УДК 621.879.0.32.004.69(035)

DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_67

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКСКАВАТОРОВ ЭКГ-10 ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕЩИН

М.Ю. Насонов¹, Д.А. Юнгмейстер¹, До Дык Чонг¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ductrongiemm@gmail.com

Анномация: Металлические конструкции экскаваторов при разработке взорванных и невзорванных горных пород испытывают циклические нагрузки, которые вызывают образование и развитие трещин. В основном трещины возникают из дефектов сварных швов. Несмотря на периодический приборный контроль сварных швов (ультразвуковой, рентгеновский, акустико-эмиссионный и т.д.), трещины при определенных обстоятельствах могут приводить к аварийным ситуациям. Различные условия забоев, подготовки взрывом горных пород, состояния металлоконструкций приводят к различной скорости развития трещин, что невозможно оценить интуитивно. Требуются сведения о параметрах развития трещин в зависимости от внешних условий. Проведенные исследования влияния взрывной подготовки забоев к экскавации показали, что на скорость развития трещин в металлоконструкциях экскаваторов влияют средний диаметр куска во взорванном развале пород и размер блоков в невзорванных породах. При этом меняется характер нагружения. Наличие сведений о скоростях роста трещин в металлоконструкциях экскаватора позволяет своевременно устанавливать момент разрушения экскаватора и производить своевременную постановку его на ремонт.

Ключевые слова: экскаваторы, металлоконструкции, трещины, напряжения, дефекты, трещиностойкость, усталость металла, горные породы.

Для цитирования: Насонов М. Ю., Юнгмейстер Д. А., До Дык Чонг Оценка долговечности металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при наличии трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 67–79. DOI: $10.25018/0236_1493~2022~11~0~67$.

Endurance evaluation of metal structures containing cracks in mining shovel EKG-10

M.Yu. Nasonov¹, D.A. lungmeister¹, Do Duc Trong¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ductrongiemm@gmail.com

Abstract: Metal structures of mining shovels in operation with blasted and non-blasted rocks experience cyclic loads which induce initiation and growth of cracks. Cracks grow mainly from faulted welding. Despite regular periodic control of welds (ultrasonic, X-ray, acoustic emission, etc.), cracks appear and grow, and can lead to accidents. Different conditions of mining and blasting and different behavior of metal structures induce different rates of crack propagation, which is impossible to assess on a hunch. It is necessary to know crack propagation parameters

as function of ambient conditions. The studies of the effect of blasting before excavation show that the average rate of crack propagation in metal structures of mining shovels depends on the average size of fragments in rock piles after blasting and on the size of blocks in non-blasted rocks. The loading nature is different in these cases. The knowledge of crack propagation rates in metal structures of mining shovels allows prompt detection of failure moments in the shovels and enables well-timed repair of the machines.

Key words: mining shovels, metal structures, cracks, stresses, defects, crack resistance, metal fatigue, rocks.

For citation: Nasonov M. Yu., Iungmeister D. A., Do Duc Trong Endurance evaluation of metal structures containing cracks in mining shovel EKG-10. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(11):67-79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_67.

Введение

Для постановки экскаваторов на ремонт в связи с наличием развивающихся дефектов в их металлоконструкциях необходимо представлять примерное время роста этих дефектов до критического размера. Для этого необходимо знать начальный размер трещины, скорость ее роста и длительность развития до критического размера. На скорость роста трещины влияет характер нагружения металлоконструкции, который зависит от качества подготовки пород взрывом, если это взрываемые породы, и от прочности пород, если разработка ведется без взрывной подготовки.

Основными параметрами, описывающими развал пород, являются средний диаметр куска, число некондиционных кусков на единичный объем породы и число кусков, имеющих значительные размеры. От этого зависят параметры циклического нагружения металлоконструкций экскаваторов.

