания являются наиболее прямым и надежным методом. Контролируемой переменной является шероховатость поверхности штока гидроцилиндра, поскольку она считается важной переменной в процессах механической обработки и обработки поверхности, герметизации контактных соединений, при этом контроль шероховатости может занимать длительное время [12].

Чистота поверхности может быть измерена двумя способами: контактным и бесконтактным. К бесконтактным методам относятся, в частности, электронная микроскопия и фотограмметрия, и их можно считать неразрушающими методами оценки поверхностей с использованием цветных изображений [13]. Для бесконтактной фиксации шероховатости часто используют классические металло-

графические микроскопы [14]. В последние годы все большее распространение получают оптические измерительные системы. Они обеспечивают бесконтактные измерения с репрезентативным охватом площади и позволяют определять характеристики текстуры поверхности. При применении оптических методов для измерения топографии поверхности происходит сбор данных и их постобработка с целью оценки текстуры поверхности, в то время как общепринятый метод контактного щупа собирает только данные профиля линии [15].

Метод щупа по-прежнему наиболее часто применяется в промышленности и имеет преимущества, такие как простота и полная стандартизация. Оптические измерения и постобработка данных еще не стандартизированы. Тем не менее, ряд методов указан в ISO 25178-6:2010. Geometrical product specifications (GPS) как подходящие методы для оценки текстуры поверхности.

Оптический метод для измерения топографии поверхности имеет большой потенциал для измерения и автоматизации процессов благодаря простоте используемой оптической системы [16]. При использовании методов определения фрактальной размерности как меры шероховатости [17] предполагается вычисление фрактальной размерности какмеры текстуры и шероховатости изображения [18]. На данный момент актуальна задача разработки и применения новых подходов в оценке свойств поверхности путем использования теории фракталов и разработанного на ее основе фрактального анализа, причем в качестве оценочного количественного параметра используют фрактальную размерность D [19]. В результате проведенного анализа научных работ можно заключить, что фрактальная размерность поверхности может применяться для определения эксплуатационных свойств поверхности деталей [20, 21].

Анализ характера отказов гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов показал, что в более чем 70% случаев гидроцилиндры выходят из строя по причине изнашивания уплотнителей. Существенное влияние на интенсивность изнашивания уплотнителей оказывает температурный режим уплотнительного узла и запыленность рабочей зоны [22, 23]. Механическое воздействие изменяет также параметры контактной поверхности штока, влияет на износостойкость и ограничивает срок службы изделия [24].

Актуальной задачей является обеспечение высокой готовности гидравлических экскаваторов при добыче железной руды в условиях жаркого сухого климата за счет повышения надежности элементов гидравлической системы, сокращения количества отказов, снижения длительности простоев в ремонте.

Цель работы состояла в экспериментальном определении физических характеристик переносимой по воздуху пыли железной руды, образующейся в рабочей зоне карьерного гидравлического экскаватора при погрузке железной руды в условиях жаркого сухого климата (месторождение Boukhadra, Алжир), и оценке параметров шероховатости поверхности штока гидроцилиндра и ее фрактальной размерности путем оптического измерения и постобработки топографии поверхности для прогнозирования текущей степени изнашивания штока в диапазоне циклов (двойных ходов) гидроцилиндров экскаватора.

Материалы и методы

Программа экспериментальных исследований включила определение износостойкости пары трения «шток–уплотнение» в нормальных условиях (без пыли) и условиях запыленности рабочей зоны штока. Шток с блоком «грязесъемник–уплотнение» устанавливался

на трибо-стенд. При лабораторных исследованиях и испытаниях, а также при статистической обработке результатов были использованы апробированные методики в соответствии с действующими стандартами.

Первый цикл экспериментов по изнашиванию пар трения «грязесъемник–уплотнение» проводился в нормальных условиях с распылением масляно-воздушной смеси (аэрозоль) вокруг рабочей зоны штока для имитации реальных условий функционирования штока.

Второй цикл проводился с дополнительным распылением пылевоздушной смеси (аэрозоль) вокруг рабочей зоны штока для имитации реальных условий функционирования штока в условиях запыленности.

Образцы железорудной пыли разных фракций массой 2 кг, использованные в этом исследовании, были взяты на месте погрузки руды после взрывных работ на руднике месторождения Boukhadra (Алжир) и доставлены экспресс-почтой.

Месторождение железной руды Boukhadra расположено в горной местности Джебель Бухадра, относится к Атласско-сахарской серии и характеризуется простой антиклинальной структурой СВ-ЮЗ [25]. Месторождение отрабатывается двумя способами: открытым (полутраншейным) и подземным (забойным, подэтажами). Широта и долгота этого участка: 35°40′ и 35°50′ северной широты и 8°01′ и 8°04′ восточной долготы [26]. Внешняя среда представляет собой засушливую зону с обычно высоким фоновым уровнем запыленности. Добытая железная руда транспортируется на металлургический комплекс Аннаба.

Распределение размеров частиц железорудной пыли проанализировано на лазерном анализаторе LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer с помощью метода лазерной дифракции. Насыпную плотность находили путем взвешивания известного объема пыли и делением найденной массы на объем [27].

Исследования методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа проводились с использованием двух микроскопов с различными источниками эмиссии электронов: вольфрамовым катодом (растровый электронный микроскоп JSM-6460LV фирмы JEOL) и катодом Шоттки (термополевой растровый электронный микроскоп JSM-7001F фирмы JEOL) в широком интервале ускоряющего напряжения и тока [28].

Целью экспериментальной части работы является анализ основных размерно-массовых и физико-химических свойств железорудной пыли. Подготовка образцов осуществлялась методом ситового анализа [29] с использованием набора сит С-200. При анализе гранулометрического состава железорудной пыли подлежат решению две задачи: определение размеров частиц и их долей различных классов крупности.

В работе принят метод ускоренных ресурсных испытаний согласно ГОСТ 23.205-79 Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима, предназначенные для ориентировочной оценки ресурса пары трения «шток–уплотнение» с имитацией эксплуатационных условий при форсированном режиме. За основу оценки долговечности пары трения принята 90%-ная наработка до отказа 480 тыс. циклов (двойных ходов) гидроцилиндра с поэтапной оценкой (z = 80; 160; 240; 320; 400 и 480 тыс. циклов) по ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования.

