

ГОРНЫЕ МАШИНЫ MINING MACHINES

Научная статья

УДК 622.002

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27

Андреева Людмила Ивановна¹, Данилкин Алексей Анатольевич²

¹ Челябинский филиал Института горного дела Уро РАН

² АО «Ковдорский ГОК»

E-mail: tehnozem74@list.ru

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕХНИКИ, РАБОТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Информация о статье

Поступила:

08 февраля 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 августа 2023 г.

Принята к печати:

01 сентября 2023 г.

Опубликована:

12 сентября 2023 г.

Ключевые слова:

износ, влияющие факторы, работоспособность механизмов, трение, классификация, разрушение, отказ

Аннотация.

Отмечены особенности горнотехнических систем в условиях неопределенности внешней среды. Представлен обзор основных факторов, оказывающих существенное влияние на выход из строя деталей карьерных экскаваторов. Проведенные на горнодобывающих предприятиях исследования выявили, что на долговечность и надежность карьерных экскаваторов существенное влияние оказывает комплекс факторов, включающий конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы. К главным характеристикам конструктивных факторов относятся выбор упрочняющей обработки защитных покрытий, а также выбор оптимальных посадок в подвижных и неподвижных соединениях. К технологическим факторам можно отнести качество механической обработки деталей, соответствие марки металла и режима упрочняющей обработки технической документации. К эксплуатационным факторам относятся соблюдение регламента ремонтных работ, своевременность и качество смазки узлов трения. Обосновано, что абразивное изнашивание является основным видом механического изнашивания деталей карьерных экскаваторов. Показано, что разрушающими телами при этом виде износа являются высокотвердые частицы.

Предложена классификация деталей, узлов трения экскаваторов по видам изнашивания, в которой систематизированы узлы трения двух типов экскаваторов в зависимости от действия различных факторов. Предложены рекомендации, способствующие увеличению сроков службы деталей и снижающие вероятность возникновения непредвиденных отказов машины.

Для цитирования: Андреева Л.И., Данилкин А.А. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 4 (168). С. 20-27. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27, EDN: SZWLCC

Статья подготовлена по результатам выполнения Госзадания №075-00412-22 ПП. Тема 1 (2022-2024). Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005).

Наметившиеся в мировой и отечественной практике тенденции повышения мощности карьеров, роста концентрации производства, увеличения динамики развития горнотехнических систем сопровождаются изменением глубины и размеров карьеров.

Важной особенностью развития горнотехнических систем в условиях неопределенности внешней среды является внедрение высокопроизводительных средств горнотранспортного оборудования, увеличение единичной емкости ковшей, массы и

Таблица 1. Факторы, влияющие на работоспособность карьерных гусеничных экскаваторов

Table 1. Factors affecting the performance of mining crawler excavators

Факторы	Характеристика
Конструктивные	<ul style="list-style-type: none"> • Рациональность кинематических схем • Выбор оптимальных посадок в подвижных и неподвижных соединениях • Выбор упрочняющей обработки, защитных покрытий • Выбор материала деталей с учетом действующих статических и динамических нагрузок, рабочей температуры, износостойкости • Влияние климатических условий, запыленности среды
Технологические	<ul style="list-style-type: none"> • Соответствие марки металла (компонентов) и режимов упрочняющей обработки технической документации • Качество механической обработки деталей • Качество сборки узлов и механизмов • Качество сварки металлоконструкций • Соблюдение регламентов при испытании и обкатке
Эксплуатационные	<ul style="list-style-type: none"> • Качество выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту узлов, деталей • Своевременность и качество смазки узлов трения • Соблюдение регламентов ремонтных работ • Своевременная замена узлов и деталей • Нарушение режима работы экскаватора (некачественно взорванная горная масса) • Выполнение работ при крайне низких температурах (ниже -40°C)

параметров основного выемочно-погрузочного комплекса.

