

ВЛИЯНИЕ ВИДА ГОРНОЙ ПОРОДЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ КОРОНКИ ЗУБА КОВША ЭКСКАВАТОРА

В. И. Болобов¹, Э. В. Ахмеров¹, И. В. Ракитин¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Исследуются закономерности процесса изнашивания коронок зуба ковша экскаватора, изготовленных из высокоуглеродистых хромомарганцевых сталей, в зависимости от работы по крупнокусковой (гранит после взрывных работ) и мелкодисперсной (карьерный песок) абразивной горной породе с целью установления сторон коронки, требующих повышения износостойкости. Из анализа характера изменения геометрического профиля коронки в зависимости от вида породы, расположения, вида и размеров дефектов на нижней и верхней поверхности коронки зуба, результатов замера твердости рабочих поверхностей коронок разрабатывается заключение о различии в механизме изнашивания верхней и нижней сторон коронки при работе по крупнокусковой горной породе – для верхней стороны это ударно-абразивное изнашивание, отличающееся сравнительно небольшой скоростью убыли массы, для нижней – это чисто абразивное изнашивание, протекающее с высокой интенсивностью. Вследствие этого нижняя сторона изнашивается с большей скоростью, чем верхняя, и коронка теряет свою симметричность. В случае мелкодисперсной породы обе стороны коронки подвергаются только абразивному воздействию и изнашиваются с одинаковой скоростью с сохранением симметричности формы. Делается вывод, что для повышения срока службы коронок в случае крупнокусковой породы надо повышать износостойкость преимущественно нижней стороны, а в случае мелкодисперсной – обеих сторон.

Ключевые слова: экскаватор, коронка зуба ковша экскаватора, верхняя поверхность коронки, нижняя поверхность коронки, гранит, крупнокусковая абразивная горная порода, мелкодисперсная абразивная горная порода, песок, абразивное изнашивание, ударно-абразивное изнашивание.

Для цитирования: Болобов В. И., Ахмеров Э. В., Ракитин И. В. Влияние вида горной породы на закономерности изнашивания коронки зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 189–204. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_189.

Influence of rock type on regularities of excavator bucket tooth crown wear

V. I. Bolobov¹, E. V. Akhmerov¹, I. V. Rakitin¹

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

Abstract: Regularities of the process of wear of the crowns of an excavator bucket tooth made of high-carbon chromium-manganese steels are investigated, depending on the work on coarse (granite for blasting) and fine (quarry sand) abrasive rock in order to establish the sides of the

crown that require increased wear resistance. Based on the analysis of the nature of the change in the geometric profile of the crown, depending on the type of rock, the location, type and size of defects on the lower and upper surfaces of the tooth crown, the results of measuring the hardness of the working surfaces of the crowns, a conclusion is drawn up on the difference in the mechanism of wear of the upper and lower sides of the crown when working on large lumpy rock. rock – in the case of the upper side, this is shock-abrasive wear, characterized by a relatively low rate of weight loss, in the case of the lower side, it is purely abrasive wear, proceeding with high intensity. As a result, the lower side wears out at a faster rate than the upper side and the crown loses its symmetry. For fine rock, both sides of the crown are purely abrasive and wear at the same rate while maintaining the symmetry of the crown shape. It is concluded that in order to increase the service life of the crowns in the case of coarse rock, it is necessary to increase the wear resistance, mainly of the lower side, and when working on the finely dispersed, both sides.

Key words: excavator, excavator bucket tooth crown, crown top surface, crown bottom surface, granite, coarse abrasive rock, fine abrasive rock, sand, abrasive wear, shock-abrasive wear.

For citation: Bolobov V. I., Akhmerov E. V., Rakitin I. V. Influence of rock type on regularities of excavator bucket tooth crown wear. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–2):189–204. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_189.

Введение

Износ рабочего инструмента карьерных экскаваторов — наиболее часто встречаемая проблема на любом горнодобывающем предприятии, приводящая к простоям оборудования, повышению эксплуатационных затрат, а также снижению общей производительности производства. Зубья ковшей у экскаваторов являются наиболее часто заменяемыми элементами, срок службы которых, например, при разработке взрывной крупнокусковой горной породы (гранит), может не превышать 3–4 дней активной работы [1]. Интенсивному изнашиванию они подвергаются и при работе по мелкодисперсным грунтам [2].

В статье [3] авторами рассмотрены факторы, влияющие на износостойкость зубьев одноковшового экскаватора при работе по грунтам I–III категории и проведен детальный анализ зависимости между сопротивлением грунтов при экскавации и углом заострения зуба, меняющим свое значение вследствие воздействия абразивного вида изнашивания во время работы.

В результате была получена линейная зависимость, на основании которой удалось определить, что изменение угла заострения зуба на один градус приводит к увеличению сопротивления грунтов резанию на 0,6%.

Увеличение сопротивления при экскавации, отрицательно отражаясь на производительности рабочего оборудования экскаватора, в свою очередь приводит к снижению общей производительности технологического комплекса, в котором задействован данный экскаватор, например при добыче торфа [4–5].

В работе [6] проведены исследования процесса изнашивания зубьев ковшей карьерных экскаваторов (ЭКГ-8И и ЭКГ-10), осуществляющих погрузку взорванной массы горных пород. Ресурс зубьев при таких условиях составлял от 2 до 3 суток. В результате лабораторных исследований было определено, что во время работы преобладает абразивный характер изнашивания, а нагрузки, действующие на зуб, приводят лишь к образованию наклепанного слоя небольшой толщины, который

не способен противостоять воздействию абразивных частиц.