Лабораторный трибо-стенд состоит из жесткой рамы, между вертикальными стойками которой горизонтально закреплен образец штока. На штоке расположен блок уплотнений (грязесъемник + уплот-

Рис. 1. Внешний вид лабораторного трибо-стенда; установка грязесъемника и уплотнения на штоке
Fig. 1. Appearance of the laboratory tribo bench; installation of the mud wiper and rod seal

нение) в собственном корпусе. Корпус блока уплотнений соединен штангой с электрической машиной, которая осуществляет возвратно-поступательное движение штанги с блоком уплотнений (рис. 1). Рабочий ход блока уплотнений по штоку составляет 17 мм при регулируемой частоте возвратно-поступательного движения блока уплотнений 1000 ходов/мин.

Для проведения экспериментов использовался образец штока Ø = 20 мм, длиной 200 мм: марка стали 20MnV6; допуск на наружный диаметр f7; шероховатость *Ra* < 0,20 мкм; толщина хромового покрытия < 20 мкм; твердость хрома HRC 66-69 (HV 0,1/HV 850-1000), а также грязесъемник типа SA из полиуретана, уплотнение штока из полиуретана типа TTI и гидравлическое масло HITACHI Super EX46HN.

Каждый этап (80 тыс. циклов) разделен на 10 подэтапов, после каждого из которых на рабочей участок штока наносится масляно-воздушный и пылевоздушный аэрозоли (рис. 2). По окончании этапа шток снимается со стенда, промывается под струей горячей воды и высушивается горячим воздухом. Перед началом каждого этапа и после завершения измеряется диаметр штока микрометром рычажным МР-25 0,002 по ГОСТ 18464-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Правила приемки и методы испытаний.

Микрофотографии рабочей поверхности штока до и после изнашивания в трех разных сечениях выполнялись на металлографическом инвертированном микроскопе Leica DM ILM HC с увеличением 20х с помощью отраженного света в светлом поле. Процесс анализа микрофотографий можно охарактеризовать 4 этапами: захват изображения, анализ изображения, получение результатов и определение действия системы [30, 31].

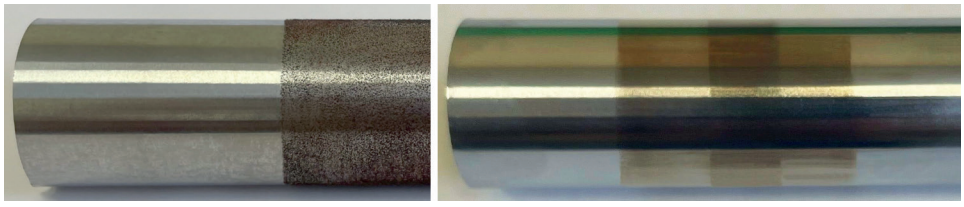

Рис. 2. Осаждение железорудной пыли на поверхности штока и шток со следами изнашивания
Fig. 2. Deposition of iron ore dust on the surface of the rod and the rod with signs of wear

Обработка микрофотографий проводилась при помощи программного обеспечения Corel PHOTO-PAINT версии 21, FastStone Image Viewer версии 7.7. Для проведения анализа выбиралась интересующая область с разрешением изображений 66×66 пикселей и глубиной 24 бита. Обработанные изображения использовались для получения таких параметров, как шероховатость и фрактальная размерность в программной среде для анализа текстуры поверхностей Gwyddion версии 2.62 (Чешский институт метрологии).

Гидроцилиндры (ГЦ) гидравлического карьерного экскаватора относятся к восстанавливаемым изделиям, которые после изнашивания могут быть возвращены в работоспособное состояние. К параметрам, характеризующим способность ГЦ выполнять требуемые функции, относят плотность сопряжения «шток–уплотнение». Изменение состояния сопряжения «шток–уплотнение» носит постепенный характер вследствие изнашивания пары трения при наличии в рабочей зоне мелкой абразивной пыли. Интенсивность изнашивания функционально связана с интенсивностью физико-механических процессов, проходящих в паре трения. Надежность функционирования пары трения в целом определяется качеством поверхностного слоя штока ГЦ и шероховатостью. Уплотнение штока имеет небольшую твердость и может поглощать твердые абразивные частицы и способствовать изнашиванию поверхности штока.

Периодические геометрические компоненты поверхности могут быть описаны методом фрактального анализа. Изотропную поверхность штока, полученную механической обработкой (тонким шлифованием), можно охарактеризовать функцией Мандельброта-Вейерштрасса с использованием фрактальных методов [32]. Согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 фрактальный размер — это показатель геометрической сложности фрактальной поверхности. Фрактальные размеры увеличиваются по мере увеличения сложности. Фрактальный размер больше или равен 2 и меньше 3 для исследуемой шероховатой поверхности. Из характеристик топографии поверхности можно получить информацию о формировании поверхности, износостойкость, уплотнение [33].

Обсуждение и результаты

Полученный образец железорудной пыли красно-коричневого цвета предоставляет собой тонкодисперсную систему сложного состава. По результатам экспериментальных измерений влажность пыли составила 1,6% при насыпной плотности 1350 кг/м^3. Распределение размеров частиц железорудной пыли проанализировано на лазерном анализаторе LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer с помощью метода лазерной дифракции (см. рис. 3).

Исследование на трех карьерах по добыче железной руды открытым способом показало, что при погрузке железной руды основным загрязнением воздушной среды являются пылевые выбросы с эмиссией 0,2439 — 0,3317 г/с и концентрацией в воздухе 1,221 — 1,458 мкг/м^3 [34].

Из представленной гистограммы следует, что средний размер частиц пыли составляет 14,072 мкм. При этом содержание частиц пыли диаметром 5,896 мкм составляет 10%. В табл. 1 показаны выборочные результаты рентгеноспектрального анализа железорудной пыли.

По результатам анализа состава железорудной пыли массовые доли оксида железа и соединений кремния являются наибольшими. Исходя из полученных данных, заметно выделение кремния на фоне остальных компонентов, что объясняет высокую абразивность железо-

