

## Научная статья

УДК 622.002

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-33-39

Андреева Людмила Ивановна<sup>1</sup>, Абрамов Сергей Васильевич<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт горного дела Уро РАН, Челябинский филиал<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства

\*E-mail: tehnozem74@list.ru

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ  
ЭКСКАВАТОРОВ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ****Информация о статье**

Поступила:

15 сентября 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 октября 2022 г.

Принята к печати:

14 октября 2022 г.

**Ключевые слова:**

метод восстановления, износ поверхности, отказ, простой, эффективность, относительная себестоимость.

**Аннотация.**

Представлен обзор наиболее эффективных и применяемых методов восстановления и упрочнения деталей экскаваторов циклического действия на горнодобывающих предприятиях России с учетом характера нагружения, условий эксплуатации, вида изнашивания деталей, их габаритов и массы. Немаловажную роль при выборе метода восстановления играет принятая на горнодобывающем предприятии стратегия ремонтного обслуживания горной техники. На основе исследований конструктивных и функциональных особенностей экскаваторов, анализа простоев и отказов деталей и узлов даны рекомендации, позволяющие повысить долговечность горных машин при их эксплуатации, как производственной, так и технической. Определены группы деталей и узлов экскаваторов, наиболее часто подверженных износу и ремонтным воздействиям. Представлены наиболее перспективные методы и материалы для улучшения поверхностных характеристик деталей экскаваторов, позволяющие увеличить износостойкость узлов экскаваторов и срок их службы. В качестве основного критерия выбора метода восстановления предложена относительная себестоимость восстановления поверхности деталей экскаваторов циклического действия, что позволит более обосновано и эффективно планировать бюджет ремонтной службы, составлять план-график выполнения ремонтного обслуживания техники и определять целесообразность применения того или иного метода восстановления и упрочнения деталей.

**Для цитирования:** Андреева Л.И., Абрамов С.В. Выбор оптимального метода восстановления деталей экскаваторов на основе экономической целесообразности // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6 (164). С. 33-39. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-33-39

При реализации стратегии развития горнотехнической системы необходимо обеспечивать экономическую эффективность технической и производственной эксплуатации горнотранспортного оборудования. Поддержание горной техники в работоспособном состоянии во многом зависит от принятой на горнодобывающем предприятии стратегии ремонтной службы, выбора оптимальных методов восстановления узлов и деталей, а также от экономической целесообразности ремонтных воздействий<sup>1</sup>.

Выбор метода восстановления представляет собой сложную технико-экономическую задачу, при решении которой приходится не только учитывать и сопоставлять показатели стоимости, но и учитывать влияние износостойкости деталей на срок их службы, соответствие требований качества деталей условиям нормальной работы для исключения технико-технологических рисков при эксплуатации машины. Выбор способа восстановления (упрочнения) деталей обычно выполняют в два или три этапа. Предварительно рассматривают технологические варианты, обеспечивающие восстановление

<sup>1</sup>НИР №\_ в рамках темы: 1 (92022-2024) Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в дина-

мике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1

Таблица 1. Основные характеристики способов восстановления и упрочнения  
Table 1. The main characteristics of the methods of restoration and hardening

№ п.п.	Наименование способа восстановления (упрочнения)	Толщина покрытия (упрочненного слоя, макс., мм)	Твердость	Повышение износостойкости	Примечание
1	Наплавка а) электрошлаковая б) вибродуговая	15-30 0,5-2,5	HRC-55-60	1,5-3	Большая зона термического влияния, снижение усталостной прочности
2	Хромирование	0,5	HB600-1000	1,8-2	Низкая производительность. Снижение усталостной прочности
3	Осталивание	до 3	HRC35-45	1,2-1,5	Низкая производительность и технологичность
4	Детонационное напыление Детонационное упрочнение	0,1-0,15 до 40 (для 110Г13Л)	HB400-600	2-2,5 1,3-1,5	Обеспечение безопасности процесса, значительные шумовые нагрузки
5	Азотирование, борирование	1-1,5	8-12ГПа	2-2,5	Высокие температуры процессов, большая длительность
6	Плазменное напыление	0,5-5	HRC-60-62	1,5-12	Невысокая адгезия, необходимость подготовительных и финишных операций
7	Лазерная наплавка Лазерное упрочнение	0,5 1-1,5	HRC-60	2-8 2-6	Относительно высокая стоимость оборудования
8	Вакуумное напыление	0,001-0,2	HRC-60	2-12	Низкая производительность. Сравнительно сложная технология