Авторами [7] отмечается, что износ зубьев ковшей отрицательно сказывается на производительности экскаваторов, при тяжелых условиях работы по высоко абразивным или мерзлым грунтам срок службы зубьев не превышает 3–4 дней, тогда как срок службы зубьев в относительно легких условиях может превышать 4 месяца; при работе с мелкодисперсными грунтами происходит постепенное заострение профиля зуба, а при работе с крупнокусковыми породами — затупление.

В статье [8], посвященной исследованию механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали при помощи металлографического метода, проводится сравнение особенностей протекания процессов изнашивания на микроуровне. Авторы выделяют, что на интенсивность процесса изнашивания в значительной степени влияют не только качественные и количественные параметры микроструктуры, но и энергетический параметр, который определяется энергией дефекта упаковки.

Работа [9] посвящена увеличению износостойкости рабочего инструмента горного и металлургического оборудования нанесением плазменно-порошковой наплавки. Определены состав химического порошка, а также рабочие параметры нанесения наплавочного слоя, при которых происходило повышение абразивной или ударно-абразивной износостойкости.

В работе [10] проанализирован процесс изнашивания зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-10 в тяжелых условиях работы на железорудном карьере, где ресурс зубьев составлял 4–6 рабочих смен. При значениях величины износа зубьев из стали 110Г13Л более 140 мм и величины угла больше 60°, под воз-

действием преимущественно абразивного вида изнашивания, при эксплуатации экскаватора наблюдается увеличение нагрузки на рабочий привод и металлоконструкции, повышенный износ передней части и снижение заполняемости ковша. Для повышения износостойкости авторами был изменен технологический процесс литейного производства с добавлением этапа насыщения заготовок карбидом бора, а также скорректирован геометрический профиль, позволяющий сохранять первоначальный угол заострения до величины предельного износа.

В статье [11] отмечается, что время, затрачиваемое на замену зубьев у экскаватора типа ЭКГ с объемом ковша 20 м³, на практике может превышать нормативы сервисной компании до двух раз. В работе [12] акцентируется внимание на необходимости корректировки графика технического обслуживания и ремонта в связи с особым влиянием факторов природно-техногенного характера, которые оказывают наибольшее воздействие на срок службы и техническое состояние карьерных экскаваторов.

Работа [13] посвящена анализу параметров, влияющих на процесс изнашивания зубьев; рассмотрено изменение геометрических характеристик зуба, влияние внутренних и внешних факторов, а также выделены основные стадии процесса абразивного изнашивания.

В работах [14–15] на основании полученных данных об эксплуатации горнопроходческого комбайна описывается зависимость влияния прочности горных пород не только на срок службы рабочего инструмента, но и на ресурс горных машин в целом.

В исследованиях [16–17], посвященных изнашиванию исполнительного оборудования экскаваторов при работе в условиях экстремально

высоких температур, используются средства математического моделирования для оценки износостойкости рабочего инструмента и степени влияния температуры на остаточный ресурс.

Работы [18–23] посвящены математическому моделированию процесса изнашивания рабочего инструмента экскаватора методом конечных элементов, выполняемому в специализированных программных комплексах. Отмечается, что данные расчеты позволяют осуществлять более углубленный анализ процесса изнашивания рабочего инструмента экскаваторов и выполнять предварительную оценку целесообразности новых методов по повышению износостойкости.

В работах [24–27] представлены результаты сравнительных тестов в области износостойкости рабочих инструментов экскаваторов и горных машин, работающих в аналогичных условиях, полученные в лабораторных и полевых условиях.

Данная работа посвящена анализу поверхности коронок составных зубьев как наиболее быстро изнашиваемых их элементов, отработавших по крупнокусковой и мелкодисперсной горной породе, с целью определения характера их изнашивания и разработки соответствующего решения по совершенствованию структуры металла или технологии изготовления для повышения износостойкости коронки при работе по той или иной породе.

Методика аналитических исследований

Закономерности изнашивания коронок при работе по крупнокусковой горной породе изучались на примере гранита, как породы, обладающей высокими значениями агрегатной твердости ($HV \sim 1362$ МПа) и абразивности ($a = 2000$ мг); в качестве типичной

мелкодисперсной породы был выбран карьерный песок ($HV \sim 784\text{--}1080$ МПа).

Объектом исследования являлись три изношенных коронки.

Первая (рис. 1, а), отработавшая по граниту в составе ковша тяжелого гидравлического экскаватора марки CAT 374, была идентифицирована как коронка модели Super V69 Chisel (TE-V69SD) компании ESCO с исходным весом 37 кг, высотой 419 и шириной 210 мм.

Вторая (рис. 1, б) и третья (рис. 1, в) идентифицированы как коронки модели CATJ400 Standard от компании Caterpillar с исходным весом 9,5 кг, высотой 267 мм и шириной 117 мм.

С использованием компьютерного моделирования восстанавливался боковой профиль исходных коронок, который накладывался на соответствующий профиль изношенных изделий (см. рис. 1) с анализом его изменения. Устанавливались расположение, вид и размеры дефектов на нижней и верхней поверхности коронок.

Для оценки степени пластической деформации, получаемой металлом поверхностного слоя коронок при работе по той или иной породе, с использованием ультразвукового твердомера ТКМ-359С определялась твердость металла по Роквеллу для различных участков поверхности коронок. Для каждого участка проводилось по 5 замеров HRC с определением их среднего арифметического значения, которое сравнивалось с твердостью металла обратной, недеформируемой стороны коронки, принимаемой за исходную.