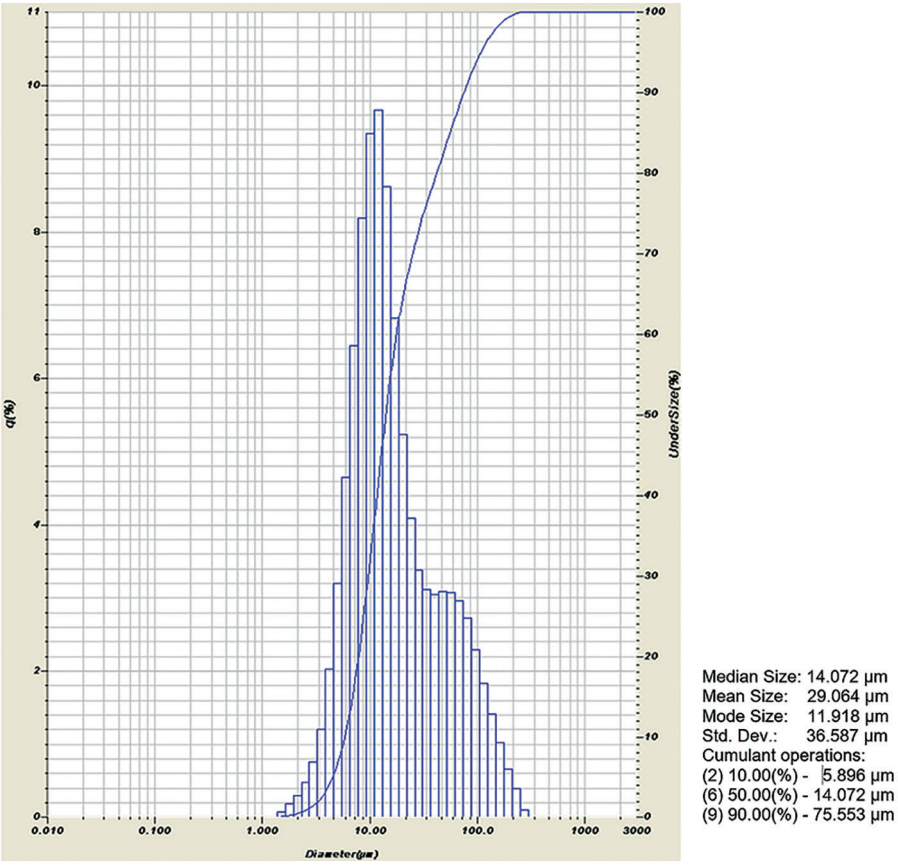

Рис. 3. Графические результаты распределения размеров частиц образца железорудной пыли
Fig. 3. Graphical results of particle size distribution of iron ore dust sample

рудной пыли, в состав которой входит около 2% Si. Эти частицы являются гранеными кристаллическими структурами, что определяет абразивность железорудной пыли в целом и ускоряет процесс изнашивания штока гидроцилиндра (см. рис. 4).

При дальнейшем увеличении рассматривались форма и размеры частиц железорудной пыли. На рис. 4 представлена полученная на растровом электронном микроскопе (РЭМ) съемка образцов железорудной пыли, по которой можно судить о форме и размерах частиц.

В результате экспериментов выявлено, что в зоне контакта штока с уплотнениями имеет место сложный вид изнашивания, обусловленный наличием

Таблица 1

Результаты рентгеноспектрального анализа железорудной пыли
Results of X-ray Spectral Analysis of Iron Ore Dust

Spectrum	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	O	Total
Spectrum 5	0,66	0,46	1,41	1,75	–	71,46	24,26	100,00
Spectrum 6	0,27	0,52	1,34	2,16	0,46	70,73	24,53	100,00

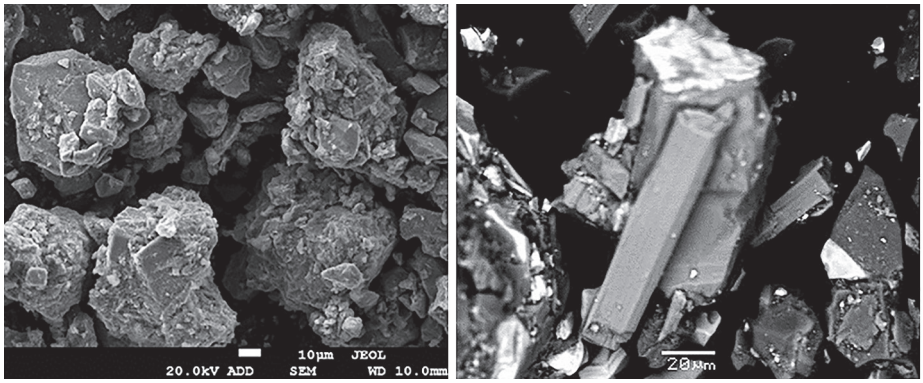

Рис. 4. Форма и размеры частиц железорудной пыли
Fig. 4. Shape and size of iron ore dust particles

повышенного количества минерального абразива, шаржированного в поверхность трения и свободно перекатывающегося в зазоре пары трения.

При эксплуатации гидроцилиндра в нормальных условиях происходит постепенное изнашивание уплотнений и поверхности штока с ростом числа циклов (двойных ходов). Изменение шероховатости поверхности штока при изнашивании в нормальных условиях в диапазоне Ra = 0,139–0,128 мкм показано на рис. 5, *а* (кривая *1*), в диапазоне Ra = 0,139–0,102 мкм при изнашивании с пылью — на рис. 5, *а* (кривая *2*).

Текстуру поверхности можно определить как повторяющиеся или случайные отклонения от номинальной поверхности, которые в действительности формируют трехмерную (3D) топографию. В этом исследовании путем сравнения и анализа экспериментально измеренных параметров трехмерной текстуры поверхности и соответствующих геометрических характеристик устанавливается практическая корреляция между микрогеометрическими характеристиками поверхности и параметрами с функциональными характеристиками поверхности штока [35].

В ходе процесса изнашивания поверхности штока происходит изменение фрактальной размерности поверхности. На рис. 5, *б* (кривая *1*) показано измене-

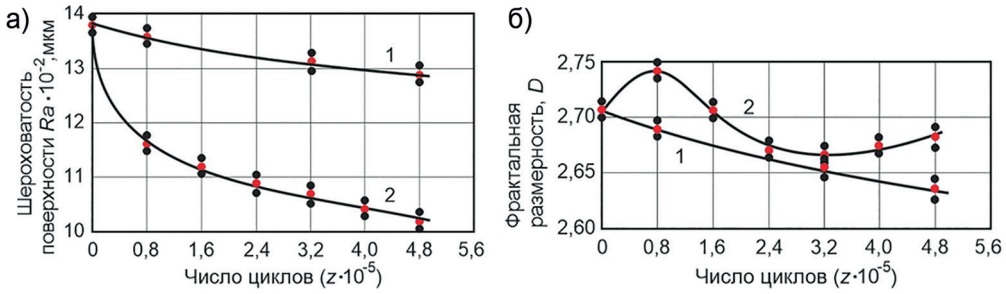

Рис. 5. Изменение шероховатости поверхности штока (а) и значения фрактальной размерности (б) в зависимости от числа циклов z в нормальных условиях (1) и в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью (2)
Fig. 5. Change of rod surface roughness (a) and value of fractal dimension (b) from number of cycle's z in normal conditions (1) and in conditions of dusting of working area of excavator with abrasive iron-ore dust (2)

Таблица 2

Изменение размеров штока и уплотнений в процессе изнашивания
Changing the size of the rod and seals during wear

Элемент	Исходный размер, мм	После изнашивания, мм	
		без пыли	с пылью
Шток (наружный диаметр)	19,980	19,979	19,974
Грязесъемник (внутренний диаметр)	19,780	19,865	19,985
Уплотнение (внутренний диаметр)	19,360	19,441	19,785

ние значения фрактальной размерности поверхности штока в диапазоне D = = 2,708 — 2,637 с ростом числа циклов при функционировании гидроцилиндра в нормальных условиях.