Помимо тенденции увеличения производительности горных машин и оборудования, важными факторами являются рост стоимости содержания и обслуживания такой техники, повышение требований к ее ремонтпригодности, а в случае внезапного отказа к производственному риску, который сопровождается, как правило, аварийной остановкой техники, увеличением стоимости ремонтного обслуживания и, что нередко, травматизмом ремонтного и эксплуатационного персонала [1].

В этих условиях исследования повышения надежности мощного горнотранспортного оборудования, в частности, выемочно-погрузочной техники приобретают все большее значение.

Необходимо отметить, что повышение долговечности и надежности деталей горной техники напрямую связано с совершенствованием методов проектирования, изготовления, монтажа, ремонтного обслуживания и условий эксплуатации машины. Основой для принятия конкретных решений повы-

шения надежности определенного узла и детали является информация об отказах, содержащая не только качественную и количественную оценку текущих показателей, но и раскрывающая физическую сущность происходящих процессов [2,3].

Рассмотрим более подробно этот аспект, поскольку природу возникновения отказов горных машин, как правило, не фиксируют, а в основном рассматривают только причинно-следственную связь возникновения события (отказа).

Большая часть отказов вследствие явных дефектов конструкции, изготовления и эксплуатации выявляется в процессе промышленных испытаний. Устраняются они после доработки конструкций машины. Отказы во время эксплуатации, как показывает практика, могут формироваться постепенно или возникать внезапно. Первые обычно вызваны изменением геометрической формы отдельных деталей, параметры которых могут выйти за расчетные пределы вследствие абразивного износа. Вторые вызваны стремительным изменением параметров элементов, при которых они становятся полностью неработоспособными. Например, при использовании техники под нагрузкой не в том температурном режиме (крайне низкие температуры, $>50^{\circ}\text{C}$) отказ не имеет предупредительных признаков. Скорость разрушения узла составляет порядка 10 км в секунду [4,5].

Исследования, проведенные на горнодобывающих предприятиях в рамках производственно-технического аудита, показали, что работоспособность машин и механизмов зависит от совокупности факторов на всех стадиях существования – от проектирования до завершения эксплуатации. Все факторы было предложено разделить на три основные группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные (Таблица 1).

Естественно, что нарушение оптимальности хотя бы одного из перечисленных факторов может привести к частичной или полной потере работоспособности как отдельных механизмов, так и всей машины. Картина усложняется еще и тем обстоятельством, что многие факторы взаимосвязаны, что обусловлено либо непосредственной кинематической связью отдельных механизмов, либо более сложной косвенной, действующей через целую цепочку промежуточных звеньев, не обязательно к тому же имеющих механическую природу. Может одновременно действовать не один, а несколько факторов, отрицательно сказывающихся на работоспособности машины. Из сказанного особо отметим, что большое значение в данной работе уделяется анализу влияния условий и режимов работы узлов трения на их долговечность.

В настоящее время учет отказов техники на предприятиях горнодобывающей промышленности не соответствует в полной мере предъявляемым требованиям, что создает определенные трудности в совершенствовании узлов и механизмов, в повышении их долговечности и ремонтпригодности.

Как показывает опыт эксплуатации, основной причиной выхода машин и механизмов из строя является изнашивание сопрягаемых рабочих по-



Комментарий: недопустимый абразивный износ (свыше 35-40%) кулачков ведущих колес. Сколы обода ведущих колес.

Comment: unacceptable abrasive wear (over 35-40%) of the cams of the driving wheels. Chipped rim of the driving wheels.

Рис. 1. Абразивное изнашивание деталей экскаватора

Fig. 1. Abrasive wear of excavator parts



Комментарий: недопустимый абразивный износ боковых стенок и режущей части ковша.

Comment: unacceptable abrasive wear of the side walls and the cutting part of the bucket.

