

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГОРНЫХ МАШИН

Д.С. Громыка¹, Т.Г. Утенкова¹, О.Ю. Короткова¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: poloronta@yandex.ru

Аннотация: Добыча полезных ископаемых повсеместно сопряжена с использованием разнообразных горных машин для выемки, погрузки и транспортирования породы. При длительном использовании техники увеличивается износ основных узлов и исполнительных органов машины. Данная проблема особенно актуальна для выемочно-погрузочных машин, используемых на работах по добыче полезных ископаемых и рекультивации, где наблюдается повышенная интенсивность изнашивания. Вопросы развития процессов изнашивания и оценки остаточного ресурса исполнительных органов выемочно-погрузочных машин хорошо изучен в мировой практике, однако по причине разнообразия климатических, геологических и горнотехнических условий, комплекс которых уникален для каждого месторождения полезных ископаемых, существуют сложности в создании единой модели развития данного процесса. В особенности малоизучен вопрос оценки остаточного ресурса при активном изнашивании в экстремальных условиях высоких температур, а также резком перепаде температуры рабочих органов. Данные условия характерны для угольных и торфяных месторождений, на которых характерно возникновение и развитие процессов эндогенного горения добываемого сырья. В данном обзорном исследовании рассмотрены методы оценки различных механизмов изнашивания и влияние температуры на интенсивность этого процесса, а также возможность определения остаточного ресурса исполнительных органов выемочно-погрузочных машин, работающих в условиях высокотемпературного горного массива.

Ключевые слова: выемочно-погрузочные машины, изнашивание, остаточный ресурс, эндогенные пожары, самовозгорание угля, исполнительные органы, экстремальные условия.

Для цитирования: Громыка Д. С., Утенкова Т. Г., Короткова О. Ю. Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 75–86. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-75-86.

Estimation methods of wear mechanisms in cutting heads of mining machines: Review

D.S. Gromyka¹, T.G. Utenkova¹, O.Yu. Korotkova¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: poloronta@yandex.ru

Abstract: Mineral mining commonly uses various mining machines for excavation, loading and haulage. The long-term use aggravates wear of major assemblies and cutting heads of mining machines. This problem is of the highest concern for the extraction-and-loading machines

employed in mineral mining and in reclamation operations characterized by increased rates of wear. The wear progression and the remaining life estimation in extraction-and-loading machines are well examined in the world practice. At the same time, the unique combination of diverse climatic, geological and geotechnical conditions at each mineral deposit governs the difficulty of construction of a generalized model of wear progression. In particular, insufficient research is devoted to assessment of residual life under high-rate wear under extremely high temperatures or under jump in temperature of machine tools. Such conditions are typical of coal and peat fields characterized by initiation and development of endogenous fires. The scope of this analytical review encompasses estimation methods of different wear mechanisms and the effect of temperature on wear rate, as well as determination of residual life of extraction-and-loading machine components in operation in high-temperature rock mass.

Key words: extraction-and-loading machines, wear, residual life, endogenous fires, coal ignition, machine tools, extreme conditions.

For citation: Gromyka D. S., Utenkova T. G., Korotkova O. Yu. Estimation methods of wear mechanisms in cutting heads of mining machines: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(2):75-86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-75-86.

Введение

Рабочие органы выемочно-погрузочных горных машин в ходе многочисленных циклов погрузки-загрузки подвергаются существенным нагрузкам и локальным повышениям температуры, что приводит к их повреждениям, вид которых некоторые авторы [1, 2] разделяют на изнашивание и разрушение. На практике эти процессы трудноотличимы друг от друга.

Изнашивание определяется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела, а также увеличение его остаточной деформации, проявляющееся в изменении формы [1, 3]. Изнашивание поверхностей деталей, узлов и механизмов возникает при активации физико-механических процессов, преимущественно трения, в поверхностном слое на определенной площади, и следствием данного процесса является отделение, отслаивание или деформация материала на подверженном внешнему воздействию участке [4, 5].

Существует несколько механизмов процесса изнашивания. Как отмечают [1, 6] в своих обзорах, большинство ав-

торов выделяют группу механических видов изнашивания, таких как абразивный износ, механическая усталость, отделение материала посредством откалывания, а также выделяется группа, включающая диффузионные и адгезионные, а также такие виды изнашивания, как термическая усталость, окисление и т.д.

Как отмечено в нормативных документах [3], абразивный вид изнашивания возникает в результате трения твердых шероховатых поверхностей с образованием царапин и отслаиванием материала. По данным статистического анализа, представленного в [5], абразивное изнашивание является основной причиной выхода из строя бурильных и дробильных инструментов. Данный вывод находит подтверждение и в других работах. Так, авторы [7] подчеркивают высокую скорость абразивного изнашивания зубьев экскаваторов и днищ ковшей, достигающую 300 мкм/ч. При этом при длительной работе около 100–150 машино-часов вследствие износа зубьев может потеряться до 13–17% от исходной массы [8].