При функционировании в условиях запыленности на начальной стадии изнашивания штока значение фрактальной размерности увеличивается до D = = 2,747 при z = 80 тыс. циклов, затем уменьшается до минимального значения D = 2,666 при z = 320 тыс. циклов и снова возрастает до значения D = 2,679 при z = 480 тыс. циклов (рис. 5, *б*, кривая *2*). Это приводит к возникновению критической точки, что связано с критическими характеристиками рельефа поверхности. Минимум фрактальной размерности поверхности штока отмечен при значении числа циклов гидроцилиндра z = 320 тыс. При функционировании гидроцилиндра в нормальных условиях можно отметить корреляцию изменения шероховатости поверхности штока и значения фрактальной размерности с ростом числа циклов. При функционировании гидроцилиндра в условиях запыленности рабочей зоны абразивной железорудной пылью отсутствует корреляция между шероховатостью поверхности штока Ra и значением фрактальной размерности D с ростом числа циклов.

Следует отметить, что диаметр грязесъемника после изнашивания с пылью уже превышает диаметр штока, и появляется зазор 5,5 мкм, способствующий проникании пылевых частиц. На рис. 6, *а* показана величина пропуска железорудной пыли через уплотнения штока с ростом количества циклов. В табл. 2 приведены размеры штока и уплотнений до и после изнашивания. На рис. 6, *б* показано изменение среднеквадратичного значения высоты поверхности S_q штока.

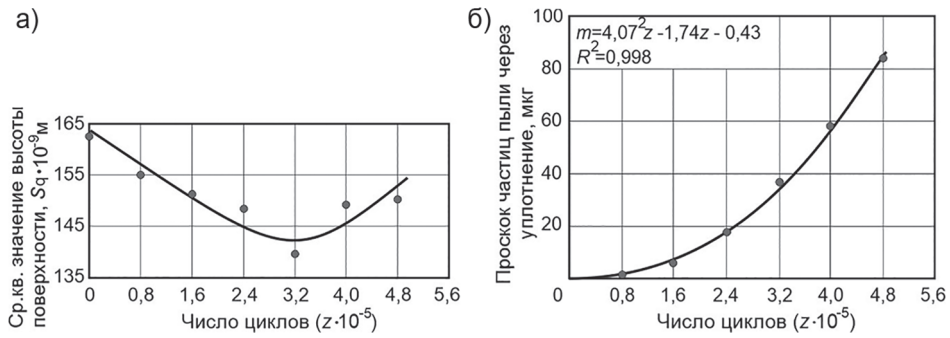

Рис. 6. Изменение среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q (а) и пропуск железорудной пыли через уплотнения штока (б) в зависимости от числа циклов z

Fig. 6. Variation of the RMS value of the rod surface height S_q (a) and the passage of iron-ore dust through the rod seals (b) from the number of cycles z

При функционировании гидроцилиндра в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью можно отметить корреляцию изменения среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q и значения фрактальной размерности D с ростом числа циклов.

Минимум среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q отмечен при значении числа циклов z = = 320 тыс.

На рис. 7 приведены профили шероховатости поверхности штока, опорные кривые профилей и 3D изображения шероховатости при изнашивании в нормальных условиях и условиях запыленности рабочей зоны.

По результатам анализа взаимосвязи формы микронеровностей поверхностей и вида относительной опорной кривой поверхности можно сделать заключение об эксплуатационных характеристиках поверхности штока. Это позволяет использовать опорную кривую при исследовании и сравнении поверхностей штока на разных стадиях изнашивания.

Максимальное значение коэффициента шероховатости поверхности штока R_{mr} = 65% соответствует значению 320 тыс. циклов гидроцилиндра. Это приводит к тому, что происходит интенсив-

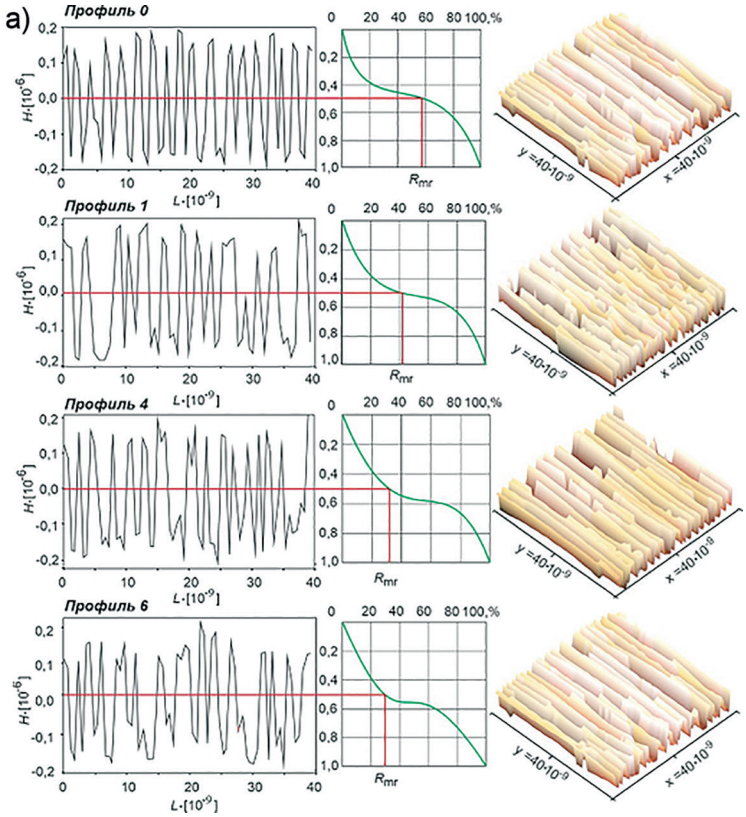

Рис. 7. Профили шероховатости поверхности штока, опорные кривые профилей и 3D изображения шероховатости при изнашивании в нормальных условиях функционирования (без пыли) (а), и в условиях запыленности рабочей зоны (б)

Fig. 7. Surface roughness profiles of the stem, profile reference curves and 3D images of roughness under normal operating conditions (dust-free) (a), and under dusty conditions of the working area (b)

ное абразивное изнашивание поверхности штока, а уплотнительные элементы штока при этом повреждаются за более короткий промежуток времени. Как видно на графиках (рис. 7), значения высоты поверхности *Ra* пересекаются глубиной *C*, что соответствует значению R_{mr}.