Рис. 2. Абразивное изнашивание деталей экскаватора

Fig. 2. Abrasive wear of excavator parts

верхностей деталей. Статистика показывает, что более 80% узлов и механизмов выходит из строя в результате износа деталей, работающих на трение – подшипников, цапф, зубчатых колес, деталей уплотнений, муфт, шлицевых соединений, скользящих направляющих и т.д.

На износ материалов оказывает влияние действующая на узел трения нагрузка и скорость скольжения. Так, от нагрузки зависит фактическое давление в зоне контакта, которое влияет на интенсивность изнашивания. Скорость скольжения определяет время существования единичной фрикцион-

ной связи и, следовательно, скорость деформирования материалов. От скорости скольжения зависит мощность тепловыделений и температура в контакте. Поэтому следует рассматривать износ как следствие целого ряда конструктивных и эксплуатационных факторов, основными среди которых являются характер перемещений контактирующих поверхностей, вид контакта, защищенность от абразивной среды, вид смазывающего материала, твердость и шероховатость контактирующих поверхностей, физико-механические показатели материала сопрягаемых деталей и нагруженность узла трения [6,7].

Неудовлетворительное состояние шероховатости поверхностей сопрягаемых деталей приводит к увеличению износа на один-два порядка. Установлено, что основными видами механического изнашивания и повреждений рабочих поверхностей деталей экскаваторов являются абразивное изнашивание, изнашивание вследствие пластического деформирования металла рабочих поверхностей, изнашивание вследствие усталостного и хрупкого разрушения металла рабочих поверхностей.

Абразивное изнашивание является главным видом механического изнашивания деталей экскаваторов. Этому виду подвергаются рабочие поверхности тормозных фрикционных пар, зубьев зубчатых колес, цапф, шеек валов и осей, контактирующих с подшипниками скольжения, кулачков ведущих колес гусениц, ковшей и т.д. (Рис. 1,2).

Разрушающими телами при этом виде износа являются высокотвердые частицы, которые в результате многократного воздействия производят отделение частиц деталей посредством микрорезания, пластического деформирования и усталостного многоциклового разрушения. В зависимости от интенсивности воздействия абразивных частиц, уровня вызываемых ими напряжений и назначения деталей были выделены несколько видов абразивного износа.

Изнашивание в абразивной массе – т.е. изнашивание свободными, жестко не закрепленными абразивными частицами. Закрепленность частиц повышается по мере увеличения плотности грунтов, которая в свою очередь зависит от их влажности, а также степени их смерзания.

При исследовании в абразивной массе было обнаружено, что при $H_m/H_a > 0,5 \div 0,7$ (где H_m и H_a – микротвердости материала и абразивных частиц) повышению твердости соответствует более сильный прирост износостойкости, чем при меньших значениях H_m/H_a . Увеличение износостойкости сталей можно также получить повышением содержания углерода и карбидообразующих элементов. При изотермической обработке при значительно меньшей твердости можно получить те же значения абразивной износостойкости, которые достигаются обычной закалкой.

Изнашивание деталей трущихся сопряжений при наличии в контакте абразивных частиц происходит при попадании абразивных частиц в зазор пары трения. Чем прочнее абразивная частица, тем больше глубина ее внедрения до разрушения и связанный с этой глубиной внедрения износ. Механическая прочность абразивной частицы определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{4N}{\pi d^2}$$

где:

σ – условное обозначение;

N – нагрузка, разрушающая единичное абразивное зерно;

d – диаметр частицы.

Изнашивание металла практически начинается при абразивных частицах размером 5 мкм, а с увеличением размеров до 100 мкм скорость изнашивания повышается. При дальнейшем увеличении размеров абразивных частиц скорость изнашивания остается постоянной [8,9,10].

Изнашивание вследствие пластического деформирования – это повреждения поверхностей, при которых металл вследствие больших контактных напряжений пластически деформируется и вытесняется из рабочей зоны. Вытесненный металл образует так называемый «накат» по поверхности качения опорных и натяжных колес гусеничного хода, на зубьях зубчатых колес и др. Кроме того, многократные упругопластические деформации микрообъемов металла становятся составной частью общего процесса механического изнашивания.