Хотя сам механизм абразивного изнашивания напрямую не зависит от температуры, повышение температуры приводит к уменьшению твердости у большинства видов стали, что снижает величину нагрузки, необходимую для появления дефектов [9–12].

Абразивное и адгезионное изнашивание породоразрушающих и погружных органов характерно в условиях низкотемпературного взаимодействия при низких скоростях, в условиях же высоких температур активизируются процессы диффузионного изнашивания и окисления, что в итоге ускоряет интенсивность изнашивания (рис. 1).

На первой стадии адгезионного взаимодействия становится возможным контакт между абразивом и истираемой поверхностью вследствие появления высокого контактного давления, вызывающего локальную пластичную деформацию. Затем, в результате движения абразива и истираемого материала, происходит разрушение «мостиков схваты-

вания» в зоне контакта двух поверхностей. Интенсивность развития данных процессов зависит от разности твердостей абразива и истираемого материала, а также от разности теплоустойчивости материалов [6].

Интенсивность диффузионного изнашивания зависит в первую очередь от химического состава контактирующих поверхностей [10]. При большом цикле нагрузок на инструмент возникает усталостный износ [13], а в области повышенных температур имеет место и термическая усталость, возникающая при большом числе циклов нагрева-остывания металла. Вследствие данных процессов возникает упругая деформация кристаллической решетки металла, дислокация и другие дефекты, которые, постепенно накапливаясь, приводят к образованию микротрещин. При накоплении и разрастании микротрещин происходит откалывание и расслоение материала, что приводит к уменьшению производительности работы режущих

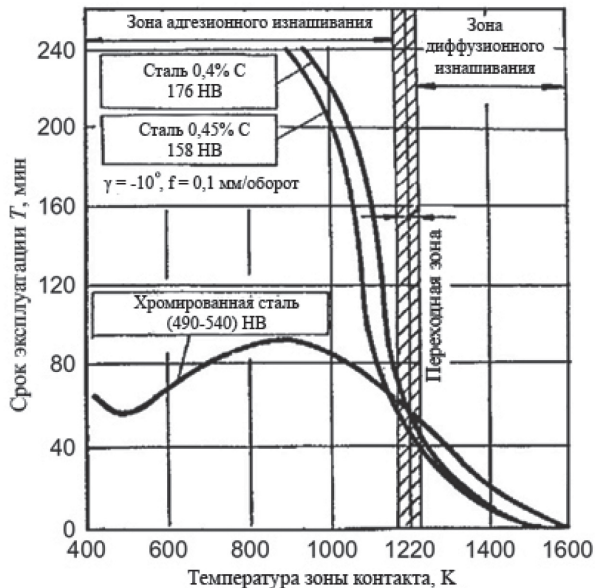


Рис. 1. Зависимость срока службы рабочего органа от температуры поверхности контактного взаимодействия [1]

Fig. 1. Relationship between life time of operating tool and contact surface temperature [1]



Рис. 2. Отображение поля напряжений по Мизесу на ковше экскаватора (черным обозначены значения выше 355 МПа) [19]

Fig. 2. Von Mises stress field of an excavator bucket (black spots indicate values over 355 MPa) [19]

частей исполнительных органов горных машин [2, 9].

Высокотемпературные условия на работах по добыче и рекультивации месторождений угля и торфа возникают при активизации процессов самовозгорания и эндогенного горения горного массива [14]. Так как подобные условия существенно ускоряют процесс траты ресурса и уменьшают срок эксплуатации машин, то особенно актуальным становится вопрос разработки методики оценки величины износа, учитывающей влияние высоких температур на все механизмы изнашивания.

Материалы и методы исследования

Для прогнозирования срока эксплуатации режущих кромок исполнительных органов горных машин, в том числе зубьев ковшей экскаваторов, важным вопросом является оценка их остаточного ресурса. Многие авторы при оценке процесса износа подходят к вопросу с практической стороны и делают следующие прогнозы по сроку эксплуатации рабочих органов горных машин. Например, определение числа циклов загрузки экскаватора при контакте со взорванной породой [15], прогноз срока эксплуатации зубьев путем оценки их стачивания

за период резания и оценки соответствующих зависимостей [16], влияние величины износа на производительность и также стачивание зубьев при длительном резании [17], прогноз параметров износа и удельного сопротивления грунта резанию от геометрических параметров зубьев [18]. Однако подобные исследования показывают высокую точность только для конкретных видов зубьев, которые и использовались при проведении экспериментов. Транспортирование этих результатов на другие конструкции рабочих органов затруднительно.