Параметры шероховатости штока рассчитываются по результатам областей пиков и впадин, соответственно, сегментированных от поверхности с ограниченным масштабом:

• объем материала пиков поверхности V_{mp};

• объем материала ядра (основного материала) поверхности V_{mc};

• объем пустот впадин поверхности V_{vv};

• объем пустот ядра поверхности V_{vc}.

На рис. 8 приведены профили шероховатости поверхности штока с параметрами объема пиков, пустот, материала ядра (основного материала) поверхности и пустот ядра поверхности материала при изнашивании в нормальных условиях функционирования (рис. 8, *а*) и в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью при погрузке железной руды (рис. 8, *б*).

Кривая соотношения материалов (кривая Эббота-Файрстоуна) предоставляет больше информации о характеристиках

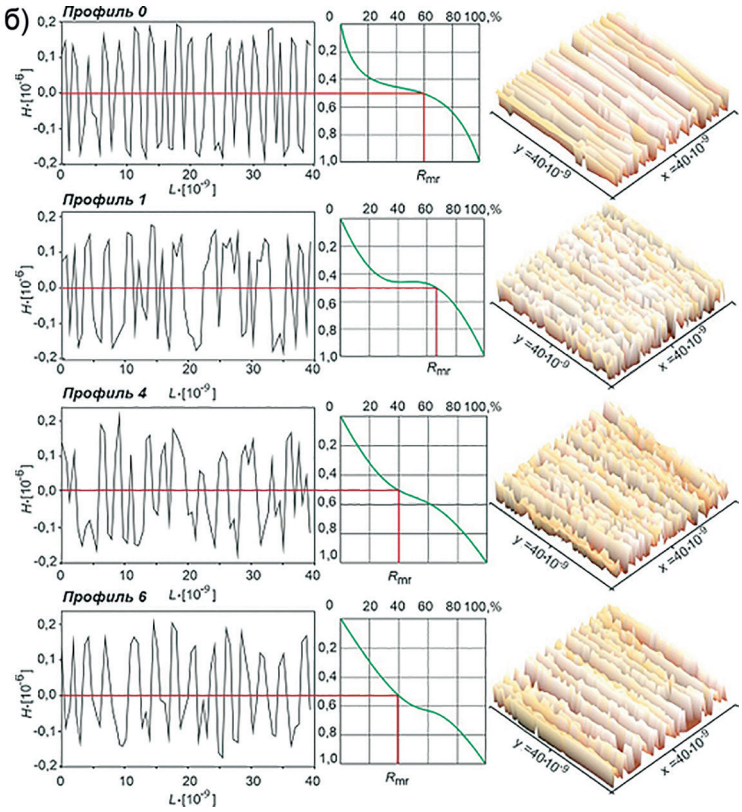

Рис. 7. Профили шероховатости поверхности штока, опорные кривые профилей и 3D изображения шероховатости при изнашивании в нормальных условиях функционирования (без пыли) (а), и в условиях запыленности рабочей зоны (б)

Fig. 7. Surface roughness profiles of the stem, profile reference curves and 3D images of roughness under normal operating conditions (dust-free) (a), and under dusty conditions of the working area (b)

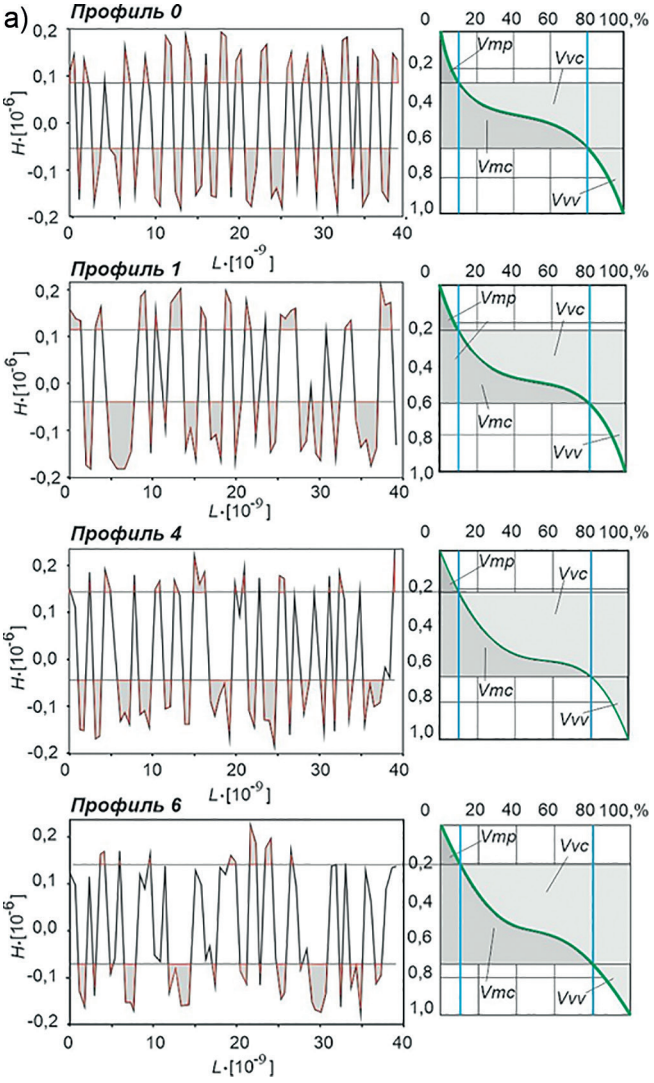

Рис. 8. Профили шероховатости поверхности штока с параметрами объема пиков, пустот, материала и пустот ядра (основного материала) при изнашивании в нормальных условиях (без пыли) (а) и с пылью (б)
Fig. 8. Surface roughness profiles of a rod with parameters of the volume of peaks, voids, material and core (basic material) voids during wear under normal conditions (without dust) (a) with dust (b)

профиля поверхности. Она описывает отношение заполненной материалом длины к расчетной длине при заданной глубине шероховатости, выраженное в процентах (см. рис. 9, *а*). Наклон в начале кривой представляет пики профиля, которые соответствуют первоначальному изнашиванию уплотнений [36].