Поскольку сведения о материале коронок отсутствовали, с использованием портативного анализатора марки Olympus Innov-X DELTA Element проводился рентгено-флуоресцентный анализ их состава, который сопоставлялся с составом возможных марок сталей. Зарегистрированные элементы

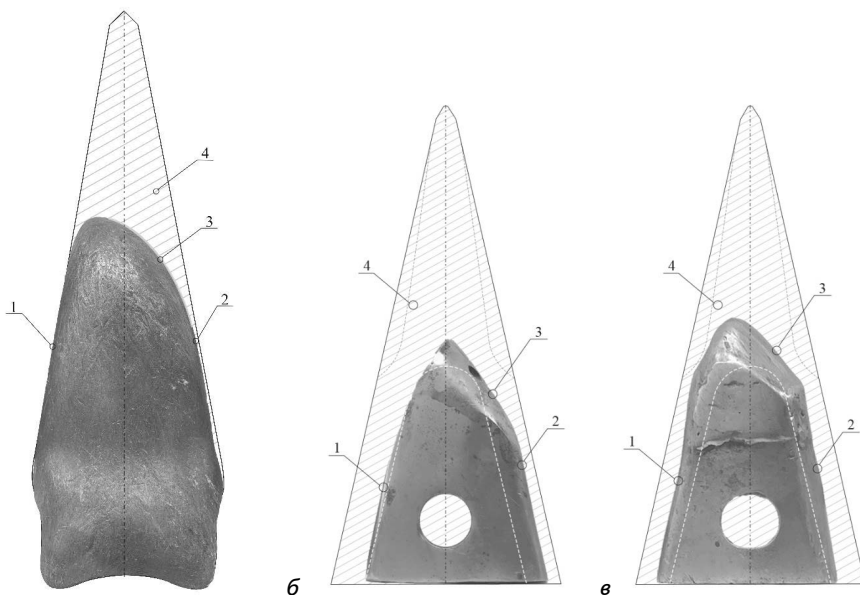


Рис. 1 — Вид бокового профиля коронок после работы по граниту (а) и песку (б), (в) в сопоставлении с их предполагаемым исходным профилем: 1 — верхняя поверхность, 2 — нижняя поверхность, 3 — площадка изнашивания на нижней поверхности, 4 — смоделированный исходный профиль коронки

Fig. 1 — View of the lateral profile of the crowns after working on granite (a) and sand (b), (c) in comparison with their supposed original profile: 1 — upper surface, 2 — lower surface, 3 — wear pad on the bottom surface, 4 — simulated original crown profile

и интервал их содержания в материале коронок, установленные по результатам трех измерений, в сопоставлении

с составом наиболее вероятной отечественной марки стали представлены в таблице.

Химический состав материала коронок и наиболее вероятной стали

The chemical composition of the material of the crowns and the most likely steel

Состав материала коронки Fe		Содержание элементов, % масс.			
		Cr	Mn	Другие элементы	
№ 1	По результатам анализа	95,47–95,51	1,86–1,95	0,98–1,09	C (1,0); Si (0,6); V (0,05)
	Исходя из состава стали ШХ15СГ	~ 95	1,3–1,65	0,9–1,2	C (0,95–1,05) Si (0,4–0,65) Mn (0,9–1,2)
№ 2	По результатам анализа	96,12–96,21	1,32–1,36	1,0	C (0,92–0,97); Si (0,6)
	Исходя из состава стали ХГС	~ 95	1,3–1,65	0,85–1,25	C (0,95–1,05) Si (0,4–0,7) Mn (0,85–1,25)

Состав материала коронки Fe		Содержание элементов, % масс.			
		Cr	Mn	Другие элементы	
№ 3	По результатам анализа	95,77–95,84	1,18–1,25	1,0	C (1,0); Si (0,6) Mo (0,205–0,208)
	Исходя из состава стали 18ХГТ	~96	1,0–1,3	0,8–1,1	C (0,17–0,23) Si (0,17–0,37) Mn (0,8–1,1)

Как следует из результатов анализа и его сравнения с табличными данными, наиболее вероятными материалами всех трех коронки являлись низколегированные хромомарганцевые высокоуглеродистые стали, зарубежные аналоги наших сталей ШХ15СГ, ХГС и 18ХГТ, например Cr9SiMn, 100CrMn6 и 20CrMnTi, упомянутые в каталоге производителей в качестве материалов, использующихся для изготовления коронки.

Результаты анализа коронки после работы по граниту

Согласно рис. 1, а, в результате работы коронки ее боковой профиль потерял симметричность со смещением вершины коронки к верхней поверхности. На окончании коронки, на нижней ее поверхности, появилась полусферическая площадка изнашивания без четкого очертания. Как показал осмотр площадки, она, как и вся нижняя поверхность коронки, равномерно покрыта мелкими царапинами (рис. 2, а), направление которых совпадает с направлением движения коронки в процессе работы ковша экскаватора. В средней части присутствуют относительно глубокие (до 0,7–0,8 мм) царапины небольшой длины (15–30 мм) (рис. 2, б), имеющие хаотичную направленность. На нижней поверхности коронки обнаруживаются следы

от точечных ударов в виде вмятин (рис. 2, в).

В отличие от нижней поверхности коронки, на верхней не обнаруживается совокупности мелких одинаково направленных царапин, вследствие чего эта поверхность гладкая и имеет более светлый цветовой оттенок (рис. 3, а). Имеющиеся здесь отдельные царапины имеют хаотичную направленность и в большинстве случаев различную глубину, которая изменяется от большего значения к меньшему по длине дефекта (рис. 3, б). Существенно выше здесь количество беспорядочно разбросанных вмятин (рис. 3, в). Короткие царапины постоянной и меняющейся глубины, а также вмятины обнаруживаются и на боковых сторонах коронки.