При экскавации мягких пород стружка грунта плавно заходит в ковш экскаватора, практически не вызывая механических колебаний металлоконструкций, и цикл напряжений определяется числом наполнений и опорожнений ковша, т.е. рабочим циклом. При разработке взорванных скальных и невзорванных

горных пород к рабочим циклам добавляются и циклы от столкновения ковша с каждым куском породы, даже имеющим незначительный размер. Разработка некондиционных и негабаритных кусков приводит к возникновению большого числа циклов нагружения, не совпадающего с числом этих кусков. В результате если на мягких породах экскаватор может работать без поломок весь свой нормативный срок эксплуатации, то при работе на взорванных породах в его металлоконструкциях возникают трещины уже в первый год эксплуатации.

Методика, которая позволила бы предсказать время роста трещин, должна учитывать как параметры нагружения экскаватора, так и параметры трещиностойкости материала, из которого изготовлены металлоконструкции экскаватора.

В данной методике должны учитываться конкретные параметры разрабатываемых пород на конкретном участке, а также должна существовать история нагружения экскаватора за период времени, соответствующий межосмотровому. Для этого необходимо знать все изменения параметров взрывной подготовки за рассматриваемый период времени, вид разрабатываемой породы и ее прочность.

Накопление повреждений и дефектов в металлоконструкциях исследовалось на различных машиностроительных и строительных объектах [1–3]. Особенно широко проводились исследования на строительных и производственных кранах, резервуарах и газгольдерах [4-6]. Изучались вопросы накопления дефектов при различных температурах и режимах нагружения [5-9]. Широкие работы проводятся по оценке живучести, малоцикловой и многоцикловой усталости и долговечности машин различного назначения [10-15]. Большое внимание уделяется оценке надежности машин и механизмов [15-20]. Для этого используют различные методы неразрушающего контроля, включая акустическую эмиссию [21, 22]. Все эти работы позволяют создавать различные методики прогнозирования поведения объектов и оценки остаточного ресурса [23, 24]. Исследование процессов изготовления металлоконструкций при помощи автоматической сварки, а также ремонтных работ по устранению трещин с применением ручной сварки показало, что во втором случае число возникающих дефектов в 20 раз больше, чем в первом [25-28]. Однако в плане постановки объектов на ремонт, а таже в плане их списания работ значительно меньше. Для этого используются другие подходы.

Реализация исследования

Для оценки технического состояния металлоконструкций экскаваторов изучалась роль гранулометрического состава пород в изменении напряженности этих конструкций, контролировалось появление трещин в сварных швах.

В качестве объекта исследований был выбран карьерный экскаватор ЭКГ-10 «прямая лопата» (рис. 1).

Рассматривалось состояние сварных швов, наиболее ответственных с точки зрения безаварийной работы. В резуль-

тате статистического анализа документов УЗК-контроля по нахождению трещин в сварных швах такими конструкциями оказались стрела и надстройка экскаватора.

Для оценки долговечности металлоконструкций карьерных экскаваторов использовался тензометрический способ определения напряжений в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-10. В исследовании применялся аналого-цифровой преобразователь АЦП-ЦАП, тензодатчики и компьютерный осциллограф.

Тензодачики создавались посредством наклейки тензорезисторов на металлическую пластину, которая приваривалась к поверхности металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 с помощью микросварочного аппарата, полученные сигналы деформаций конструкций обрабатывались аналого-цифровым преобразователем АЦП-ЦАП.

Исследования проводились в забоях со средним диаметром куска $d_{\rm cp}$ = 0,2÷ \div 0.5 м.



Рис. 1. Работа экскаватора ЭКГ-10 при погрузке породы в большегрузный автосамосвал

Fig. 1. Operation of shovel EKG-10 in loading of heavy-duty dump truck



Рис. 2. Общий вид блочности массива невзорванных пород (угольные разрезы Северного Вьетнама) Fig. 2. Block size of non-blasted rocks (open pit coal mines in Northern Vietnam)

Невзорванные породы в массиве разделяются на блоки, которые могут наблюдаться визуально (рис. 2).

В исследовании рассматривались породы разной категории блочности (I, II и III) (рис. 3).