При шлифовании поверхности штока абразивным кругом на ней остаются следы. Неровности поверхности имитируют эти следы. Вид опорной кривой поверхности после шлифования говорит о том, что неровности подвергнутся существенным деформациям при контакте с поверхностью уплотнений. Следует от-

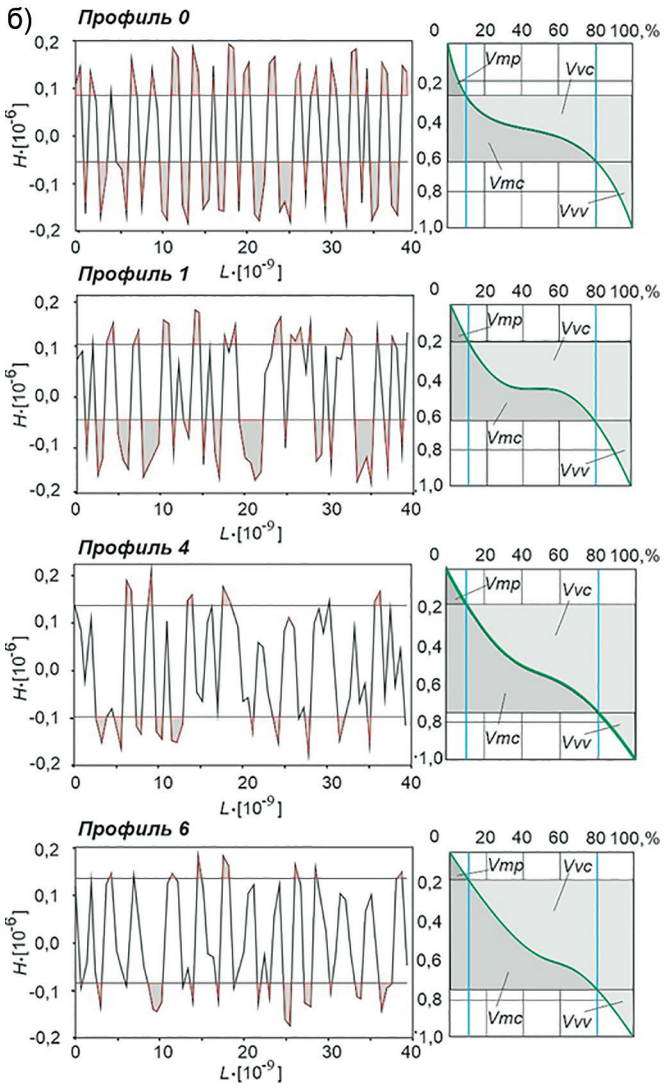

Рис. 8. Профили шероховатости поверхности штока с параметрами объема пиков, пустот, материала и пустот ядра (основного материала) при изнашивании в нормальных условиях (без пыли) (а) и с пылью (б)
Fig. 8. Surface roughness profiles of a rod with parameters of the volume of peaks, voids, material and core (basic material) voids during wear under normal conditions (without dust) (a) with dust (b)

метить наличие острых пиков на профилях шероховатости поверхности штока.

На рис. 9, *а* приведено сравнение опорных кривых профилей шероховатости поверхности штока при его изнашивании в условиях запыленности рабочей зоны. Значение коэффициента шероховатости поверхности R_{mr} нового штока составляет 32%; в диапазоне 80–480 тыс. циклов колеблется в интервале между 60 — 65%. Рост коэффициента шероховатости (отношение площадей контактных поверхностей к площадям неконтактируемых поверхностей на изнашиваемой длине штока) свидетельствует о снижении шероховатости.

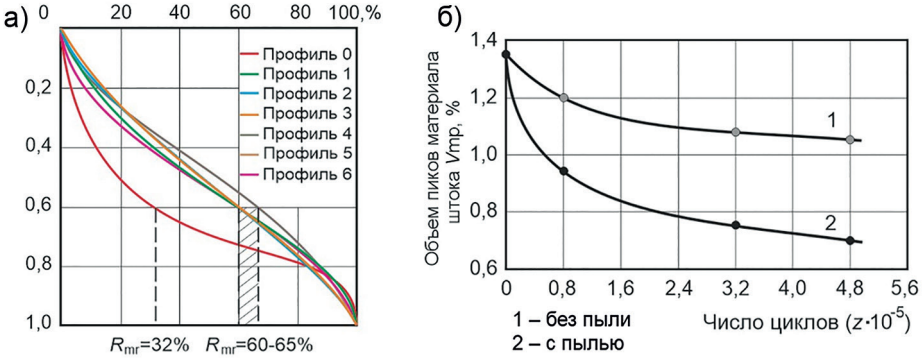

Рис. 9. Сравнение опорных кривых профилей шероховатости поверхности штока (а) и изменение объема пиков материала V_{mp} (б) при изнашивании штока

Fig. 9. Comparison of the reference curves of the surface roughness profiles of the rod (a) and the change in the volume of the material peaks V_{mp} (b) during the wear of the rod

На рис. 9, *б* показано сравнительное изменение объема пиков материала V_{mp}, %, при изнашивании штока гидроцилиндра: кривая *1* — без пыли; кривая *2* — с пылью.

Как следует из графика на рис. 9, *б*, пики поверхности изнашиваются более интенсивно с присутствием абразивной железорудной пыли, что подтверждается инструментальными замерами диаметров штока и уплотнений (см. табл. 2).

Заключение

В результате проведенных исследований показан негативный характер влияния абразивной мелкодисперсной железорудной пыли с высокой концентрацией частиц PM10 и PM2,5 на интенсивность изнашивания штока и уплотнений гидроцилиндра.

Экспериментально подтверждена возможность применения бесконтактного оптического метода измерения топографии поверхности штока при его изнашивании в абразивной мелкодисперсной пылевоздушной среде, что может быть основанием для научных обсуждений с целью развития новых технологий диагностирования состояния поверхности. Возможность программного построения опорной кривой и вычисления на ее основе количественных параметров шероховатости делает данный метод диагностирования перспективным и подходящим для текущего обслуживания штоков гидроцилиндров.

Значение коэффициента шероховатости поверхности R_{mr} штока в диапазоне 80 — 480 тыс. циклов колеблется в интервале между 60 — 65%. Рост коэффициента шероховатости свидетельствует в целом о снижении шероховатости поверхностей штока.