Рис. 4, выполненный в редакторе, позволяющем обеспечить возрастание интенсивности цвета с увеличением значения HRC, иллюстрирует распределение твердости по нижней и верхней поверхностям коронки. Согласно рисунку, верхняя поверхность характеризуется относительно равномерным распределением твердости при ее среднем значении ~ 61,6 HRC. В случае нижней — твердость площадки изнашивания (62,1–62,5 HRC) превосходит твердость остальных частей поверхности (54,5–56,1 HRC) при средней своей величине ~ 59,8 HRC. Значения твердости на боковых поверхностях



Рис. 2. Характерные виды дефектов на нижней поверхности коронки после работы по граниту

Fig. 2. Typical types of defects on the lower surface of the crown after working on granite

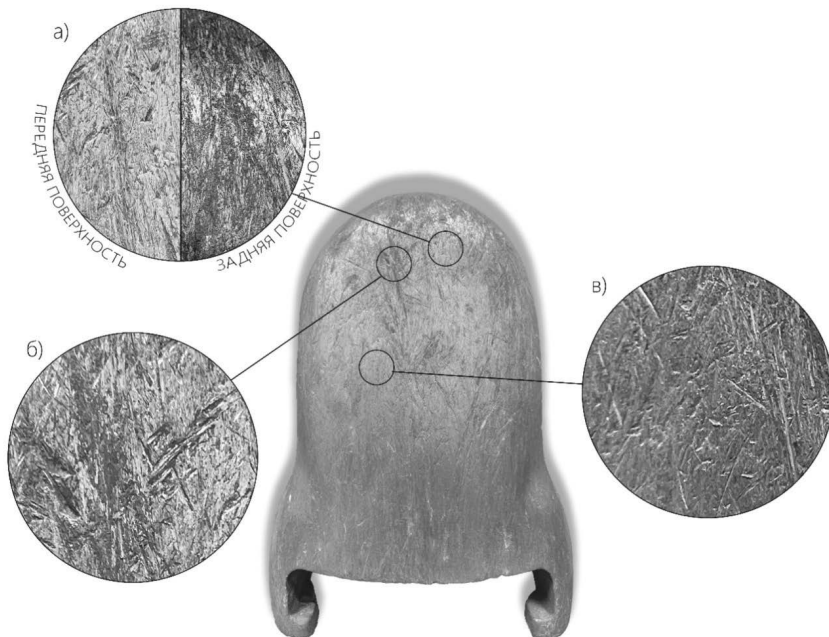


Рис. 3. Характерные виды дефектов на верхней поверхности коронки после работы по граниту

Fig. 3. Typical types of defects on the upper surface of the crown after working on granite

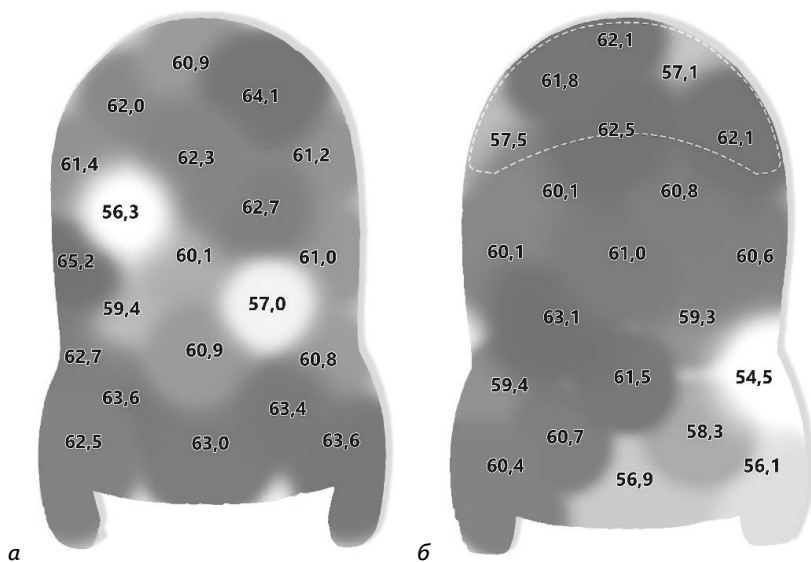


Рис. 4. Распределение твердости по верхней (а) и нижней (б) сторонам коронки после работы по граниту

Fig. 4. Distribution of hardness along the upper (a) and lower (b) sides of the crown after working on granite

коронки составили 60,3 и 60,4 единицы по шкале Роквелла. Как показывает сравнение полученных значений HRC с твердостью металла обратной, недеформируемой стороны коронки (~51 HRC), принимаемой за исходную, работа коронки по граниту привела к повышению твердости металла ее поверхности на 17–20%. При этом упрочнению подвергся металл всех поверхностей коронки.

Результаты анализа коронок после работы по песку

Коронка № 2 (см. рис. 1, б) отличается заостренным боковым профилем. Нижняя поверхность (рис. 5, а) гладкая, блестящая, без заметных царапин. В верхней части поверхности под углом ~ 25° к основной ее плоскости (рис. 1, б) располагается четко очерченная площадка изнашивания, аналогичная отмеченной в работе [2], занимающая ~ 1/3 от площади поверхности. Верхняя

поверхность этой же коронки (рис. 5, б) характеризуется наличием сквозного отверстия с толщиной стенки окружающего металла, не превышающей 2 мм.

Коронка № 3 (см. рис. 1, в) обладает менее заостренным профилем. Вид нижней и верхней поверхностей (рис. 6, а, б) практически идентичен рассмотренному на предыдущей коронке, за исключением того, что на нижней поверхности обнаруживаются заметные царапины, а по краям площадки присутствует слой наплавленного металла, толщиной 2–3 мм.