Для изучения интенсивности изнашивания конкретных рабочих органов многие авторы прибегают к методу теоретического и математического моделирования, включающему оценку механических характеристик и химического состава стали. Построение полей напряжений (рис. 2) по Мизесу для определения зон, наиболее подверженных деформациям, можно встретить в работах [19, 20], анализ дефектов и усталостных характеристик методом конечных элементов, применяемый для обнаружения внутренних дефектов, представлен в источниках [21, 22]. Авторы [23] изучали движение гранулированной среды на компьютерной модели движущегося

ковша, обнаружив зоны наибольшего давления у задних стенок ковша.

Подобные методы подходят для обнаружения внутренних дефектов, однако не учитывают многие факторы и механизмы изнашивания.

Так как статистически наиболее повторяющейся причиной отказов является абразивное изнашивание, большинство исследований посвящены оценке интенсивности данного механизма. Так, автором [24] было проведено экспериментальное исследование зависимости интенсивности снятия стеллитового покрытия со стального полотна от параметров резания. Подобный эксперимент был также представлен в работе [25]. Оба автора сделали вывод, что основным фактором активации абразивного износа и увеличения твердости поверхности режущих кромок является скорость подачи породы на кромку. Основными факторами износа являются

истирание при низких скоростях резания (<30 м/мин) и надломы, расслоения и скалывание при больших скоростях (>30 м/мин).

Однако, как отмечается в [1, 26], при повышении контактной температуры активизируются процессы высокотемпературного усталостного износа, диффузионные и окислительные процессы, хотя многие из существующих тестов интенсивности изнашивания при высоких контактных температурах не принимают во внимание комплекс данных механизмов, чаще всего прибегая к изучению адгезии при высокотемпературном абразионном изнашивании.

Строго говоря, интенсивность процесса изнашивания с ростом температуры также увеличивается. Это подтверждается многими экспериментальными исследованиями в области материаловедения. Результаты подобных экспериментов, описанные у авторов [27 – 29],

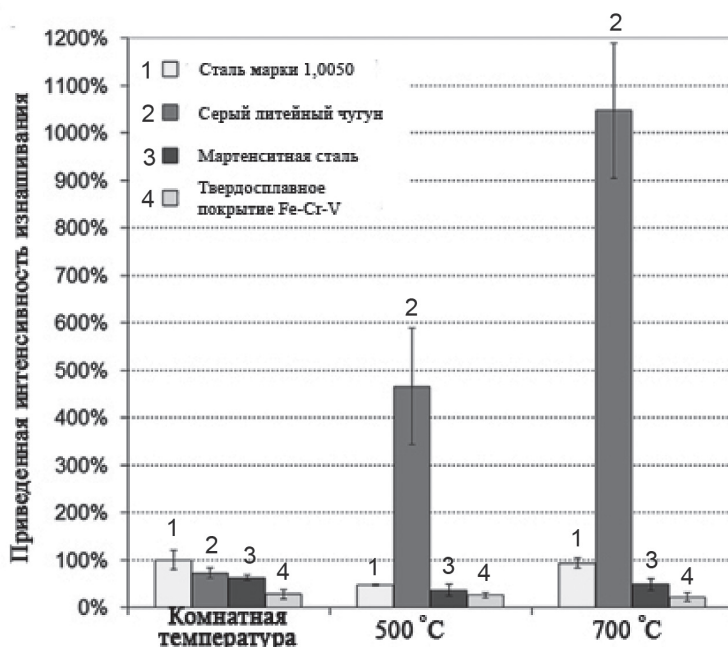


Рис. 3. Величины интенсивности абразивного износа при разных температурах у различных видов стали [28]

Fig. 3. Different types of steel abrasive wear rate values for different temperatures [28]

схожи: при повышении температуры контакта увеличиваются массопотери всех испытываемых сталей. Однако некоторые виды сталей способны формировать трибологический слой в абразивной среде, повышающий сопротивление износу даже при высоких температурах (рис. 3).

На сопротивляемость высокотемпературному изнашиванию в основном влияет фазовый состав и структура стали [26]. Стали с аустенитовой микроструктурой выдерживают большее число циклов усталостной нагрузки, чем стали, в которых произошла фазовая трансформация в перлит [26, 30].

Опыт, описанный в [30], наглядно показывает, что при многократном цикле термообработки и охлаждения происходят определенные трансформации. При температуре в 500 °С, как отметил автор, происходит фазовая трансформация аустенита в перлит, достигающая максимального значения в 24% после 36 циклов. Таким образом, при длительных усталостных нагрузках в стали происходят фазовые трансформации аустенита в перлит, в результате уменьшается и сопротивляемость изнашиванию, происходит образование микротрещин и отслаивание материала.