По результатам исследования отмечено, что при значении числа циклов (двойных ходов) 320 тыс. наблюдается минимальное значения фрактальной размерности текстуры поверхности штока D = 2,66 и минимум среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q при постепенном снижении шероховатости поверхности штока Ra. Результаты могут быть использованы в дополнение к существующим исследованиям по изнашиванию штоков и характеристике топографии поверхности. Это значение числа циклов (z = 320 тыс.) может использоваться при корректировке регламента технического обслуживания и ремонта гидроцилиндров экскаватора в качестве 90%-го ресурса наработки на отказ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Okoro Faith, Femi Oyewole Damilola, Okunlola Opeyemi, Akosua Antwi, Yannick Ngassam* Technical and economic overview of iron ore production in Australia. Politecnico di Torino. 2016, pp. 1 — 15. DOI: 10.13140/RG.2.2.16885.58087.

2. *Трушко В. Л.*, *Трушко О. В.* Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 569 — 577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.

3. *Булес П.* Обеспечение надежности работы карьерных гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на открытых разработках России: автореферат дис. канд. техн. наук. — М.: НИТУ «МИСиС». 2016. — 22 с.

4. *Shibanov D. A.*, *Ivanov S. L.*, *Shishkin P. V.* Digital technologies in modeling and design of mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

5. *Danilov A. S.*, *Wang Hetang, Cheng Sisi, Wang Haojie, He Jun, Fan Lan* Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction // Fuel. 2023, vol. 338, no. 1, article 127273. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.

6. *Singh G., Perwez A.* Estimation of assimilative capacity of the air shed in iron ore mining region of Goa // Indian Journal of Science and Technology. 2015, vol. 8, no. 23, pp. 1 — 7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i23/54671.

7. *Agaguena A., Chishegorov D., Ivanov S., Mikhailov A.* Influence of the main operational factors on the working capacity of a mining hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 326, article 00007. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600007.

8. *Шибанов Д. А.*, *Иванов С. Л.*, *Емельянов А. А.*, *Пумпур Е. В.* Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 86 — 94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

9. *Мосейкин В. В.*, *Абсатаров С. Х.* Минеральный состав железистых кварцитов Лебединского месторождения и его взаимосвязь с процессами разрушения пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — СВ 1. — С. 97 — 103.

Литературу с п. 10 по п. 18 смотри в REFERENCES.

19. *Бавыкин О. Б.*, *Вячеславова О. Ф.* Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности // Известия МГТУ «МАМИ». — 2013. — Т. 2. — № 1(15). — С. 14 — 18.

20. *Потапов А. А.*, *Булавкин В. В.*, *Герман В. А.*, *Вячеславова О. Ф.* Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур // Журнал технической физики. — 2005. — Т. 75. — № 5. — С. 28 — 45.

21. *Адмакин М. А.*, *Халимоненко А. Д.*, *Захарова В. П.*, *Нгуен Ван Дао* Обрабатываемость резанием маломагнитных высокомарганцовистых сталей // Черные металлы. — 2023. — № 2. — С. 82 — 87. DOI: 10.17580/chm.2023.02.12.

22. *Ереско С. П.* Математическое моделирование, автоматизация проектирования и конструирование уплотнений подвижных соединений механических систем: Монография. — М.: Изд-во ИАП РАН, 2003. — 156 с.

23. *Задков Д. А.*, *Габов В. В.*, *Бабырь Н. В.*, *Стебнев А. В.*, *Теремецкая В. А.* Энергоэффективная секция механизированной крепи очистного комплекса, адаптивная к условиям эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6. — С. 46 — 61. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_46.

24. *Agrawal A., Goel S., Rashid W. B., Mark P.* Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC) // Applied Soft Computing. 2015, vol. 30, pp. 279 — 286. DOI: 10.1016/ j.asoc.2015.01.059.

25. *Gadri L., Boumazbeur A., Nouioua I., Boukeloul M., Hamdane A., Mouici R., Mebrouk F., Ibrahim H.* Study of fractured rock masses deformation in Boukhadra (Tebessa) underground

mine empirical and numerical approach (NE Algeria) // Journal of Geology and Mining Research. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 23–34. DOI: 10.5897/JGMR11.041.

26. *Rouaiguia I., Bounouala M., Abdelmalek C., Idres A.* Valorization of waste rocks from Boukhadra iron ore mine for better environmental management Overview on the Boukhadra mine // Науковий вісник НГУ. — 2017. — № 6. — С. 60–67.

27. *Свергузова С. В.*, *Сапронова Ж. А.*, *Зубкова О. С.*, *Святченко А. В.*, *Шайхиева К. И.*, *Воронина Ю. С.* Пыль электросталеплавильного производства как сырье для получения коагулянта // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 279–288. DOI: 10.31897/PMI.2023.23.

28. *Гембицкая И. М.*, *Гвоздецкая М. В.* Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 401–407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.

29. *Коузов П. А.* Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд., перераб. — Л.: Химия, 1987. — 265 с.

Литературу с п. 30 по п. 36 смотри в REFERENCES. ГИАБ

REFERENCES

1. Okoro Faith, Femi Oyewole Damilola, Okunlola Opeyemi, Akosua Antwi, Yannick Ngassam *Technical and economic overview of iron ore production in Australia*. Politecnico di Torino. 2016, pp. 1–15. DOI: 10.13140/RG.2.2.16885.58087.

2. Trushko V. L., Trushko O. V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 569–577. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.

3. Bules P. *Obespechenie nadezhnosti raboty kar'ernykh gidravlicheskikh ekskavatorov pri ikh ekspluatatsii na otkrytykh razrabotkakh Rossii* [Ensuring reliability of hydraulic pit excavators during their operation at Russian surface mining], Candidate's thesis, Moscow, NITU «MISiS», 2016, 22 p. [In Russ].

4. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

5. Danilov A. S., Wang Hetang, Cheng Sisi, Wang Haojie, He Jun, Fan Lan Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction. *Fuel*. 2023, vol. 338, no. 1, article 127273. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.

6. Singh G., Perwez A. Estimation of assimilative capacity of the air shed in iron ore mining region of Goa. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015, vol. 8, no. 23, pp. 1–7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i23/54671.

7. Agaguena A., Chishegorov D., Ivanov S., Mikhailov A. Influence of the main operational factors on the working capacity of a mining hydraulic excavator. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 326, article 00007. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600007.

8. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Yemelyanov A. A., Pumpur E. V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 86–94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

9. Moseikin V. V., Absatarov S. Kh. Mineral composition of ferruginous quartzites of Lebedinsky deposit and its interrelation with the processes of rock destruction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2008, special edition 1, pp. 97–103. [In Russ].

10. Bolobov V. I., Chupin S. A., Akhmerov E. V., Plaschinskiy V. A. Comparative wear resistance of existing and prospective materials of fast-wearing elements of mining equipment. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1040, pp. 117–123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.117.

11. Hinds W. C. *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of Airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999, pp 1–14.