На всех рассмотренных поверхностях отсутствуют вмятины и глубокие порезы.

Оказалось, что твердость обеих коронок по всем наружным поверхностям распределена практически равномерно (рис. 7) при среднем своем значении для коронки № 2 59,5 HRC (твердость металла обратной, недеформируемой стороны коронки, принимаемой за исходную, ~44,9 HRC) и 52,7

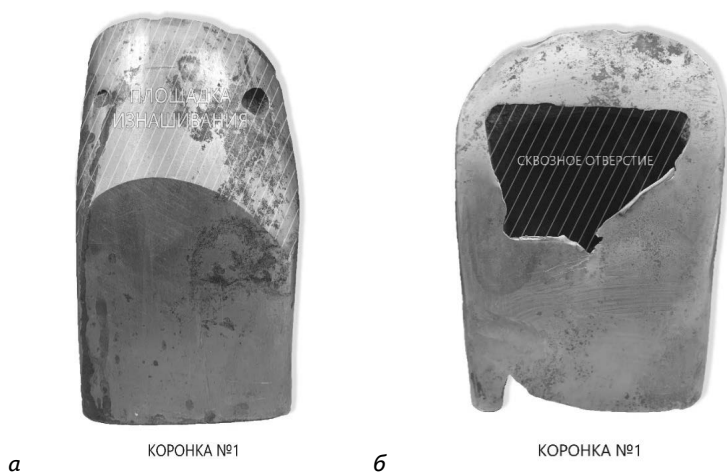


Рис. 5. Вид анфас коронки № 2: а — нижняя поверхность, б — верхняя поверхность
 Fig. 5. Full-face view of crown no. 2: a — on the lower surface, b — upper

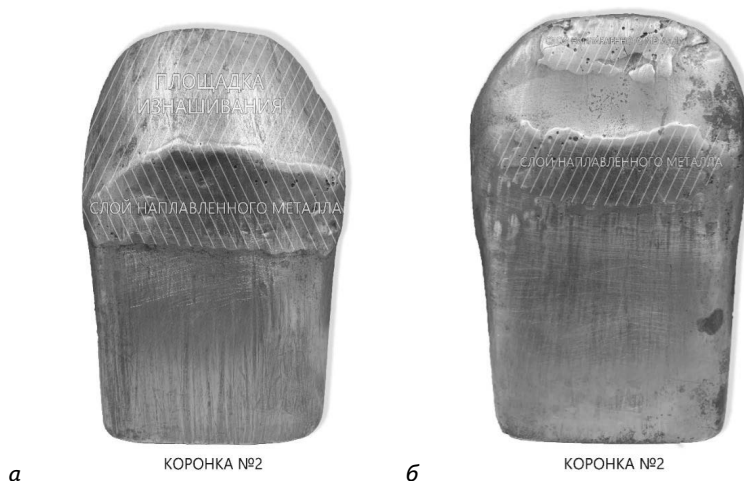


Рис. 6. Вид анфас коронки № 3: а — нижняя поверхность, б — верхняя поверхность
 Fig. 6. Full-face view of crown no. 3: a — on the lower surface, b — upper

HRC для коронки № 3 при исходном значении 41 HRC. Таким образом, твердость поверхности коронки № 2 возросла на 33%, коронки № 3 — на 28%. (Среднее значение твердости наплавки составило 70,3 HRC).

Обсуждение результатов

Равномерное покрытие параллельно расположенными царапинами одина-

ковой глубины большей части нижней поверхности коронки после работ по граниту позволяет заключить, что эта поверхность подвергается преимущественно абразивному виду изнашивания. В то же время, блестящий цвет и наличие беспорядочно разбросанных вмятин на верхней поверхности свидетельствует о том, что доминирующим видом изнашивания этой поверхности

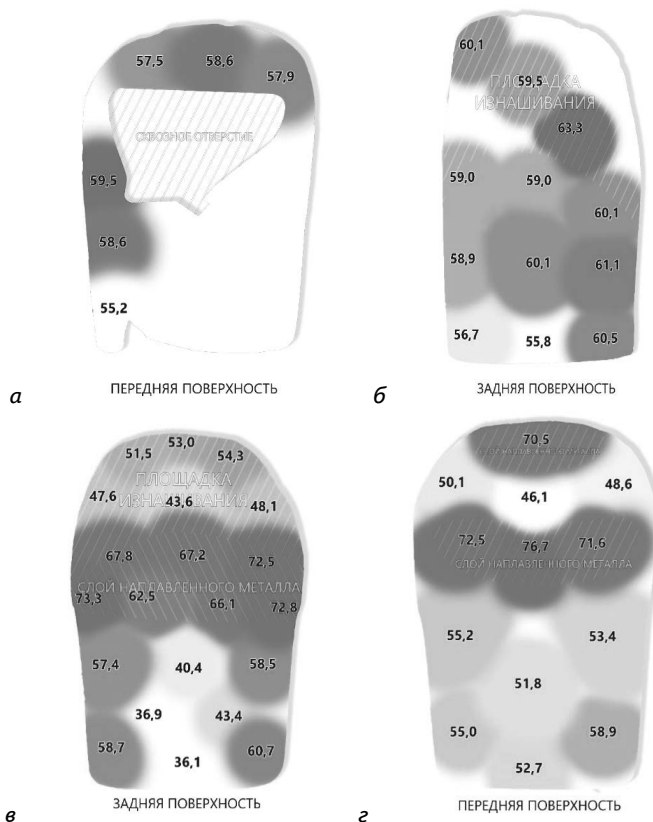


Рис. 7. Распределение твердости по нижней (а) и верхней (б) сторонам коронки № 2 и по нижней (в) и верхней (г) сторонам коронки № 3