Классификация пород разработана И.А. Паначевым; согласно этой классификации, породы делятся на три категории блочности: мелкоблочные — диаметр 30 см; среднеблочные — 80 см, крупноблочные — 2 м.

Крупноблочные породы подготавливаются взрывом, среднеблочные и мелкоблочные экскавируются без взрывной подготовки.

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что при разработке взорванных скальных пород наблюдаются большие скачки напряжений в металлоконструкциях экскаваторов при раскладке некондиционных кусков породы, значительно меньшие — при наполнении ковша экс-

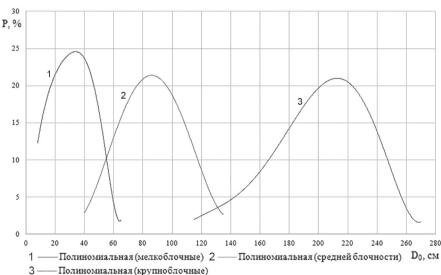
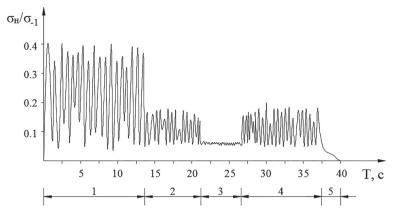


Рис. 3. Полимодальность распределения естественных отдельностей вскрышных пород угольных разрезов

Fig. 3. Polymodal natural jointing of overburden rocks in open pit coal mines



1 – раскладка некондиционных и кондиционных кусков породы;

2 – наполнение ковша взрывной породой; 3 – поворот на разгрузку; 4 – выгрузка; 5 – поворот в забой; $\sigma_{_{\rm H}}$ – номинальные напряжения в зоне расположения тензодатчика; $\sigma_{_{\rm H}}$ – предел выносливости стали

Рис. 4. Циклограмма нагружения металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам в процессе экскавации взорванной крупноблочной горной массы (подъем ковша)

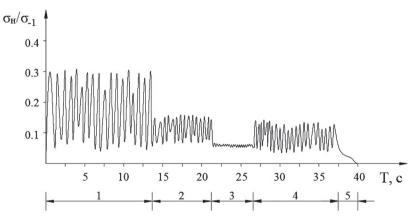
Fig. 4. Loading actigram of metal structures of shovel EKG-10 per cycles during excavation of coarse blocksize non-blasted rocks (bucket raise)

каватора. После отрыва ковша колебания в металлоконструкциях резко уменьшаются и доходят до минимума и снова увеличиваются при выгрузке породы из ковша (рис. 4, 5).

Разработка среднеблочных невзорванных горных пород приводит к вспле-

скам напряжений при движении ковша в горном массиве. Причем при разрушении блока всплески напряжений значительно меньше, нежели при переходе от блока к блоку (рис. 6).

При разработке мелкоблочных невзорванных горных пород происходят

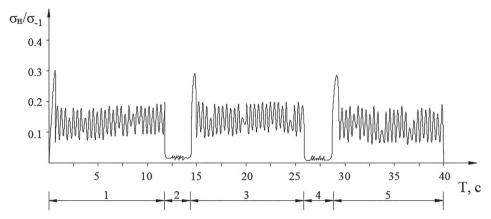


1 – раскладка некондиционных и кондиционных кусков породы;

2 – дополнение ковша горной массой; 3 – поворот на разгрузку; 4 – выгрузка; 5 – поворот в забой; $\sigma_{\scriptscriptstyle \perp}$ – номинальные напряжения в зоне расположения тензодатчика; $\sigma_{\scriptscriptstyle \perp}$ – предел выносливости стали

Рис. 5. Циклограмма нагружения металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам процесса экскавации взорванной крупноблочной горной массы (напор ковша)

Fig. 5. Loading actigram of metal structures of shovel EKG-10 per cycles during excavation of coarse block-size non-blasted rocks (bucket racking)



1 – блок I; 2 – межблочное пространство; 3 – блок II; 4 – межблочное пространство; 5 – блок III; $\sigma_{...}$ – номинальные напряжения в зоне расположения тензодатчика; $\sigma_{...}$ – предел выносливости стали