служебных качеств, а затем из них выбирают наиболее оптимальный вариант по одному или нескольким обобщающим показателям.

Одним из таких показателей является относительная себестоимость – себестоимость восстановления (упрочнения) детали, отнесенная к сроку ее службы после ремонта:

$$\frac{\Sigma C_{B1}}{t_{B1}} > < \frac{\Sigma C_{B2}}{t_{B2}},$$

где

$\Sigma C_{B1}$  и  $\Sigma C_{B2}$  – себестоимость восстановления (упрочнения) детали соответственно первым и вторым способами;

$t_{B1}$  и  $t_{B2}$  – сроки службы детали.

Таким образом, относительная себестоимость – это основной критерий при оценке целесообразности и выборе способа восстановления детали [1,2,3].

Экономическая эффективность разработанного технологического процесса восстановления (упрочнения) детали определяется путем сравнения показателей себестоимости восстановления детали со стоимостью детали и себестоимости детали при различных способах восстановления [4,5].

Эффективность восстановления детали выражается через коэффициент эффективности:

$$K_{\varepsilon} = \frac{C_n t_{B \text{ ср.}}}{C_B t_{n \text{ ср.}}},$$

где:

$\Sigma C_B$  и  $\Sigma C_n$  – себестоимость соответственно восстановления детали и изготовления новой;

$t_{B \text{ ср.}}$  и  $t_{n \text{ ср.}}$  – средний срок службы восстановленной и новой детали.

При  $K_{\varepsilon} < 1$  применение способа не целесообразно.

Для окончательного выбора восстановления (упрочнения) должны учитывать требования экологической чистоты процесса и правила безопасности проведения работ, условия обеспечения работоспособности узлов и машины в целом, характер нагружения, величину нагрузки, вид изнашивания детали, габариты и массу. При отсутствии данных по ресурсам конкретных деталей, их стоимости может использоваться информация по аналогам, экспериментальные данные и результаты экспертных оценок [6,7,8].

Для предварительного выбора способа восстановления и упрочнения деталей в таблице 1 сведены основные характеристики некоторых способов восстановления и упрочнения.

Проведенные исследования, анализ конструктивных и функциональных особенностей, например, экскаваторов ЭКГ-15 и ЭКГ-20, оценка долговечности и ремонтпригодности узлов и механизмов, а также рассмотрение различных способов восстановления и упрочнения деталей дали возможность сформулировать предложения, внедрение которых позволит улучшить показатели долговечности и ремонтпригодности [9,10].

Все предложения, рекомендации предполагают воздействие на улучшение работоспособности по трем основным направлениям. Первое – конструктивное совершенствование узлов и механизмов, второе – повышение долговечности через различные технологические факторы (не только в процессе изготовления, но и при ремонте экскаваторов), третье – улучшение условий эксплуатации, совершенствование технического обслуживания [11,12].

Некоторые предложения после проверки в промышленных условиях могут непосредственно использоваться на предприятиях, другие требуют проведения отдельных исследовательских работ и научной проработки для последующего внедрения в производство.

Анализ отказов узлов и простоев экскаваторов показал, что в первую очередь необходимо проведение работы по повышению долговечности следующих деталей и узлов экскаватора ЭКГ-20: рабочего оборудования (особенно ковша), гусеничных звеньев, механизма ОДК, роликового круга, механизма подъема, а для экскаватора ЭКГ-15 – ковша, канатов напора, подъема, возврата, системы смазки, седлового подшипника, роликового круга, звеньев гусениц, подвески ковша. Худшие показатели имеют как большая часть перечисленных узлов и деталей, так и дополнительно стрела, редуктор хода, рукоять.