Fig. 7. Distribution of hardness along the lower (a) and upper (b) sides of crown No. 2 and along the lower (c) and upper (d) sides of crown no. 3

является ударно-абразивный. Несмотря на различие в преобладающих видах изнашивания обе поверхности упрочнились до одинакового уровня твердости. В случае верхней поверхности причиной наклепа ее металла является ударное воздействие перекачивающихся кусков гранита, в случае нижней — царапание поверхности острыми гранями кусков при движении по ним коронки, с наклепыванием дна царапин до максимально достижимого для данного материала уровня твердости [28–29]. Поскольку наклеп замедляет интенсивность ударно-абразивного изнашивания металлов, не ока-

зывая какого-либо заметного влияния на скорость абразивного изнашивания [8, 30], верхняя поверхность изнашивается с существенно меньшей скоростью, чем нижняя, что приводит к нарушению симметрии зуба (см. рис. 1, а).

В случае песка коронка осуществляет контакт с массивом мелких абразивных частиц, неспособных нанести повреждения ударного характера, поэтому на обеих поверхностях преобладает только абразивный вид изнашивания, при котором наличие наклепа поверхности не приводит к снижению скорости процесса. В этих условиях обе стороны коронки изнашиваются с близ-

кой скоростью с сохранением симметричности формы коронки. Присутствие на задней поверхности коронки № 3 явных следов царапания находит объяснение в том, что эта коронка осуществляла контакт с более крупнозернистой фракцией песка.

Вывод

Результаты исследования позволяют сделать вывод, что вид изнашивания, преобладающий во время работы зубьев ковша экскаватора, в зависимости от разрабатываемой горной породы определяет наиболее изнашиваемую часть зуба: при работе по крупнокусковым скальным горным породам преобладающему изнашиванию подвергается нижняя часть зуба, а в случае мелкодисперсной породы — как нижняя, так и верхняя часть. Это обстоятельство играет важную роль в выборе технологического решения по повышению износостойкости зубьев [31 — 36].

Стоит отметить, что для более глубокого изучения особенностей изнашивания зубьев ковша экскаватора и математического моделирования процесса изнашивания требуется более детальное рассмотрение параметров движения ковша в процессе внедрения в массив горной породы. Это позволит создать «цифровой двойник» рассматриваемой трибологической системы, позволяющий производить предварительную

оценку разрабатываемых технологических решений, предшествующую лабораторным и полевым испытаниям.

Как пример одного из вариантов повышения износостойкости зубьев — обеспечение эффекта самозатачивания зуба во время работы [37], в результате которого осуществляется сохранение симметричности геометрического профиля коронки, необходимого для снижения нагрузки на инструмент и, как следствие, на рабочий привод экскаватора во время работы. В таком случае для обеспечения равномерного изнашивания коронок, работающих преимущественно по граниту, необходимо применять средства, повышающие износостойкость её нижней стороны, а работающих по мелкодисперсной породе — обеих сторон коронки.

Вклад авторов

Болобов В. И. — постановка цели и задач исследования, анализ результатов, написание текста статьи;

Ахмеров Э. В. — проведение исследовательской части работы, анализ результатов, подготовка и систематизация полученных данных, написание текста статьи;

Ракитин И. В. — получение данных для анализа, помощь в проведении исследовательской части работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зорин В. А., Бочаров В. С.* Надежность машин. — Орел: Изд-во «ОрелГТУ», 2003. — 548 с.
2. *Ветров Ю. А.* Резание грунтов землеройными машинами. — М.: «Машиностроение», 1971. — 357 с.
3. *Новокшионова Н. В., Вахрушев С. И.* Исследование износа сменных зубьев ковша одноковшового экскаватора и его влияния на сопротивление грунта резанию // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2019. — Т. 2. — С. 175–181.
4. *Лях Д. Д., Худякова И. Н., Иванов С. Л.* Обоснование параметров модуля формования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования

по добыче и переработке торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 93–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_93.

5. *Mikhailov A. V., Garmaev O. Z., Garifullin D. R., Kazakov Y. A.* A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 378, no. 1, pp. 86–90. DOI:10.1088/1755–1315/378/1/012086.

6. *Рузибаев А. Н., Жураев Д. Д., Хасанова Ш. И., Абдиев Б. К., Нажимов Ё. Э.* Исследование износа зубьев ковшей карьерных экскаваторов // Международный научный обзор проблем и перспектив современной науки и образования. LVI международная заочная научно-практическая конференция. Сб. науч. статей. Бостон, США. – 2019. – С. 13–16.

7. *Побегайло П. А., Крицкий Д. Ю., Гильманшина Т. Р.* Износ элементов карьерных экскаваторов: анализ современного состояния проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 64–74. DOI: 10.25018/0236-1493-20212-0-64-74.

8. *Колокольцев В. М., Вдовин К. Н., Чернов В. П., Феоктистов Н. А., Горленко Д. А., Дубровин В. К.* Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 54–62. DOI 10.18503/1995-2732-2017-15–2-54–62.

9. *Нефедьев С. П., Дёма Р. Р., Котенко Д. А.* Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твёрдых наплавленных покрытий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 103–106.

10. *Хромой М. Р., Свиначук В. П., Свиначук П. В.* Изнашивание вооружения ковша карьерного одноковшового экскаватора // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2010. – № 8. – С. 106–113.

11. *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.

12. *Иванов С. Л., Иванова П. В., Кувшинкин С. Ю.* Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228–233. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.