Похожие результаты встречаются и у других авторов. Так, [10] описывает, что даже однократный нагрев до 850 °С с последующим охлаждением приводит к уменьшению предела выносливости на усталость. Похожий результат можно найти в работе [31], в этом случае проводился многократный цикл нагрева до 950 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры, при этом в стальной шестерне отмечался рост количества микротрещин.

Помимо приведенных выше методов, которые в большинстве своем базируются на экспериментальных исследованиях, величину срока жизни и

остаточного ресурса рабочих органов горных машин можно определить и расчетным методом, суть которого чаще всего сводится к расчету интенсивности определенного механизма изнашивания. Например, в работе [32] на основе оценивания коэффициента термической диффузии предложена методика расчета значения интенсивности адгезионно-усталостного износа режущих инструментов, в [33] приводится метод расчета усталостного изнашивания путем расчета внутреннего рассеивания тепла и развития микропластичности, результаты расчета при этом имеют хорошую корреляцию с экспериментальными данными, полученными этим же автором, в [34] приводится методика количественного расчета остаточного ресурса по размеру микротрещин на РЭМ-визуализации.

Как отмечает [35] в обзоре, в зависимости от типа материала режущего инструмента и вида породы, преобладающий механизм изнашивания может различаться. Авторами в [1, 35] приведен ряд зависимостей для определения объема продуктов износа за счет определенного механизма изнашивания за заданный интервал времени (таблица).

Приведенные выше зависимости были представлены в обзоре [35] как экспериментальные зависимости для определения механизмов срыва инструментов при машинной обработке высоколегированных сталей на основе никеля, однако автором отмечается, что данные зависимости могут быть использованы и в других условиях. Также утверждается, что представленные уравнения используются для определения объема продуктов износа, образованных в результате конкретного механизма износа, т.е. они позволяют также просчитать общий вклад конкретного механизма изнашивания в суммарный объем продуктов износа по всем механизмам.

Зависимости для определения объема продуктов износа для различных механизмов изнашивания [35]

Formulae to determine volume of wear product for different wear mechanism [35]

Механизм изнашивания	Формула для определения объема продуктов износа, м ³	Пояснение к формуле
Абразивный	$K_{abr} K \left(\frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) V_c w V \bar{\sigma} \Delta t$	K_{abr} — коэффициент абразивного изнашивания, м ³ /Н; P_a — твердость абразивной частицы, МПа; P_t — твердость инструмента, МПа; n и K — коэффициенты; V_c — скорость изнашивания по фаске износа, м/с; V_B — протяженность фаски износа (по задней поверхности инструмента), м; w — ширина резания, м; $\bar{\sigma}$ — средняя нормальная нагрузка, Н; Δt — временной интервал, с
Адгезионный	$K_{adh} e^{aT} V_c w \bar{\sigma} \Delta t$	K_{adh} — коэффициент адгезионного изнашивания, м ³ /Н; a — твердость, МПа; T — температура, К
Диффузионный	$K_{diff} \sqrt{V_c V B e^{-\frac{K_Q}{T+273}}} w \Delta t$	K_{diff} — коэффициент диффузионного изнашивания, м ³ /Н; K_Q — константа, зависящая от энергии активации диффузии
Окислительный	$K_{ox} \frac{W}{3\bar{\sigma}T} V_c \Delta t$	K_{ox} — коэффициент химического изнашивания, м ³ /Н; W — прилагаемая нагрузка, Н

Результаты и их обсуждение

Основной целью поискового исследования было установление основных факторов и механизмов, влияющих на процесс изнашивания рабочих органов горных машин при экскавации породы в условиях высоких температур горного массива.

Влияние высоких температур увеличивает интенсивность изнашивания: происходят фазовые преобразования в стали, что приводит к уменьшению сопротивляемости износу [12, 26]. Данные процессы усугубляются при многократном цикле нагрев-охлаждение [10, 30, 31].

Доминирующими механизмами изнашивания при условиях высоких температур будут абразивный и адгезионный износ, а также термическая усталость [1, 35].

Для прогноза срока эксплуатации, а также оценки остаточного ресурса можно воспользоваться расчетными мето-

диками, приведенными в работах [1, 9, 34, 35], на основе которых целесообразно создать унифицированную методику, позволяющую учитывать условия эксплуатирующей техники.

Заключение

Проведенные исследования показали слабую проработку темы в отечественных литературных источниках. Методики, учитывающие высокотемпературное изнашивание исполнительных органов горных машин, практически не встречаются и в зарубежной научной литературе. Исходя из этого, а также из результатов обзора, можно заключить следующее:

1. Применение методов определения влияния термической усталости не находит применения для оценки остаточного ресурса рабочих органов выемочно-погрузочных машин, эксплуатируемых в высокотемпературных условиях, когда влияние температур подтвержде-

но значительным количеством исследований на ресурс.