С учетом анализа информации по отказам и простоям были сформулированы предложения и рекомендации. При этом использовался опыт передовых предприятий и результаты проведенных экспериментов.

#### *Детали рабочего оборудования.*

Зубья ковша относятся к наиболее быстроизнашивающимся деталям рабочего оборудования. Предприятия ежегодно несут большие финансовые затраты по замене зубьев ковшей.

Как показали проведенные исследования, одним из эффективных средств долговечности зубьев является наплавка износостойкими материалами. В настоящее время она производится на некоторых ремонтных предприятиях, но часто вручную, с использованием случайных наплавочных материалов.

Наплавка сормайтот с присадкой железного порошка и другими износостойкими сплавами позволяет увеличить долговечность зубьев почти в 3 раза. При наплавке ленточным электродом сплава 6Х7НГ2С на зубья из стали 35 удалось в 4 раза увеличить долговечность зубьев. Наплавку необходимо производить не только для компенсации износа, но и с профилактическими целями. Увеличение износостойкости положительно скажется на работе всего рабочего оборудования, т.к. при работе с за-

тупленными зубьями нагрузки на него возрастают на 20-25%.

Кроме наплавки, перспективно упрочнение зубьев ковшей взрывом, а в некоторых случаях – детонационное напыление. Как показывает опыт, при упрочнении взрывом зубьев ковшей из стали 110Г13Л глубина упрочненного слоя достигает 40-50 мм. Износостойкость повышается не менее чем на 30-50%. При упрочнении взрывом попутно выявляются скрытые дефекты (раковины, трещины), что также положительно влияет на безотказность зубьев. Детонационное напыление целесообразно проводить в качестве профилактических покрытий.

Как показал анализ простоев экскаваторов, очень велики потери рабочего времени при замене втулок и пальцев рабочего оборудования (особенно ковша). Износ пальцев носит местный характер (палец часто при значительном износе принимает форму коленчатого вала). Учитывая значительный вес этих деталей на экскаваторе ЭКГ-20 (до 100 кг и более), их почти невозможно извлечь из соединения, поскольку не закрепленные от проворачивания пальцы изнашиваются равномерно только до первых ощутимых следов износа. Целесообразно апробировать их конструктивное выполнение с фиксацией и периодическим поворотом на 120°. После поворота пальца рабочими становятся уже другие участки поверхности, таким образом, срок службы пальцев можно увеличить как минимум в 2 раза без дополнительных затрат.

В сочетании с другими методами, такими как химико-термическая обработка, лазерное упрочнение поверхности и т.д., установкой элементарных уплотнений в соединениях можно повысить срок их службы в 4 и более раза.

Основными причинами естественного износа канатов экскаватора являются скольжение каната по ручью твердого стального блока и высокие напряжения смятия.

Известно, что износ двух трущихся одна о другую деталей, составляющих пару (в данном случае пару «блок-канат»), в значительной степени зависит от соотношения их твердости. Для уменьшения износа стального каната твердость материала блока должна быть меньше твердости стального каната. Проведенными исследованиями доказана целесообразность футеровки ручьев блоков антифрикционными материалами, так как при этом значительно возрастает долговечность канатов.

Наиболее перспективна футеровка блоков капроном или капролоном (рис. 1). Футерующая облицовка изготавливается при этом в форме сегментов, а ручьи блоков протачиваются.

Установлено, что долговечность канатов при работе на футерованных блоках увеличивается почти в 2 раза и зависит от предела усталости материала проволок.

#### *Седловой подшипник.*

С целью повышения долговечности и улучшения ремонтпригодности институтом НИИОРГ (г. Челябинск) была разработана конструкция вкладыша седлового подшипника со сменными антифрикционными элементами [13].