13. *Кузнецова В. Н., Авдеева Е. С.* Тенденции повышения износостойкости зубьев ковшей экскаваторов // Омский научный вестник. – 2010. – № 1 (87). – С. 99–101.

14. *Prokopenko S. A., Ludzish V. S., Kurzina I. A.* Improvement of cutting tools to increase the efficiency of destruction of rocks tunnel harvesters // Journal of Mining Science. 2016, vol. 52, no. 1, pp.153–159. DOI: 10.1134/S1062739116010248.

15. *Prokopenko S. A., Sushko A. V., Kurzina I. A.* New design of cutters for coal mining machines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015, vol. 91, no. 1, pp.1–8. DOI: 10.1088/1757–899X/91/1/012058.

16. *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: 10.25018/0236-14932021-2-0-75-86.

17. *Gogolinskiy K. V., Gromyka D. S., Kremcheev E. A.* A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket // International Review of Mechanical Engineering. 2021, vol. 15 (4), pp. 189–196. DOI: 10.15866/ireme.v15i4.20699.

18. *Suryo S. H., Fawwaz W. M., Wijaya Y. A., Saputro E. W., Harto.* Analysis and topology optimization structural design excavator bucket tooth using finite element method // AIP Conference Proceedings. 2020, vol. 2217, pp. 1–11. DOI: 10.1063/5.0000531.

19. Ren Z., Sun H., Liang Y., He Y., Feng M. Strength analysis of excavator bucket based on normal digging trajectory and limiting digging force // Journal of Vibroengineering. 2020, vol. 23, pp. 217–226. DOI: 10.21595/jve.2020.21596.

20. Suryo S. H., Bayuseno A. P., Jamari J., Wahyudi I. A. Analysis of rake angle effect to stress distribution on excavator bucket teeth using finite element method // Civil Engineering Journal. 2017, vol. 3, no. 12, pp. 1222–1234. DOI: 10.28991/cej-030952.

21. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 4. — С. 156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.

22. Безкорвайный П. Г., Шестаков В. С., Юсупов Т. И. Исследование нагружения рабочего оборудования гидравлического экскаватора при транспортировании ковша // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11–1. — С. 209–218. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_209.

23. Zlotnikov E. G., Khalimonenko A. D., Kazakov D. Yu. Modeling and calculation of load on cutting inserts of disk milling cutters in software environment of Autodesk Inventor // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, vol. 194, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755–1315/194/2/022048

24. Ismail R., Muhammad Z., Jamari J., Bayuseno A. P. Designing and wear testing of excavator bucket teeth for the need of indonesia mining // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 21–26.

25. Das B., Sawrav K., Singh S. B., Bandyopadhyay P. P. Tribological behaviour of the hardfacing alloys utilised to fabricate the wear parts of an excavator bucket // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2021, vol. 99, no. 3, pp. 153–161. DOI: 10.1080/00202967.2021.1861854.

26. Suryo S. H., Bayuseno A. P., Jamari J. Analysis of AISI material power of AISI 4140 bucket teeth excavator using influence of abrasive wear // AIP Conference Proceedings. 2018, vol. 1977, pp. 1–9. DOI: 10.1063/1.5042942.

27. Nasonov M. Y., Lykov Y. V. Effects of working conditions on excavator performance – longevity of metal structures // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 194, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755–1315/194/4/042017.

28. Болотов В. И., Бочков В. С. О влиянии упрочняющей обработки материала футеровки шаровых мельниц на его износостойкость // Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 57–60.

29. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Колокольников М. Г. Абразивное изнашивание — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.

30. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследования изнашивания металлов — М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. — 351 с.

31. Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В., Лотоус В. В., Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом // Metallургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 2. — С. 38–42.


32. Ефимов И. А., Юмаев Р. Г. Повышение срока службы зубьев ковша экскаваторов // Записки Горного института. — 1981. — Т. 87. — С. 69–72.

33. Талеров М. П. Зависимость износостойкости корпуса резцов горного инструмента от распределения твердости по длине резца // Записки Горного Института. — 2010. — Т. 186. — С. 140–142.

34. Насонов М. Ю., Лыков Ю. В., Чонг Д. Д. Исследование ресурса и долговечности металлических конструкций экскаваторов после истечения срока эксплуатации // Уголь. — 2020. — № 2 — С. 13–17. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-13-17.

35. Khoreshok A., Mametiev L., Tsekhin A., Borisov A. Relationship between the power of the two-bit cutting body rotation drive of the roadheader and hardness of broken rock // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 41, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103017.

36. Bogdanov S. P., Khristiuk N. A., Anisimov A. V., Sychov M. M. Increase of stainless steel wear resistance by diffusion chromium plating using iodine transport // *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1040, pp. 139–152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.139.

37. Дэлэг Д., Ванчинжав С., Пурэвдорж Н. Исследование самозатачивания зуба ковша экскаватора // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2008. — № 14 (1). — С. 402–416. 

REFERENCES

1. Zorin V. A., Bocharov V. S. Machine reliability, Orel, OrelGTU Publ, 2003, 548 p. [In Russ].

2. Vetrov Ju. A. Soil cutting with earthmoving machines, Moscow, Mashinostroenie, 1971, 357 p. [In Russ].

3. Novokshonova N. V., Vahrushev S. I. Research on deterioration of excavator replaceable bucket teeth and its influence on soil cutting resistance. *Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teorija i praktika*. 2019, vol. 2, pp. 175–181. [In Russ].

4. Lyakh D. D., Khudyakova I. N., Ivanov S. L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 93–108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_93.

5. Mikhailov A. V., Garmaev O. Z., Garifullin D. R., Kazakov Y. A. A potential application of in-pit crushing-conveying and dewatering system in peat mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 378, no. 1, pp. 86–90. DOI:10.1088/1755-1315/378/1/012086.