2. Установлено, что в условиях эксплуатации горной техники доминирующими факторами потери ресурса исполнительных органов являются механизмы адгезии, абразии и термическая усталость;

3. Проработка математической основы механизмов изнашивания, представленной в источниках, позволит создать

математическую модель развития процессов высокотемпературного абразивного изнашивания вкупе с термической усталостью для определения остаточного ресурса исполнительных органов.

Коллектив авторов выражают благодарность научному руководителю Кремчеву Эльдару Абдолловичу за помощь в написании и оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grzesik W.* Tool wear and damage / *Advanced machining processes of metallic materials.* 2017, pp. 215–239.

2. *Starzhinskii V. E., Soliterman Yu. L., Goman A. M., Osipenko S. A.* Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention // *Journal of Friction and Wear.* 2008. Vol. 29. No 5. Pp. 340 – 353.

3. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».

4. *Казакова Ю. Д., Вахрушев С. И.* Исследование износостойкости рабочих органов строительных и дорожных машин в различных условиях эксплуатации // *Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии.* – 2016. – № 6. – С. 310 – 319.

5. *Шарифов З. З., Алиев Ч. М., Кулиев А. М.* Исследование влияния шероховатости поверхности на износ поверхностного слоя деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова.* – 2018. – № 6. – С. 1262 – 1272.

6. *Chaus A. S., Rudnitskii F. I.* Influence of cutting conditions of cast-metal cutting tools in their wear and durability: Analysis of cutting conditions of tools // *Journal of Friction and Wear.* 2007. Vol. 25. No 5. Pp. 416 – 421.

7. *Пилюшина Г. А.* Особенности изнашивания рабочих органов строительных и дорожных машин // *Новые материалы и технологии в машиностроении.* – 2009. – № 10. – С. 80 – 82.

8. *Masloosh K. M., Eyre T. S.* Abrasive wear and its application to digger teeth // *Tribology International.* 1985. Vol. 18. No 5. Pp. 259 – 266.

9. *Bogdanovich P. N.* Fatigue wear of materials under dynamic contact loading // *Journal of Friction and Wear.* 2013. No 34 (5). Pp. 349 – 357.

10. *Bouzakis K.-D., Batsiolas M., Skordaris G., Stergioudi F., Michailidis N.* Repetitive impact test near uncoated and coated cutting edges for assessing their fatigue behavior // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology.* 2014. No 8. Pp. 63 – 69.

11. *Pauschitz A., Roy M., Franek F.* Mechanisms of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures // *Tribology International.* 2008. Vol. 41. No 7. Pp. 584 – 602.

12. *Rojacz H., Pahr H., Baumgartner S., Varga M.* High temperature abrasion resistance of differently welded structural steels // *Tribology International.* 2017. Vol. 113. Pp. 487–499. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.01.039.

13. *Талеров М. П., Болобов В. И.* Долговечность и виды отказов тангенциальных поворотных резцов // *Горный журнал.* – 2018. – № 4. – С. 77 – 81.

14. *Kremcheev E. A., Gromyka D. S., Nagornov D. O.* Techniques to determine spontaneous ignition of brown coal // *Journal of Physics: Conference Series.* 2018. Vol. 1118. No 1. Pp. 12 – 21.