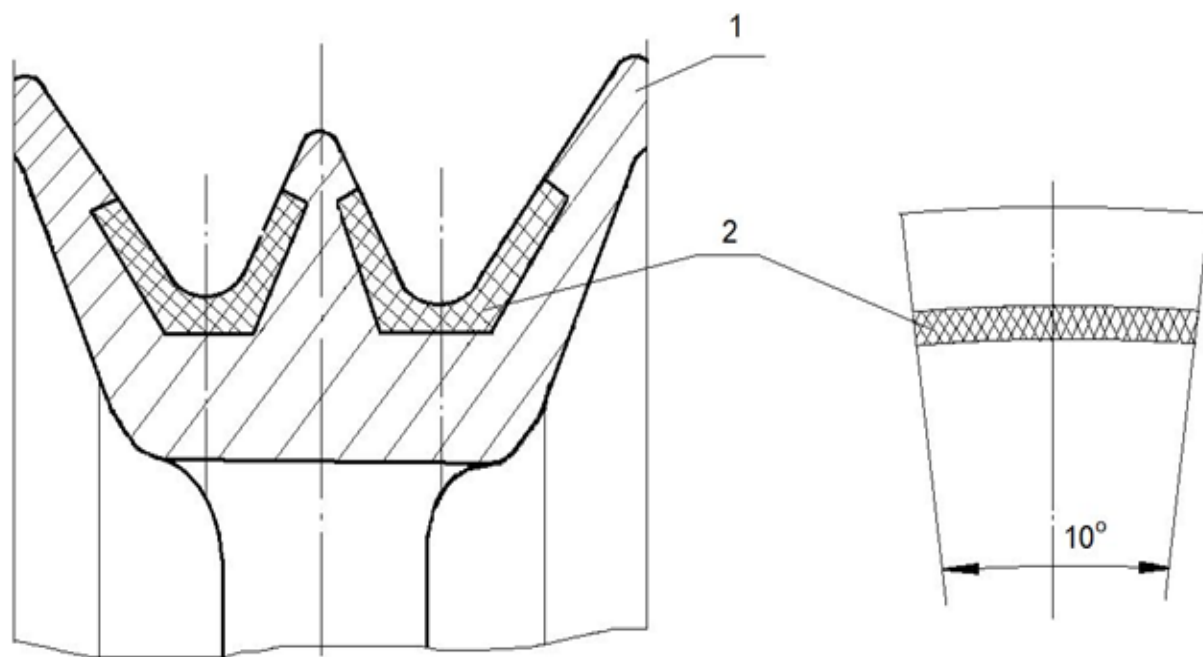


Рис. 1. Футеровка ручья блоков узла экскаватора ЭКГ-15

1 – блок; 2 – футеровка

Fig. 1. Lining of the stream of blocks of the EKG-15 excavator assembly

1 – block; 2 – lining

Наилучшим образом зарекомендовали себя вкладыши с антифрикционными элементами из капролона. Они изготавливались мехобработкой на фрезерных станках из блоков капролона.

Опыт применения в промышленных условиях вкладышей седловых подшипников подобной конструкции на экскаваторах ЭКГ-10 показал, что их использование позволяет увеличить срок службы в 2-2,5 раза, трудоемкость ремонта и замены в 8-10 раз, уменьшить износ балки рукояти, улучшить условия труда обслуживающего персонала, снизить простой экскаватора в ремонте, а следовательно, увеличить их производительность. Износ сопряженных с вкладышами балок рукояти уменьшается в 5-6 раз [13,14,15].

#### *Зубчатый венец, роликовый круг*

Как показывает анализ простоев при устранении отказов зубчатого венца, трудоемкость его ремонта очень велика, поэтому применение наиболее эффективных методов восстановления рабочих поверхностей позволит значительно снизить общие простои экскаваторов.

Опыт эксплуатации усиленных зубчатых венцов из стали 35ХН2МЛ с увеличенной длиной зуба дал положительные результаты, поэтому при модернизации экскаватора целесообразно его использовать.