Методы снижения: объемная и поверхностная закалка с последующим низкотемпературным отпуском; химико-термическая обработка деталей (цементация, азотирование и др.), ионно-лучевая и лазерная обработка поверхностей трения [11,12].

Условия и характеристики работы узлов экскаваторов предложено классифицировать следующим образом:

- относительное перемещение деталей;
- вид контакта сопряженных поверхностей;
- абразивность окружающей среды и защищенность от абразивной среды;
- вид смазки;
- физико-химические характеристики сопряженных деталей;
- нагрузка;
- скорость скольжения.

Проведенные на горнодобывающих предприятиях исследования влияния различных факторов на износ деталей экскаваторов ЭКГ-15 позволили систематизировать узлы трения и определить степень их защищенности от абразивной среды (Рис. 3, Таблица 2).

По степени защищенности (Таблица 2) пары трения ковша экскаватора ЭКГ-15 можно разделить на 3 типа: 1 – без защиты (пара трения не защищена никакими средствами от прямого воздействия абразивной среды), 2 – ограниченная защита (проник-

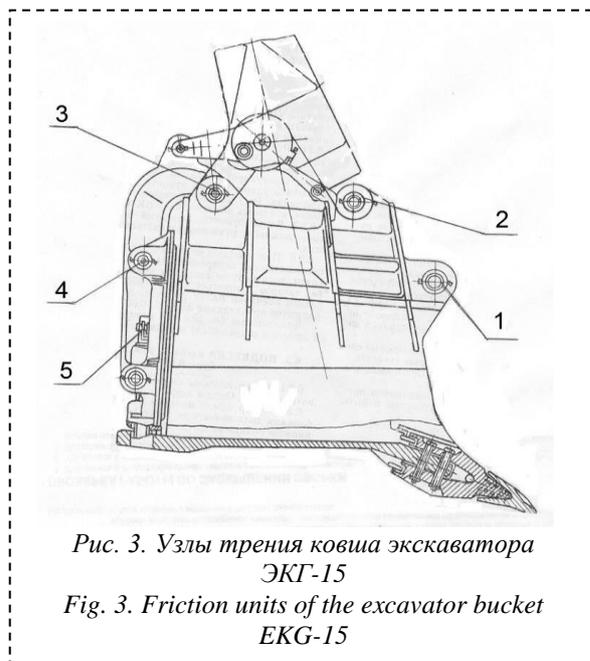


Рис. 3. Узлы трения ковша экскаватора ЭКГ-15

Fig. 3. Friction units of the excavator bucket EKG-15

новение абразива через зазоры и неплотности), 3 – защита с помощью различных видов уплотнений.

Такой подход рекомендуется использовать для сравнительной оценки условий работы сопрягаемых поверхностей с целью определения влияния тех или иных факторов на изнашивание деталей и дальнейшего конструктивного совершенствования узлов трения [12,13,14].

Хорошие результаты для обеспечения надежности деталей дает упрощение конструкции, максимальное использование стандартных элементов и унифицированных деталей, т.к. они обычно имеют тщательную проработку и проходят всесторонние испытания, в связи с чем вероятность возникновения отказов значительно снижается.

Не менее важным аспектом является совершенствование технологических процессов. К ним можно отнести широкое применение неразрушающего контроля (особенно при изготовлении заготовок – отливок, поковок); применение методов упрочнения деталей, как при изготовлении на заводе, так и на ремонтных заводах; точное соблюдение посадок в сопряжениях, термообработка сварных швов.

Также следует привести следующие рекомендации, способствующие увеличению сроков службы деталей: эксплуатация экскаваторов в соответствии с их назначением и технической характеристикой, формирование эффективной стратегии ремонтной службы, качественная подготовка забоя, соответствие гранулометрического состава горной массы параметрам ковша, выемка породы без совмещения черпанья с разворотом рабочего оборудования, строгий контроль и замена уплотнительных устройств.