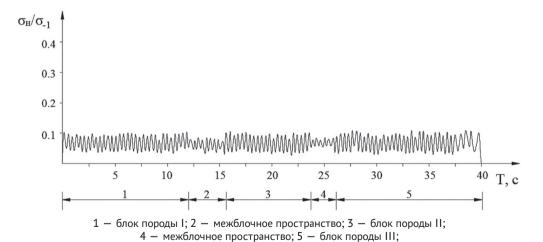
Рис. 6. Циклограмма нагружения металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам в процессе экскавации среднеблочной невзорванной горной породы (напор ковша)

Fig. 6. Loading actigram of metal structures of shovel EKG-10 per cycles during excavation of medium blocksize blasted rocks

малые и равномерные всплески напряжений при движении ковша в процессе черпанья (рис. 7).

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости изменения числа циклов механического нагружения и величин средних амплитуд $\Delta \sigma$ от гранулометрического состава взорванных горных пород (рис. 8, 9).

Установлено, что с увеличением среднего диаметра куска в развале увеличивается относительное число циклов механического нагружения металлоконструкций экскаватора — n/V(n- число



 $\sigma_{_{\! H}}$ — номинальные напряжения в зоне расположения тензодатчика; $\sigma_{_{\! -\! 1}}$ — предел выносливости стали

Рис. 7. Уровень нагруженности металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам в процессе экскавации мелкоблочной невзорванной горной массы (напор ковша)

Fig. 7. Burden level of metal structures of shovel EKG-10 per cycles during excavation of small block-size nonblasted rocks

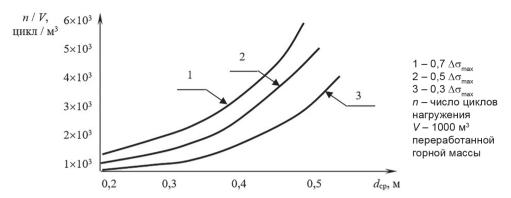


Рис. 8. Изменение относительного числа циклов механического нагружения в зависимости от гранулометрического состава взорванных горных пород с учетом средней относительной амплитуды в долях от максимальной

Fig. 8. Relative number of mechanical loading cycles versus grain size composition of blasted rocks with regard to average relative-to-maximum amplitude ratio

циклов нагружения, V -единица объема переработанной горной массы).

При разложении циклограмм нагружения на амплитудные уровни с увеличением среднего диаметра куска в развале от 0.2 до 0.5 происходит увеличение n/V: на уровне средней относительной амплитуды — 0.7 от уровня максимальной — в 5.5 раз; при 0.5 от максимальной — в 4.9 раз; при 0.3 от максимальной — в 3.4 раза.

Величины средних амплитуд циклов нагружения — $\Delta\sigma/\sigma_{-1}$ — возрастают в зависимости от изменения $d_{\rm cp}$ с 0,2 до 0,5 м в 5,5 раз.

В результате проведенных исследований установлено: увеличение среднего диаметра куска в развале с 0,2 до 0,5 м при работе экскаватора ЭКГ-10 приводит к увеличению скорости роста трещин в металлоконструкциях в 6 раз.

Разработка невзорванных пород с размерами блоков от 0,1 до 0,3 м приводит к увеличению скорости роста трещины в 1,3 раза, при этом уменьшается число циклов нагружения до достижения трещинами их критических длин в 1,5 раза.