Большая трудоемкость техобслуживания, сравнительно небольшой срок службы деталей указывают на необходимость улучшения конструкции роликовых кругов. Наиболее важно при этом повышение работоспособности пар трения «ось-ролик». Решить эту задачу можно как путем применения централизованной смазки, так и более простым и радикальным способом – использованием в роликах втулок из полиамидных смол, напол-

ненных дисульфидом молибдена (1,5% по весу). При этом отпадает необходимость в смазывании роликов, повышается износостойкость пар трения, что положительно сказывается на работоспособности других деталей узла (например, рельсов). Учитывая то, что смазывания пар трения «ось-ролик» производится вручную, а количество роликов – 72 на экскаваторе ЭКГ-15 и 48 на ЭКГ-20, в течение года простои экскаваторов при техобслуживании снижаются на 80-120 часов, экономится большое количество смазки.

#### *Сборка соединений с охлаждением в жидком азоте*

На работоспособность сопряжений, соединений (как подвижных, так и неразъемных) большое влияние оказывает технология сборки. Традиционными методами сборки неразъемных соединений на ремонтных предприятиях является сборка с нагреванием охватываемой детали, а также запрессовка на прессах. Как показывает практика, для обеспечения прессовой посадки детали в лучшем случае запрессовываются, а зачастую забиваются в охватываемую деталь. При этом, естественно, повреждаются (расклепываются) детали соединения. Ухудшается качество рабочей поверхности, изменяются зазоры (как правило, запрессовываемые детали, например, втулка, в свою очередь сопрягаются в подвижном соединении с другими деталями-осями, валами и т.д.), что значительно снижает работоспособность узла.

Несомненными преимуществами обладает способ сборки деталей с охлаждением в жидком азоте. Преимущества следующие:

1. Обе детали не подвергаются деформации, это значит, что для собранных узлов не требуется последующей машинной обработки.

2. По сравнению со сборкой с нагреванием или с запрессовкой данный процесс происходит очень быстро. Производительность этого способа в 20-30 раз выше.

3. Достоинством метода также является его чистота, отсутствует грязь, выделение газов от нагретой масляной ванны.

4. Метод позволяет легко получить требуемую прочность соединения, при прессовании же необходимо применять часто чрезмерную степень сжатия для получения такой же прочности.

5. Не требуется сложного оборудования (только резервуар для хранения азота и ванна для охлаждения).

Таким образом, основой для принятия конкретных решений по выбору оптимального способа восстановления деталей горных машин и повышения их долговечности является информация об отказах, не только содержащая качественную и количественную оценку показателей долговечности, но и раскрывающая физическую сущность процессов возникновения отказов техники.