15. Паначев И. А., Насосов М. Ю., Антонов К. В. К разработке модели взаимодействия режущей кромки ковша шагающего экскаватора со взорванной горной породой // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2004. — № 2. — С. 37–40.
16. Авдеева Е. С., Кузнецова В. Н. Исследование влияния абразивного изнашивания зуба ковша экскаватора на величину сопротивления копанью грунта // Труды аспирантов и студентов ГОУ «Сибди»: сборник научных статей. Омск, 2011. — С. 3–7.
17. Шкуров Р. У., Рожина М. А., Таджиходжаева М. Р. Влияние величины износа зубьев ковшей экскаваторов на эффективность их использования // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. — 2011. — № 10. — С. 37–38.
18. Обидов Н., Рузибаев А., Асадова М., Ашуров Ш. Выбор зубьев ковшей одноковшовых экскаваторов зависимости от условий эксплуатации // World Science: Problems and Innovations. Материалы XXVIII международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. — С. 89–92.
19. Bosnjak S. M., Arsić M. A., Gnjatović N., Milenović I. L. J., Arsic D. Failure of the bucket wheel excavator buckets // Engineering Failure Analysis. 2018. No 84. Pp. 247–261.
20. Kumar B., Alam T. Excavator bucket tooth wear analysis // International conference on electrical, electronics, and optimization techniques (ICEEOT). 2016. Pp. 3364–3366. DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755328.
21. Болобов В. И., Чупин С. А., Бочков В. С., Мишин И. И. Увеличение срока службы породоразрушающих резцов путем повышения износостойкости их державок термомеханической обработкой // Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 67–71.
22. Rusinski E., Hamarkiewicz P., Kowalczyk M., Moczko P. Examination of the causes of a bucket wheel failure in a bucket wheel excavator // Engineering Failure Analysis. 2010. No 17. Pp. 1300–1312.
23. Sarychev V. D., Granovskii A. Yu., Nevskii S. A., Konovalov S. V., Gromov V. E. Wear model of an excavator bucket // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1909. No 1. Pp. 1–4. Article 020186.
24. Yingfrei G., Munoz P., Galloway A. Influence of cutting parameters and tool wear on the surface integrity of cobalt-based Stellite 6 alloy when machined under a dry cutting environment // Journal of Materials Engineering and Performance. 2016. Vol. 26. No 1. Pp. 312–326.
25. Munoz-Escalona P., Díaz N., Cassier Z. Prediction of tool wear mechanisms in face milling AISI 1045 steel // Journal of Materials Engineering and Performance. 2011. Vol. 21. No 6. Pp. 797–808.
26. Pauschitz A., Roy M., Franek F. Mechanisms of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures // Tribology International. 2008. Vol. 41. No 7. Pp. 584–602.
27. Singh G., Kaur M., Upadhyaya R. Wear and friction behavior of NiCrBSi coatings at elevated temperatures // Journal of Thermal Spray Technology. 2019. No 28. Pp. 1081–1102.
28. Torres H., Varga M., Widder F. J., Cihak U.-Bayr, Viskovic O., Ripoll M. R. Experimental simulation of high temperature sliding contact of hot rolled steel // Tribology International. 2016. Vol. 93. Pp. 745–754. DOI: 10.1016/J.TRIBOINT.2015.01.007.
29. Varga M., Badisch E. Temperature and load influence on in-situ formed layers during high temperature abrasion // Wear. 2017. Vol. 384. Pp. 114–123.
30. Roa J. J., Besharatloo H., Fargas G., Calvo J., Mateo A. Phase transformation under thermal fatigue of high Mn-TWIP steel: Microstructure and mechanical properties // Material Science & Engineering A. 2016. Vol. 677. Pp. 431–437.
31. Farivar H., Novokshanov D., Richter S., Lenz D., Bleck W., Prahl U. Core microstructure-depending bending fatigue behavior and crack growth of a case-hardened steel // Material Science & Engineering A. 2019. Vol. 762. Article 138040. DOI: 10.1016/J.MSEA.2019.138040.
32. Bibik V., Ivushkina N., Arhipova D. Calculation of the intensity of adhesive-fatigue wear of cutting tools // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 2016. Vol. 142. No 1.

33. Teng Z., Wu H., Boller C., Starke P. A unified fatigue life calculation based on intrinsic thermal dissipation and microplasticity evolution // *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105370.

34. Ya. Qi, Wang B., Li Sh., Ren X., Zhou J., Li Yu., Mo J. Improved quantitative analysis method for evaluating fatigue cracks in thermal fatigue testing // *Materials Letters*. 2019. Vol. 242. Pp. 115 – 118.

35. Zhu D., Zhang X., Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013. No 64. Pp. 60 – 77. **PLAAS**

REFERENCES

1. Grzesik W. Tool wear and damage. *Advanced machining processes of metallic materials*. 2017, pp. 215–239.

2. Starzhinskii V.E., Soliterman Yu.L., Goman A.M., Osipenko S.A. Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention. *Journal of Friction and Wear*. 2008. Vol. 29. No 5. Pp. 340 – 353.

3. *Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredeleniya, GOST 27674-88* [Friction, wear and lubrication. Terms and definitions, State Standart 27674-88]. Moscow, Standarty, 1992, 21 p.

4. Kazakova Yu.D., Vakhrushev S.I. Investigation of wear resistance of the working body of the building and road machines in various operating conditions. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii*. 2016, no 6, pp. 310 – 319. [In Russ].

5. Sharifov Z.Z., Aliev Ch.M., Kuliev A.M. Research of surface roughness influence on wear resistant characteristics of ship machinery and mechanisms parts' surface layer processed with different methods. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2018, no 6, pp. 1262 – 1272. [In Russ].

6. Chau A.S., Rudnitskii F.I. Influence of cutting conditions of cast-metal cutting tools in their wear and durability: Analysis of cutting conditions of tools. *Journal of Friction and Wear*. 2007. Vol. 25. No 5. Pp. 416 – 421.

7. Pilyushina G.A. Wear specifics of construction and road machines operating tools. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2009, no 10, pp. 80 – 82. [In Russ].