12. Ayala-Landeros J. G., Castaño-Meneses V. M., Becerra-Rodríguez M. B., Servín-Guzmán S., Román-Flores S. E., Olivares-Ramírez J. M. Correlation between roughness (Ra) and fractal dimension (D) using artificial vision systems for on-site inspection. *Computación y Sistemas*. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 1473 — 1485. DOI: 10.13053/cys-22-4-2785.

13. Koçer E., Horozoğlu E., Asiltürk I. Noncontact Surface roughness measurement using a vision system. *Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV´14)*. 2015, vol. 9445, pp. 4 — 5. DOI: 10.1117/12.2180683.

14. Myshkin N. K., Already A., Chizhik S. A., Choi K. Y., Petrokovets M. I. Surface roughness and texture analysis in microscale. *Wear*. 2003, vol. 254, pp. 1001 — 1009. DOI: 10.1016/ S0043- 1648(03)00306-5.

15. Buchenau T., Bruening H., Amkreutz M. *Post-processing of surface topography data for as-built metal additive surface texture characterization*. Preprint from Preprints.org, 03 Mar 2023. URL: https://www.preprints.org/manuscript/202303.0051/v1/downloadUnpaywall. DOI: 10.20944/preprints202303.0051.v1.

16. Kayahan E. O., Oktem H., Hacizade F., Nasibli H. Measurement of surface roughness of metals using binary speckle image analysis. *Tribology International*. 2010, vol. 43, pp. 307 — 311. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.06.010.

17. Shanmugavadivu P., Sivakumar V. Fractal dimension based texture analysis of digital images. *Process Engineering*. 2012, vol. 38, pp. 2981 — 2986. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.348.

18. Persson B. N. J. On the fractal dimension of rough surfaces. *Tribol Lett*. 2014, vol. 54, pp. 99 — 106. DOI: 10.1007/s11249-014-0313-4.

19. Bavykin O. B., Vyacheslavova O. F. Relationship between surface properties and its fractal dimension. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2013, vol. 2, no. 1(15), pp. 14 — 18. [In Russ].

20. Potapov A. A., Bulavkin V. V., German V. A., Vyacheslavova O. F. Investigation of microrelief of machined surfaces using methods of fractal signatures. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2005, vol. 75, no. 5, pp. 28 — 45. [In Russ].

21. Admakin M. A., Khalimonenko A. D., Zakharova V. P., Nguen Van Dao Machinability of cutting of low-magnetic high-manganese steels. *Chernye Metally*. 2023, no. 2, pp. 82 — 87. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2023.02.12.

22. Eresko S. P. *Matematicheskoe modelirovanie, avtomatizatsiya proektirovaniya i konstruirovanie uplotneniy podvizhnykh soedineniy mekhanicheskikh sistem*: Monografiya [Mathematical modeling, design automation and design of seals of moving joints of mechanical systems: Monograph], Moscow, Izd-vo IAP RAN, 2003, 156 p.

23. Zadkov D. A., Gabov V. V., Babyr N. V., Stebnev A. V., Teremetskaya V. A. Adaptable and energy-efficient powered roof support unit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 46 — 61. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_46.

24. Agrawal A., Goel S., Rashid W. B., Mark P. Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC). *Applied Soft Computing*. 2015, vol. 30, pp. 279 — 286. DOI: 10.1016/ j.asoc.2015.01.059.

25. Gadri L., Boumazbeur A., Nouioua I., Boukeloul M., Hamdane A., Mouici R., Mebrouk F., Ibrahim H. Study of fractured rock masses deformation in Boukhadra (Tebessa) underground mine empirical and numerical approach (NE Algeria). *Journal of Geology and Mining Research*. 2012, vol. 4, no. 2, pp. 23 — 34. DOI: 10.5897/JGMR11.041.

26. Rouaiguia I., Bounouala M., Abdelmalek C., Idres A. Valorization of waste rocks from Boukhadra iron ore mine for better environmental management Overview on the Boukhadra mine. *Naukoviy visnik NGU*. 2017, no. 6, pp. 60 — 67.

27. Svergusova S.V., Sapronova Zh.A., Zubkova O. S., Svyatchenko A. V., Shaikhieva K. I., Voronina Yu. S. Dust of electric steelmaking as a raw material for coagulant. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 279 — 288. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.23.

28. Gembitskaya I. M., Gvozdetskaya M. V. Transformation of grains of technological raw materials in the process of obtaining fine powders. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 401 — 407. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.

29. Kouzov P. A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of the dispersive composition of industrial dusts and crushed materials], Leningrad, Khimiya, 1987, 265 p.

30. Shivanna D. M., Kiran M. B., Kavitha S. D. Evaluation of 3D surface roughness parameters of EDM components using vision system. *Proceeded Materials Science*. 2014, vol. 5, pp. 2132 — 2141. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.416.

31. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. U. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators. *IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1399, no. 4, article 044070. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044070.

32. Vesselenyi T., Dzitac I., Dzitac S., Vaida V. Surface roughness image analysis using quasi-fractal characteristics and fuzzy clustering methods. *International Journal of Computers, Communications & Control*. 2008, vol. 3, no. 3, pp. 304 — 316. DOI: 10.15837/ijccc.2008.3.2398.

33. Podulka P. Roughness evaluation of burnished topography with a precise definition of the S-L surface. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 24, article 12788. DOI: 10.3390/app 122412788.

34. Chaulya S. K. Emission rate formulae for surface iron ore mining activities. *Environmental Modeling and Assessment*. 2006, no. 11, pp. 361 — 370. DOI: 10.1007/s10666-005-9026-2.

35. Quanren Zeng, Yi Qin, Wenlong Chang, Xichun Luo. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, vol. 149, pp. 62 — 72. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.09.044.

36. Lou S., Zhu Z., Zeng W., Majewski C., Scott P. J., Jiang X. Material ratio curve of 3D surface topography of additively manufactured parts: an attempt to characterize open surface pores. *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2021, vol. 9, article 015029. DOI: 10.1088/2051-672X/abedf9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдельвахаб Агагена[1] — аспирант,
e-mail: Agagena_A@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8425-3803,
Михайлов Александр Викторович[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: Mikhayov_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0516-7737,
[1] Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II.
Для контактов: Абдельвахаб Агагена, e-mail: Agagena_A@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abdelwahab Agaguena[1], Graduate Student,
e-mail: Agagena_A@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8425-3803,
A.V. Mikhailov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Mikhayov_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0516-7737,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: Agaguena Abdelwahab, e-mail: Agagena_A@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 20.09.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 06.07.2023; received after the review 20.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.