Помимо этого, с точки зрения экономической целесообразности необходимо учитывать себестоимость восстановления детали, отнесенную к сроку ее службы после ремонта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Килин А. Б. [и др.] Инновационные решения по обеспечению высокопроизводительной работы оборудования большой единичной мощности // Уголь. 2013. №2. С. 49-52.
2. Килин А. Б. [и др.] Развитие ремонтного обслуживания и эксплуатации автосамосвалов БелАЗ на разрезе «Черногорский» // Развитие угледобывающего производственного объединения: Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. 2016. Специальный выпуск №34. С. 129-137.
3. Артемьев А. А. [и др.] К вопросу оценки ресурса элементов трансмиссии горных машин // Горные машины и электромеханика. 2007. №9. С. 31-35.
4. Андреева Л. И. Применение методов оценки технического состояния горной техники на горнодобывающем предприятии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. №5. С. 136-143.
5. Слюньков В. Н., Андреева Л. И., Довженко А. С. Показатели функционирования системы обеспечения работоспособности горного оборудования // Уголь. Специальный выпуск. М. : 2008. С. 77-78.
6. Азев В. А. [и др.] Концепция развития системы обеспечения работоспособности горно-транспортного оборудования угледобывающего объединения на примере ООО «СУЭК-Хакасия» // Открытые горные работы в XXI веке-2. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №4, 45-2, 2015. С. 276-287.
7. Иванов С. Л. Основы расчетного определения энергоресурса редукторов горных машин // Горный журнал. 1997. №11. С. 29-30.
8. Надежность в технике. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2011. 28 с.
9. Mikhailov A., Zhigulskaya A., Yakovskaya T. Strip mining of peat deposit // В сборнике: Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017 Proceeding of the 26<sup>th</sup> International Symposium. Edited by Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Haran Schunnesson. 2017. С. 497-501.
10. Li X. A. [et al.] Study on drum cutting properties with full – scale experiments and numerical simulations // Measurement. 2018. V. 144. Pp. 25-36.
11. Le Q. H., Jeong., Nguyen C. T., Yang S. Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic // Journal of Drive and Control. 2013. Vol. 10. Iss. 1. Pp. 29-36.
12. Шишляников Д. П. Обеспечение надежности работы и эффективного сервиса проходческо-очистных комбайнов для добычи калийных руд // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. №7. С. 103-109.
13. Андреева Л. И., Абрамов С. В. Полимерные материалы как альтернатива цветным материалам и сплавам при ремонте горной техники // Горное оборудование и электромеханика. 2022. №6.
14. Wood W. E., Adam B., Kadali J., Talla R. Heat-Affected Zone Formation in Electrosark-Deposition Additive Manufacturing on Ultrahigh-Strength Steel // Materials Performance and Characterization, 2017. Т. 6. №3. С. 376-393.
15. Хажиев В. А. Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность использования экскаваторов-мехлопат на угольных разрезах // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №6. С. 21-26.

© 2022 Авторы. 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, Институт горного дела Уро РАН, Челябинский филиал (Россия, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 30, оф.718)

**Абрамов Сергей Васильевич**, гл. механик отдела ремонта горной техники, канд. техн. наук, ООО «Научно-исследовательский институт эффективности и безопасности горного производства» (ООО «НИИОГР»), (Россия, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 30, оф.711)

Заявленный вклад авторов:

Андреева Л.И. – постановка исследовательской задачи в соавторстве с коллективом лаборатории ремонта и эксплуатации горнотранспортного оборудования; обзор соответствующей литературы; участие в проведении экспериментов; аналитические расчеты; выводы; написание текста.

Абрамов С.В. – обзор соответствующей литературы; сбор и анализ информации; аналитические расчеты; формулировка выводов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-33-39

Lyudmila I. Andreeva<sup>1</sup>, Sergey V. Abramov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Chelyabinsk branch

<sup>2</sup> Scientific Research Institute for the Efficiency and Safety of Mining Production

\*E-mail: tehnozem74@list.ru

## CHOOSING THE OPTIMAL METHOD FOR RESTORING EXCAVATOR PARTS BASED ON ECONOMIC FEASIBILITY



### Article info

Received:

15 September 2022

Accepted for publication:

01 October 2022

Accepted:

14 October 2022

**Keywords:** recovery method, surface wear, failure, downtime, efficiency, relative cost.

### Abstract.

The review of the most effective and applied methods of restoration and hardening of details of excavators of cyclic action at the mining enterprises of Russia taking into account the nature of loading, operating conditions, type of wear of details, their dimensions and weight is presented. An important role in choosing the recovery method is played by the strategy of repair maintenance of mining equipment adopted at the mining enterprise. Based on studies of the design and functional features of excavators, analysis of downtime and failures of parts and assemblies and recommendations are given to increase the durability of mining machines during their operation, both industrial and technical. The groups of excavator parts and assemblies that are most often subject to wear and repair impacts have been identified. The most promising methods and materials for improving the surface characteristics of excavator parts, allowing to increase the wear resistance of excavator components and their service life, are presented. As the main criterion for choosing the recovery method, the relative cost of restoring the surface of the parts of cyclic excavators is proposed, which will allow for a more reasonable and efficient planning of the budget of repair services, drawing up a schedule for performing repair maintenance of equipment and determining the feasibility of using one or another method of restoring and hardening parts.