8. Masloosh K.M., Eyre T.S. Abrasive wear and its application to digger teeth. *Tribology International*. 1985. Vol. 18. No 5. Pp. 259 – 266.

9. Bogdanovich P.N. Fatigue wear of materials under dynamic contact loading. *Journal of Friction and Wear*. 2013. No 34 (5). Pp. 349 – 357.

10. Bouzakis K.-D., Batsiolas M., Skordaris G., Stergioudi F., Michailidis N. Repetitive impact test near uncoated and coated cutting edges for assessing their fatigue behavior. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014. No 8. Pp. 63 – 69.

11. Pauschitz A., Roy M., Franek F. Mechanisms of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures. *Tribology International*. 2008. Vol. 41. No 7. Pp. 584 – 602.

12. Rojacz H., Pahr H., Baumgartner S., Varga M. High temperature abrasion resistance of differently welded structural steels. *Tribology International*. 2017. Vol. 113. Pp. 487–499. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.01.039.

13. Talerov M.P., Bolobov V.I. Life and failures of tangential-rotary picks. *Gornyi Zhurnal*, 2018, No 4, pp. 77 – 81. [In Russ].

14. Kremcheev E.A., Gromyka D.S., Nagornov D.O. Techniques to determine spontaneous ignition of brown coal. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1118. No 1. Pp. 12 – 21.

15. Panachev I.A., Nasosov M. Yu., Antonov K. V. On the development of a model for interaction between cutting edge of walking excavator bucket and blasted rock. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004, no 2, pp. 37 – 40. [In Russ].

16. Avdeeva E.S., Kuznecova V.N. Study on the impact of abrasive wear of excavator bucket tooth on the value of soil digging resistance. *Trudy aspirantov i studentov GOU «Sibadi»: sbornik nauchnykh statey* [Proceedings of postgraduates and students of SibADI state University: collection of scientific articles], Omsk, 2011, pp. 3 – 7. [In Russ].

17. Shkurov R. U., Rozhina M. A., Tadzhihodzhaeva M. R. The impact of depreciation of the teeth excavator bucket on the effectiveness of their use. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. 2011, no 10, pp. 37 – 38. [In Russ].
18. Obidov N., Ruzibaev A., Asadova M., Ashurov Sh. Selection of teeth of bucket single-bucking excavators depending on operating conditions. *World Science: Problems and Innovations. Materialy XXVIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [World Science: Problems and Innovations. Materials of the XXVIII international scientific and practical conference], Penza, Nauka i Prosveshchenie, 2019, pp. 89 – 92. [In Russ].
19. Bosnjak S. M., Arsić M. A., Gnjatović N., Milenović I. L. J., Arsic D. Failure of the bucket wheel excavator buckets. *Engineering Failure Analysis*. 2018. No 84. Pp. 247 – 261.
20. Kumar B., Alam T. Excavator bucket tooth wear analysis. *International conference on electrical, electronics, and optimization techniques (ICEEOT)*. 2016. Pp. 3364 – 3366. DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755328.
21. Bolobov V. I., Chupin S. A., Bochkov V. S., Mishin I. I. Service life extension for rock cutters by increasing wear resistance of holders by thermomechanical treatment. *Gornyi Zhurnal*, 2019, No 5, pp. 67 – 71. [In Russ].
22. Rusinski E., Hamartkiewicz P., Kowalczyk M., Moczko P. Examination of the causes of a bucket wheel failure in a bucket wheel excavator. *Engineering Failure Analysis*. 2010. No 17. Pp. 1300 – 1312.
23. Sarychev V. D., Granovskii A. Yu., Nevskii S. A., Kononov S. V., Gromov V. E. Wear model of an excavator bucket. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1909. No 1. Pp. 1 – 4. Article 020186.
24. Yingfrei G., Munoz P., Galloway A. Influence of cutting parameters and tool wear on the surface integrity of cobalt-based Stellite 6 alloy when machined under a dry cutting environment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 26. No 1. Pp. 312 – 326.
25. Munoz-Escalona P., Díaz N., Cassier Z. Prediction of tool wear mechanisms in face milling AISI 1045 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2011. Vol. 21. No 6. Pp. 797 – 808.
26. Pauschitz A., Roy M., Franek F. Mechanisms of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures. *Tribology International*. 2008. Vol. 41. No 7. Pp. 584 – 602.
27. Singh G., Kaur M., Upadhyaya R. Wear and friction behavior of NiCrBSi coatings at elevated temperatures. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. No 28. Pp. 1081 – 1102.
28. Torres H., Varga M., Widder F. J., Cihak U.-Bayr, Viskovic O., Ripoll M. R. Experimental simulation of high temperature sliding contact of hot rolled steel. *Tribology International*. 2016. Vol. 93. Pp. 745 – 754. DOI: 10.1016/J.TRIBOINT.2015.01.007.
29. Varga M., Badisch E. Temperature and load influence on in-situ formed layers during high temperature abrasion. *Wear*. 2017. Vol. 384. Pp. 114 – 123.
30. Roa J. J., Besharatloo H., Fargas G., Calvo J., Mateo A. Phase transformation under thermal fatigue of high Mn-TWIP steel: Microstructure and mechanical properties. *Material Science & Engineering A*. 2016. Vol. 677. Pp. 431 – 437.
31. Farivar H., Novokshanov D., Richter S., Lenz D., Bleck W., Prahl U. Core microstructure-dependent bending fatigue behavior and crack growth of a case-hardened steel. *Material Science & Engineering A*. 2019. Vol. 762. Article 138040. DOI: 10.1016/J.MSEA.2019.138040.
32. Bibik V., Ivushkina N., Arhipova D. Calculation of the intensivity of adhesive-fatigue wear of cutting tools. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. 2016. Vol. 142. No 1.
33. Teng Z., Wu H., Boller C., Starke P. A unified fatigue life calculation based on intrinsic thermal dissipation and microplasticity evolution. *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105370.
34. Ya. Qi, Wang B., Li Sh., Ren X., Zhou J., Li Yu., Mo J. Improved quantitative analysis method for evaluating fatigue cracks in thermal fatigue testing. *Materials Letters*. 2019. Vol. 242. Pp. 115 – 118.
35. Zhu D., Zhang X., Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013. No 64. Pp. 60 – 77.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Громыка Дмитрий Сергеевич¹ — аспирант, e-mail: poloronta@yandex.ru,