Сравнение относительных скоростей роста трещин в металлоконструкциях

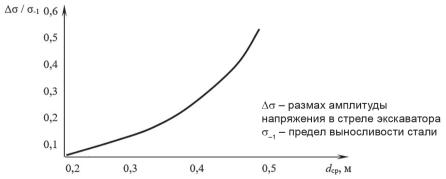


Рис. 9. Изменение величин средних амплитуд циклов нагружения в стреле экскаватора в зависимости от гранулометрического состава взорванных горных пород

Fig. 9. Average amplitude of loading cycles in shovel beam as function of grain size composition of blasted rocks

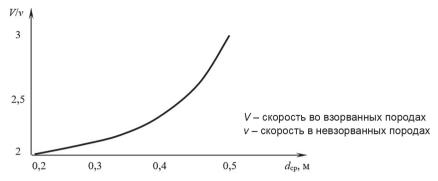


Рис. 10. Изменение относительной скорости роста трещин в стреле экскаватора ЭКГ-10 в зависимости от гранулометрического состава взорванных горных пород при сравнении со скоростью при разработке невзорванных пород

Fig. 10. Relative rate of crack growth in EKG-10 shovel beam as function of grain size composition of blasted rocks by comparison with crack growth rate in shoveling non-blasted rocks

экскаватора ЭКГ-10 при разработке взорванных и невзорванных пород показало увеличение скорости от 2 до 3 раз в зависимости от изменения среднего диаметра куска в развале — $d_{\rm cp}$ от 0,2 до 0,5 м (рис. 10).

На основании полученных экспериментальных сведений создаются гистограммы нагружения рассчитываемого элемента конструкции (рис. 11).

Полученные гистограммы позволяют рассчитывать продолжительность роста трещины от зафиксированного размера до критического, что дает возможность спрогнозировать момент аварии экскаватора. Для этого используют формулы циклической долговечности металлоконструкций при наличии растущих трещин.

Заключение

Произведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Увеличение среднего диаметра куска в развале взорванных пород с 0,2 до 0,5 м приводит к увеличению относительного числа циклов механического нагружения металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 до 5,5 раз.

Величины средних амплитуд циклов нагружения возрастают в зависимости от изменения среднего диаметра куска в развале с 0.2 до 0.5 м в 6 раз.

Увеличение среднего диаметра куска в массиве невзорванных пород с 0,1 до 0,3 м при работе экскаватора ЭКГ-10 приводит к увеличению скорости роста трещин в металлоконструкциях в 1,3 ра-

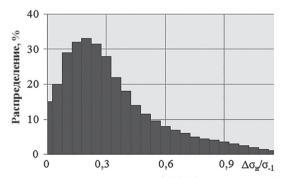


Рис. 11. Гистограмма нагружения стрелы экскаватора $ЭК\Gamma$ -10 в вертикальной плоскости Fig. 11. Loading bar chart of beam of shovel EKG-10 in vertical plane

за, при этом уменьшается число циклов нагружения до достижения трещинами их критических длин в 1,5 раза.

Сравнение относительных скоростей роста трещин в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-10 при разработке взорванных и невзорванных пород показало увеличение скорости от 2 до 3 раз в зависимости от изменения среднего диаметра куска в развале от 0,2 до 0,5 м.

Полученные экспериментальные зависимости нагруженности позволяют создавать теоретические гистограммы нагружения металлоконструкций экскаваторов в зависимости от параметров разрабатываемого забоя, по которым можно рассчитывать долговечность металлоконструкций экскаваторов при наличии растущих дефектов и продлевать срок безопасной работы экскаваторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Хлыбов А. А.* Оценка накопления повреждений в конструкционных металлических материалах акустическими методами для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов: Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 2011. 33 с.
- 2. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 621—627. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.621.
- 3. Мислибаев И. Т., Махмудов А. М., Махмудов Ш. А. Теоретическое обобщение режимов функционирования и моделирование эксплуатационных показателей работы экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 102 110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.
- 4. Великанов В. С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 29 36. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.
- 5. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. 2020. T. 241. C. 10 21. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.
- 6. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of dynamic properties of mine excavator hoisting mechanism versus design parameters of operating equipment // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1118, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012054.
- 7. Богданов А. П., Гайнуллин А. А., Ефимов А. А., Левкович Р. В., Наумов Д. С., Окулов К. Ю. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов // Universum: технические науки. 2015. № 11. С. 1—25. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/defektymetallokonstruktsii-kariernyh-ekskavatorov (дата обращения: 20.04.2022).
- 8. Грабский А. А., Сергеев В. Ю., Грабская Е. П. Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов // Уголь. -2021. -№ 2. -C. 14-17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.
- 9. *Bolobov V. I.*, *Chupin S. A.* About the use of 110G13L steel as a material for the excavator bucket teeth // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, no. 1, article 012005. DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012005.
- 10. Сероштан В. И., Гаах Т. В. Процесс образования трещин в металлоконструкциях грузоподъемных кранов // Известия ТулГУ. 2016. № 5. С. 213 220.
- 11. Шишлянников Д. И., Иванов С. Л., Звонарев И. Е., Зверев В. Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 9. С. 116 124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124.