**For citation:** Andreeva L.I., Abramov S.V. Choosing the optimal method for restoring excavator parts based on economic feasibility. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 6(164):33-39 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-33-39

### REFERENCES

1. Kilin A.B. [et al.] Innovative solutions for ensuring high-performance operation of equipment of large unit capacity. *Ugol*. 2013; 2:49-52.
2. Kilin A.B. [et al.] Development of repair maintenance and operation of BelAZ dump trucks at the Chernogorsky section. *Development of coal mining production association: Mining information and analytical bulletin. Separate issue*. 2016; 34:129-137.
3. Artemyev A.A. [et al.] On the issue of assessing the resource of transmission elements of mining machines. *Mining machines and electromechanics*. 2007; 9: 31-35.
4. Andreeva L.I. Application of methods for assessing the technical condition of mining equipment at

a mining enterprise. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 5:136-143.

5. Slyunkov V.N., Andreeva L.I., Dovzhenok A.S. Indicators of the functioning of the system for ensuring the operability of mining equipment. *Coal. Special issue*. M.: 2008. Pp. 77-78.

6. Azev V.A. [et al.] The concept of development of the system for ensuring the operability of mining transport equipment of a coal mining association on the example of LLC SUEK-Khakassia. *Open-pit mining in the XXI century-2. Mining information and analytical bulletin. Separate issue*. 2015; 4,45-2:276-287.

7. Ivanov S.L. Fundamentals of the calculated determination of the energy resource of gearboxes of mining machines. *Mining journal*. 1997; 11:29-30.

8. Reliability in technology. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2011. 28 p.

9. Mikhailov A., Zhigul'skaya A., Yakovskaya T. Strip mining of peat deposit. *In the collection: Mine Planning and Equipment Selection: MPES 2017 Proceeding of the 26th International Symposium. Edited by Behzad Ghodrati, Uday Kumar, Haran Schunnesson*. 2017. Pp. 497-501.

10. Li X.A. Study on drum cutting properties with full – scale experiments and numerical simulations / Xuefeng Li, Shibo Wang, Shirong Ge, Reza Malerian // *Measurement*. 2018; 144:25-36.

11. Le Q.H., Jeong., Nguyen C.T., Yang S.Y. Development of a Virtual Excavator using SimMechanics and SimHydraulic. *Journal of Drive and Control*. 2013; 10(1):29-36.

12. Shishlyannikov D.P. ensuring the reliability of operation and efficient service of tunneling and cleaning combines for the extraction of potash ores. *Izvestia of higher educational institutions. Mining Journal*. 2020; 7:103-109.

13. Andreeva L.I. Abramov S.V. Polymer materials as an alternative to non-ferrous materials and alloys in the repair of mining equipment. *Mining equipment and electromechanics*. 2022; 6.

14. Wood W.E., Adam B., Kadali J., Talla R. Heat-Affected Zone Formation in Electrospark-Deposition Additive Manufacturing on Ultrahigh-Strength Steel. *Materials Performance and Characterization*. 2017; 6(3):376-393.

15. Khazhiev V.A. Assessment of the impact of operational factors on efficiency of using mechanical excavators at coal mines. *Mining equipment and electromechanics*. 2009; 6:21-26.

© 2022 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

#### About the authors:

**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, (Russia, Chelyabinsk, st. Entuziastov, 30, office 718)

**Sergey V. Abramov**, Ch. mechanic of mining equipment repair department, C. Sc. in Engineering, Scientific Research Institute for the Efficiency and Safety of Mining Production (LLC NII OGR), (Russia, Chelyabinsk, st. Entuziastov, 30, office 711)

#### Contribution of the authors:

Lyudmila I. Andreeva – formulation of a research task in collaboration with the staff of the laboratory of repair and operation of mining equipment; review of relevant literature; participation in experiments; analytical calculations; conclusions; writing a text.

Sergey V. Abramov – review of relevant literature; collection and analysis of information; analytical calculations; formulation of conclusions.

Author have read and approved the final manuscript.