Утенкова Татьяна Геннадьевна¹ — аспирант,

Короткова Ольга Юрьевна¹, аспирант,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Громыка Д.С., e-mail: poloronta@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.S. Gromyka¹, Graduate Student, e-mail: poloronta@yandex.ru,

T.G. Utenkova¹, Graduate Student,

O.Yu. Korotkova¹, Graduate Student,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: D.S. Gromyka, e-mail: poloronta@yandex.ru.

Получена редакцией 18.03.2020; получена после рецензии 17.06.2020; принята к печати 10.01.2021.

Received by the editors 18.03.2020; received after the review 17.06.2020; accepted for printing 10.01.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ЛАВЫ НА ВЫСОТУ ЗОНЫ ПОЛНОГО ДРЕНИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОЩНОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ВОДОПРИТОКОВ

(2020, № 11, СБ 39, 12 с.)

Сидоренко Андрей Александрович¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru,

Белова Дария Валерьевна¹ — аспирант, e-mail: danechka.danila@gmail.com,

Иконников Дмитрий Андреевич¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: lkonnikov_DA@pers.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Проведена оценка влияния длины лавы на высоту зоны полного дренирования (ЗПД) воды в подработанных зонах массива горных пород и величину водопритока в выработке выемочных участков. Расчет параметров ЗПД с использованием существующих методических подходов и действующих нормативных документов показал наличие существенных недостатков, не позволяющих осуществлять надежный прогноз параметров ЗПД. Предложено использование метода численных исследований, позволяющего учитывать геометрические параметры зон подработки, и свойства горных пород в ней. Представлены результаты численных исследований для условий шахты им. В.Д. Ялевского, сделан вывод о нецелесообразности увеличения длины лавы.

Ключевые слова: подземная разработка, угольные пласты, длина лавы, напряженно-деформированное состояние, численные исследования, высота зоны водопроводящих трещин.

ESTIMATION OF INFLUENCE OF THE LONGWALL PANEL WIDTH ON HEIGHT OF COMPLETE GROUNDWATER DRAINAGE ZONE IN THICK COAL SEAM MINING UNDER INCREASED WATER INFLOW CONDITIONS

A.A. Sidorenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: sidorenkoaa@mail.ru,

D.V. Belova¹, Graduate Student, D.A. Ikonnikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The influence of the lava length on the height of the full drainage zone of water in the sub-worked zones of the rock mass and the amount of water inflow in the development of excavation sites was estimated. The calculation of the parameters of the full drainage zone using existing methodological approaches and current regulatory documents showed the presence of significant shortcomings that do not allow for a reliable forecast of the parameters of the drainage zone. It is proposed to use the method of numerical studies, which allows to take into account both the geometric parameters of the work-in zones and the properties of rocks in the work-in zone. The results of numerical studies for the conditions of the V. D. Yalovsky mine are presented, and it is concluded that it is impractical to increase the length of the lava.

Key words: underground mining, coal seams, longwall panel width, strain-stress state, numerical simulation, height of complete groundwater drainage.