- 12. Fadeev D., Ivanov S. Features of the walking mechanism of a floating platform autonomous modular complex for the extraction and processing of peat raw materials / Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion, 2019. London: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2020, pp. 239 243. DOI: 10.1201/9781003017226-33.
- 13. Krasnyy V. A., Maksarov V. V., Maksimov D. D. Improving the wear resistance of piston rings of internal combustion engines when using ion-plasma coatings // Key Engineering Materials. 2020, vol. 854, pp. 133 139. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.133.
- 14. Семенов В. В. Работа стальных элементов и конструкций с трещинами, живучесть инженерных конструкций, имеющих трещины // Молодежный вестник ИрГТУ. 2014. № 3. С. 3-4.
- 15. Manyele S. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time // Engineering. 2017, vol. 9, pp. 599 624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
- 16. Макаров А. П., Шевченко А. Н., Павлов А. М. Определение критической длины трещины в металлоконструкциях карьерных экскаваторов // Вестник ИрГТУ. 2015. № 12. С. 57-63.
- 17. Никитин И. С., Бураго Н. Г., Никитин А. Д., Якушев В. Л. Определение критической плоскости и оценка усталостной долговечности при различных режимах циклического нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 4. С. 238—252. DOI: 10.15593/perm. mech/2017.4.15.
- 18. Горбовец М. А., Ходинев И. А., Рыжков П. В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ. 2018. № 9. С. 51 60. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
- 19. Шутова М. Н., Евтушенко С. И., Гонтаренко И. В. Определение надежности и категории технического состояния поврежденных металлических конструкций на основе численного эксперимента // Известия вузов: Северо-Кавказский регион. Технические науки. -2018. -№ 4. -C. 98-104.
- 20. Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Гладковский С. В., Голиков Н. И. О повышении надежности металлических конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур посредством комплексного применения современных методов модифицирования зоны сварного соединения // Сварочное производство. 2016. № 9. С. 3-9.
- 21. Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Емельянов А. А., Пумпур Е. В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 10. С. 86 94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
- 22. Skibin G. M., Shutova M. N., Evtushenko S. I., Chutchenko I. A. Reliability increase of running gears elements of mining traction locomotives using finite-element analysis package // IOP Conference Series: Earth and Environ-mental Science. 2017, vol. 87, no. 2, article 022021. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022021.
- 23. Агафонов К. В. Способы снижения рисков при эксплуатации подъемно-транспортного оборудования ракетных и ракетно-космических комплексов в послегарантийный период с применением неразрушающего контроля методом акустической эмиссии // Современная техника и технология. -2016. -№4. -C. 5-9.
- 24. Войченко К. Ю., Ремшев Е. Ю., Силаев М. Ю., Глушко А. Н. Исследование возможностей оценки качества нагруженных металлических конструкций акустическими методами неразрушающего контроля // Металлообработка. 2014. \mathbb{N}° 3. \mathbb{C} . 10 15.
- 25. Лахова Е. Н. Методика прогнозирования работоспособности критически нагруженных объектов машиностроения: Автореф. дис. канд. техн. наук. СПб., 2012. 18 с.