Заключение

Необходимо отметить, что в последние годы на горнодобывающих предприятиях значительно увеличился парк горной техники и оборудования – как отечественного, так и импортного производства. Перед собственниками предприятий стоит важная задача: обеспечение и поддержание горных машин

Таблица 2. Узлы трения ковша экскаватора ЭКГ-15
Table 2. Friction units of the excavator bucket EKG-15

№ Позиции	Наименование сопрягаемых деталей	Схема	Относительное перемещение деталей	Вид контакта	Зона изнашивания рабочей поверхности	Абразивность среды / Защищенность от абразивной среды	Вид смазки	Вид изнашивания
1	Ось Коромысло Втулка		неподвижное соединение	по поверхности	местная	<u>сильная</u> 2	ограниченная	Абразивное
2	Ось Втулка Втулка		неподвижное соединение	по поверхности	местная	<u>сильная</u> 1	без смазки	Абразивное. Пластическое деформирование
3	Ось Втулка Втулка		неподвижное соединение	по поверхности	местная	<u>сильная</u> 1	без смазки	Абразивное. Пластическое деформирование
4	Ось Плита днища Петля днища Плита днища		неподвижное соединение	по поверхности	местная	<u>сильная</u> 1	без смазки	Абразивное. Пластическое деформирование
5	Рычаг Вилка Ось		малоподвижное соединение	по поверхности	местная	<u>сильная</u> 1	без смазки	Абразивное. Пластическое деформирование

в техническом состоянии, позволяющем достигать планируемые объемы добычи и реализации конечного продукта. Кроме конструкторско-технологической оптимизации и использования факторов эксплуатационного характера, наиболее эффективным методом повышения надежности машин в условиях развития горнотехнических систем является продление ресурса деталей упрочнением поверхности сопряжений, что в перспективе позволит избежать внезапных отказов техники, снизить производственные риски и себестоимость добычи полезного ископаемого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анистратов К. Ю. Анализ рынка карьерных экскаваторов и самосвалов в РФ и странах СНГ // Горная промышленность. 2012. №2 (102). С. 16–19.
2. Герике Б. Л., Богомолов И. Д., Дрыгин С. Ю. Анализ технического состояния экскаваторного парка угольных разрезов Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. №6–1 (43). С. 46–49.
3. Андреева Л. И., Коростылев В. А., Хан К. О. Оценка технического состояния экскаваторов для определения целесообразности их дальнейшей эксплуатации // Горное оборудование и электромеханика. 2011. №6. С.12–16.

4. Пумпур Е. В., Князькин В. И., Сафрончук К. А., Иванов С. Л. Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). №12 (специальный выпуск 41). 19 с. М. : Издательство «Горная книга», 2019.

5. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of dynamic properties of mine excavator hoisting mechanism versus design parameters of operation equipment // Journal of Physics: Conference Series, 2018. 1118 (1), 012054.

6. Степанова Е. Ю., Барсуков Г. В., Степанов Ю. С. Прорывные технологии нового поколения формообразования пространственно-сложных поверхностей наукоемких изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. №8–2.

7. Pathak S., Saha G. C. Development of Sustainable Gold Spray Coatings and 3D Additive Manufacturing Components for Repair / Manufacturing Applications: A Critical Review // Coatings. 2017. Т. 7. № 8. С. 122–134.

8. Лагунова Ю. А., Хорошавин С. А., Набиуллин Р. Ш., Калянов А. Е. Анализ металлоконструкций стрелы карьерного экскаватора методом неразрушающего контроля // Транспортное,

горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 15. С. 115–123. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-115-123>.

9. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Анистратов Ю. И., и другие. Под редакцией Анистратова К. Ю. М.: ООО «Система максимум», 2019. 640 с.

10. Масляков Н. С., Островский М. С. Новая технология оперативного изготовления запасных частей в ремонтном производстве горных предприятий // Сборник научных трудов, семинар «Современные технологии в горном машиностроении», 2014. С. 442–452.

11. Lee S. G., Ma Y.-S., Thimm G. L., Verstraeten J. Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul // Computer in industry. 2008. 59. P. 296–303.

12. Lucchetta G. et al. Investigation and characterization of Stellite-based wear-resistant coatings applied

to steel moulds by cold-spray // CIRP Annals. 2015. Т. 64. №1.

13. Ганин А. Р., Донченко Т. В., Шибанов Д. А. Современные инженерные решения и практический опыт эксплуатации карьерных экскаваторов ЭКГ018Р/20К производства «ИЗ-КАРТЭКС» // Горное дело. 2014. №1 (92). С. 40–47.

14. Болотнев А. Ю. Повышение надежности базовых узлов металлоконструкций карьерных экскаваторов в условиях Севера: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.06 / Болотнев Александр Юрьевич; [Место защиты: Иркутск. гос. техн. ун-т]. Иркутск, 2009. 115 с.

15. Лобур И. А., Шаулев Н. М., Захаров А. Г. Об эксплуатационной надежности электромеханических систем карьерных гусеничных экскаваторов // В сборнике: Энергетика и энергосбережение: теория и практика материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2017. С. 312.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Андреева Людмила Ивановна, гл. науч. сотр., доктор техн. наук, Челябинский филиал Института горного дела Уро РАН, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 30, оф. 718, e-mail: tehnozem74@list.ru

Данилкин Алексей Анатольевич, гл. инженер, АО «Ковдорский ГОК», Мурманская обл., г. Ковдор, ул. Сушачева, 5

Заявленный вклад авторов:

Андреева Людмила Ивановна – постановка исследовательской задачи в соавторстве; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследований; формирование структуры основных задач; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; аналитические расчеты; выводы; формулировка заключения.

Данилкин Алексей Анатольевич – постановка исследовательской задачи в соавторстве; обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных; написание текста; аналитические расчеты; формулировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27

Lyudmila I. Andreeva¹, **Alexey A. Danilkin**²

¹ Chelyabinsk branch of the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

² JSC "Kovdorsky GOK"

E-mail: tehnozem74@list.ru

ASSESSMENT OF FACTORS INFLUENCING THE PERFORMANCE OF EQUIPMENT OPERATING IN THE CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF MINING SYSTEMS



Article info

Received:

08 February 2023

Abstract.

The features of mining systems in the conditions of uncertainty of the external environment are noted. An overview of the main factors that have a significant impact on the failure of parts of quarry excavators is presented. Studies conducted at mining enterprises have revealed that the durability and reliability of quarry excavators are significantly influenced by a com-

Accepted for publication:
15 August 2023

Accepted:
01 September 2023

Published:
12 September 2023

Keywords: wear, influencing factors, operability of mechanisms, friction, classification, destruction, failure.

plex of factors, including: design, technological and operational factors. The main characteristics of design factors include: the choice of reinforcing treatment of protective coatings, as well as the choice of optimal landings in movable and fixed joints. Technological factors include: the quality of machining of parts, compliance with the brand of metal and the mode of hardening processing of technical documentation. Operational factors include: compliance with the regulations of repair work, timeliness and quality of lubrication of friction units. It is proved that abrasive wear is the main type of mechanical wear of parts of quarry excavators. It is shown that the destructive bodies in this type of wear are highly solid particles.

The classification of parts, friction units of excavators by types of wear is proposed, in which the friction units of two types of excavators are systematized depending on the action of various factors. Recommendations are proposed to increase the service life of parts and reduce the likelihood of unforeseen machine failures.