- 26. Антонова Ю. В., Гудовичев В. В., Раенко А. В., Борчев К. С., Саралидзе 3. У., Со-колов С. В. Методика оценки несущей способности и остаточного ресурса элементов конструкций // Научный журнал. 2016. № 2. С. 28—36.
- 27. *Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т.* Сварные сосуды высокого давления. М.–Л.: Машиностроение, 1982. 287 с.
- 28. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

REFERENCES

- 1. Khlybov A. A. Otsenka nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh metallicheskikh materialakh akusticheskimi metodami dlya obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii tekhnicheskikh ob"ektov [Assessment of damage accumulation in structural metal materials by acoustic methods to ensure safe operation of technical objects], Doctor's thesis, Moscow, 2011, 33 p.
- 2. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Linnik Y. N., Linnik V. Y. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, pp. 621 627. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.621.
- 3. Mislibayev I. T., Makhmudov A. M., Makhmudov Sh. A. Theoretical generalization of modes and modeling of performance criteria of cutter-loaders. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 102 110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.
- 4. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 29 36. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.
- 5. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10 21. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.
- 6. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of dynamic properties of mine excavator hoisting mechanism versus design parameters of operating equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1118, no. 1, pp. 1 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012054.
- 7. Bogdanov A. P., Gainullin A. A., Efimov A. A., Levkovich R. V., Naumov D. S., Okulov K. Yu. Defects in metal structures of quarry excavators. Universum: tekhnicheskie nauki. 2015, no. 11, pp. 1-25, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/defekty-metallokonstruktsii-kariernyh-ekskavatorov (accessed: 20.04.2022). [In Russ].
- 8. Grabsky A. A., Sergeev V. Yu., Grabskaya E. P. Rationale for choosing a strategyfor maintenance and repair of quarry excavators. *Ugol*'. 2021, no. 2, pp. 14–17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.
- 9. Bolobov V. I., Chupin S. A. About the use of 110G13L steel as a material for the excavator bucket teeth. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, article 012005. DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012005.
- 10. Seroshtan V. I., Gaah T. V. Process of formation of cracks in metal structures of cargolifting cranes. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2016, no. 5, pp. 213 220. [In Russ].
- 11. Shishlyannikov D. I., Ivanov S. L., Zvonarev I. E., Zverev V. Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 116 124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124.
- 12. Fadeev D., Ivanov S. Features of the walking mechanism of a floating platform autonomous modular complex for the extraction and processing of peat raw materials. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*, 2019. London: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2020, pp. 239 243. DOI: 10.1201/9781003017226-33.

- 13. Krasnyy V. A., Maksarov V. V., Maksimov D. D. Improving the wear resistance of piston rings of internal combustion engines when using ion-plasma coatings. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 854, pp. 133 139. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.854.133.
- 14. Semenov V. V. Work of steel elements and structures with cracks, live-honor of engineering structures that have cracks. *Young Researchers' Journal of ISTU*. 2014, no. 3, pp. 3 4. [In Russ].
- 15. Manyele S. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading cycle time. *Engineering*. 2017, vol. 9, pp. 599 624. DOI: 10.4236/eng.2017.97038.
- 16. Makarov A. P., Shevchenko A. N., Pavlov A. M. Determination of the critical length of a crack in the metal structures of quarry excavators. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015, no. 12, pp. 57 63. [In Russ].
- 17. Nikitin I. S., Burago N. G., Nikitin A. D., Yakushev V. L. Determination of the critical plane and assessment of fatigue durability under various cyclic loading regimes. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2017, no. 4, pp. 238 252. [In Russ]. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.15.
- 18. Gorbovets M. A., Khodinev I. A., Ryzhkov P. V. Equipment for testing low-cycle fatigue with a «hard» loading cycle. *Trudy VIAM*. 2018, no. 9, pp. 51 60. [In Russ]. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
- 19. Shutova M. N., Evtushenko S. I., Gontarenko I. V. Determination of reliability and the category of technical condition of damaged metal structures based on a numerical experiment. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences.* 2018, no. 4, pp. 98 104. [In Russ].
- 20. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Gladkovsky S. V., Golikov N. I. Improving the reliability of metal structures when operating in conditions of low climatic temperatures through the integrated application of modern methods for modifying the welded joint zone. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2016, no. 9, pp. 3–9. [In Russ].
- 21. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Yemelyanov A. A., Pumpur E. V. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 86 94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
- 22. Skibin G. M., Shutova M. N., Evtushenko S. I., Chutchenko I. A. Reliability increase of running gears elements of mining traction locomotives using finite-element analysis package. *IOP Conference Series: Earth and Environ-mental Science*. 2017, vol. 87, no. 2, article 022021. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022021.
- 23. Agafonov K. V. Ways to reduce risks in the operation of lifting and transport equipment of rocket and rocket-space complexes in the post-warranty period with the use of nondestructive control of acoustic emission. *Modern technics and technologies*. 2016, no. 4, pp. 5-9. [In Russ].
- 24. Voichenko K. Yu., Remshev E. Yu., Silaev M. Yu., Glushko A. N. Study of the possibilities of assessing the quality of loaded metal structures by acoustic methods of non-destructive control. Metalloobrabotka. 2014, no. 3, pp. 10 15. [In Russ].
- 25. Lakhova E. N. *Metodika prognozirovaniya rabotosposobnosti kriticheski nagruzhennykh ob"ektov mashinostroeniya* [Methods of predicting the performance of critically loaded machine building objects], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2012, 18 p.
- 26. Antonova Yu. V., Gudovichev V. V., Raenko A. V., Borchev K. S., Saralidze Z. U., Sokolov S. V. Methods forestimating the carrying capacity and residual life of structural. *Nauchnyy zhurnal*. 2016, no. 2, pp. 28 36. [In Russ].
- 27. Karzov G. P., Leonov V. P., Timofeev B. T. *Svarnye sosudy vysokogo davleniya* [Welded pressure vessels], Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1982, 287 p.
- 28. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, no. 1, article 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Насонов Михаил Юрьевич – д-р техн. наук,

доцент, профессор, e-mail: nasonov-m@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8529-1913.

 $Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич^1 - д-р техн. наук,$

профессор, e-mail: iungmeister@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7858-8340,

До Дык Чон r^1 — аспирант,

e-mail: ductrongiemm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9105-9491.

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: До Дык Чонг, e-mail: ductrongiemm@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M. Yu. Nasonov¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Professor, e-mail: nasonov-m@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8529-1913,

D.A. Iungmeister¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: iungmeister@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-7858-8340, Do Duc Trong¹, Graduate Student,

e-mail: ductrongiemm@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-9105-9491,

¹ Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: Do Duc Trong, e-mail: ductrongiemm@gmail.com.

Получена редакцией 28.03.2022, получена после рецензии 16.09.2022, принята к печати 10.10.2022. Received by the editors 28.03.2022, received after the review 16.09.2022, accepted for printing 10.10.2022.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ОБРУШЕНИЕМ РУДЫ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

(2022, № 7, CB 6, 40 c.)

Павленко С.В., Котов А.А., Савич И.Н., Романов В.А., Сухов Д.И., Савич А.О.

Изложены результаты исследований, направленных на повышение качества добываемого сырья при применении систем разработки с обрушением в процессе производства подземных горных работ на рудниках. Решалась задача по изучению истечения рудной массы при ее выпуске под обрушенными породами. Рассмотрены вопросы связанные с определением показателей извлечения, установлены закономерности движения кусков руды при торцевом выпуске.

MODERN APPROACHES TO IMPROVING THE EFFICIENCY OF UNDERGROUND MINING WHEN USING MINING SYSTEMS WITH THE COLLAPSE OF ORE AND HOST ROCKS

Pavlenko C.V., Kotov A.A., Savich I.N., Romanov V.A., Sukhov D.I., Savich A.O.

The results of research aimed at improving the quality of extracted raw materials when using development systems with collapse during the production of underground mining operations at mines are presented. The task of studying the outflow of ore mass during its release under collapsed rocks was solved. The issues related to the determination of extraction indicators are considered, the regularities of the movement of ore pieces during the end release are established.