For citation: Andreeva L.I., Danilkin A.A. Assessment of factors influencing the performance of equipment operating in the conditions of development of mining systems. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2023; 3(168):20-27 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27, EDN: SZWLGC

REFERENCES

1. Anistratov K.Yu., Gerike B.L., Bogomolov I.D., Drygin S.Y. Analysis of the market of quarry excavators and dump trucks in the Russian Federation and CIS countries. *Mining industry*. 2012. №2 (102). Pp. 16–19.
2. Gerike B.L., Bogomolov I.D., Drygin S.Y. Analysis of the technical condition of the excavator park of coal mines of Kuzbass. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014; 6-1(43):46–49.
3. Andreeva L.I., Korostylev V.A., Khan K.O. Evaluation of the technical condition of excavators to determine the feasibility of their further operation. *Mining equipment and electromechanics*. 2011; 6:12–16.
4. Pumpur E.V., Knyazkin V.I., Safronchuk K.A., Ivanov S.L. Assessment of factors influencing the choice of excavator maintenance strategy. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 12 (special issue 41):1. M.: Publishing house "Mountain Book".
5. Kuvshinkin S.U., Zvonarev I.E., Ivanova P.V., Relationship of dynamic properties of mine excavator hoisting mechanism versus design parameters of operation equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1118 (1):012054.
6. Stepanova E.Yu., Barsukov G.V., Stepanov Yu.S. Breakthrough technologies of a new generation of shaping of spatially complex surfaces of high-tech products. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2016; 8–2.
7. Pathak S., Saha G.C. Development of Sustainable Gold Spray Coatings and 3D Additive Manufacturing Components for Repair / Manufacturing Applications: A Critical Review // *Coatings*. 2017; 7(8):122–134.
8. Lagunova Yu.A., Khoroshavin S.A., Nabiullin R.Sh., Kalyanov A.E. Analysis of metal

structures of a quarry excavator boom by non-destructive testing. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2022; 15:115–123. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-15-115-123>.

9. Open-pit mining – XXI century. Guide. Anistratov Yu.I. and others. Edited by Anistratov K.Yu. M.: LLC "System maximum": 2019. 640 p.

10. Maslyakov N.S., Ostrovsky M.M.S. New technology of operational manufacturing of spare parts in the repair production of mining enterprises. *Collection of scientific papers, seminar "Modern technologies in mining engineering"*. 2014. Pp. 442–452.

11. Lee S. G., Ma Y.-S., Thimm G. L., Verstraeten J. Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul. *Computer in industry*. 2008; 59:296–303.

12. Lucchetta G. et al. Investigation and characterization of Stellite-based wear-resistant coatings applied to steel moulds by cold-spray. *CIRP Annals*. 2015; 64(1).

13. Ganin A.R., Donchenko T.V., Shibanov D.A. Modern engineering solutions and practical experience of operation of quarry excavators EKG018R/20K produced by IZ-KARTEX ... *Mining*. 2014; 1(92):40–47.

14. Bolotnev A.Yu. Improving the reliability of the basic components of metal structures of quarry excavators in the conditions of the North: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.05.06 / Bolotnev Alexander Yuryevich; [Place of defense: Irkut. state Technical University. un-t]. Irkutsk, 2009. 115 p.

15. Lobur I.A., Shaulev N.M., Zakharov A.G. On operational reliability of electromechanical systems of quarry crawler excavators. *In the collection: Power engineering and energy saving: theory and practice materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 312.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Lyudmila I. Andreeva, chief researcher, Dr. Sc. in Engineering, Chelyabinsk branch of the Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Chelyabinsk, st. Entuziastov, 30, office 718, e-mail: tehno-rem74@list.ru

Alexey A. Danilkin, chief engineer, JSC "Kovdorsky GOK", Murmansk region, Kovdor, Sukhacheva str., 5

Contribution of the authors:

Lyudmila I. Andreeva – formulation of a research task in co-authorship; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of research; formation of the structure of the main tasks; scientific management; review of relevant literature; analytical calculations; conclusions; formulation of the conclusion.

Alexey A. Danilkin – formulation of a research task in co-authorship; review of relevant literature; data collection and analysis; writing a text; analytical calculations; formulation of conclusions.

Author have read and approved the final manuscript.