6. Ruzibaev A. N., Zhuraev D. D., Hasanova Sh. I., Abdiev B. K., Nazhimov Jo. Je. Study of the wear of the teeth of bucket for mining excavators. *International scientific review of problems and prospects of modern science and education. Collection of scientific articles. LVI international correspondence scientific and practical conference*. Boston, USA. 2019, pp. 13–16. [In Russ].

7. Pobegailo P. A., Kritskiy D. Yu., Gilmanshina T. R. Wear of mining shovel components: Current situation and analysis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, vol. 2, pp. 64–74. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-64-74.

8. Kolokol'cev V. M., Vdovin K. N., Chernov V. P., Feoktistov N. A., Gorlenko D. A., Dubrovin V. K. Study of abrasive and impact and abrasive wear mechanisms of high manganese steel. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 54–62. [In Russ]. DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-2-54-62.

9. Nefed'ev S. P., Djoma R. R., Kotenko D. A. Abrasive and impact-abrasive wear resistance of solid weld deposits, *Bulletin of the South Ural State University. Series «Metallurgy»*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 103–106. [In Russ].

10. Hromoj M. R., Svinarchuk V. P., Svinarchuk P. V. Deterioration dulling shovel grouser of bucket. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*. 2010, no. 8, pp.106–113. [In Russ].

11. 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.

12. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 228–233. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.

13. Kuznecova V. N., Avdeeva E. S. Trends in Increasing the Wear Resistance of Excavator Bucket Teeth. *Omsk Scientific Bulletin*. 2010, no.1 (87), pp. 99–101. [In Russ].

14. Prokopenko S. A., Ludzish V. S., Kurzina I. A. Improvement of cutting tools to increase the efficiency of destruction of rocks tunnel harvesters. *Journal of Mining Science*. 2016, vol. 52, no. 1, pp.153–159. DOI: 10.1134/S1062739116010248.

15. Prokopenko S. A., Sushko A. V., Kurzina I. A. New design of cutters for coal mining machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 91, pp.1–8. DOI:10.1088/1757–899X/91/1/012058.
16. 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, no. 2, pp. 75–86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236–1493–2021–2–0–75–86.
17. Gogolinskiy K. V., Gromyka D. S., Kremcheev E. A. A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket. *International Review of Mechanical Engineering*. 2021, vol. 15 (4), pp.189–196. DOI: 10.15866/ireme.v15i4.20699.
18. Suryo S. H., Fawwaz W. M., Wijaya Y. A., Saputro E. W., Harto. Analysis and topology optimization structural design excavator bucket tooth using finite element method. *AIP Conference Proceedings*. 2020, vol. 2217, pp. 1–11. DOI: 10.1063/5.0000531.
19. Ren Z., Sun H., Liang Y., He Y., Feng M. Strength analysis of excavator bucket based on normal digging trajectory and limiting digging force. *Journal of Vibroengineering*. 2020, vol. 23, pp. 217–226. DOI: 10.21595/jve.2020.21596.
20. Suryo S. H., Bayuseno A. P., Jamari J., Wahyudi I. A. Analysis of rake angle effect to stress distribution on excavator bucket teeth using finite element method. *Civil Engineering Journal*. 2017, vol. 3, no. 12, pp. 1222–1234. DOI: 10.28991/cej-030952.
21. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. Sh., Khoroshavin S. A. Digital model of shovel work process. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 156–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_156.
22. Bezkorovayny P. G., Shestakov V. S., Yusupov T. I. Loading of hydraulic excavator implement in bucket movement. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11–1, pp. 209–218. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_209.
23. Zlotnikov E. G., Khalimonenko A. D., Kazakov D. Yu. Modeling and calculation of load on cutting inserts of disk milling cutters in software environment of Autodesk Inventor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 194, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755–1315/194/2/022048.
24. Ismail R., Muhammad Z., Jamari J., Bayuseno A. P. Designing and wear testing of excavator bucket teeth for the need of Indonesian mining. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 21–26.
25. Das B., Sawrav K., Singh S. B., Bandyopadhyay P. P. Tribological behaviour of the hardfacing alloys utilised to fabricate the wear parts of an excavator bucket. *Transactions of the IMF*. 2021, vol. 99, no. 3, pp. 153–161. DOI: 10.1080/00202967.2021.1861854.
26. Suryo S. H., Bayuseno A. P., Jamari J., Ramadhan M. A. R. Analysis of AISI material power of AISI 4140 bucket teeth excavator using influence of abrasive wear. *AIP Conference Proceedings*. 2018, vol. 1977, pp. 1–9. DOI: 10.1063/1.5042942.
27. Nasonov M. Y., Lykov Y. V. Effects of working conditions on excavator performance – longevity of metal structures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, vol. 194, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755–1315/194/4/042017.
28. Bolobov V. I., Bochkov V. S. On the influence of hardening treatment of the lining material of ball mills on its wear resistance. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 1, pp. 57–60. [In Russ].
29. Vinogradov V. N., Sorokin G. M., Kolokol'nikov M. G. Abrasive wear, Moscow, Mashinostroenie, 1990, 224 p. [In Russ].
30. Khrushchov M. M., Babichev M. A Metal wear studies, Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1960, 351 p. [In Russ].
31. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Mos'pan D. V., Lotous V. V., Strengthening of excavator bucket teeth using plastic deformation by explosion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, no. 2, pp. 38–42. [In Russ].
32. Efimov I. A., Yumaev R. G. Extending excavator bucket teeth life. *Journal of Mining Institute*. 1981, vol. 87, pp. 69–72. [In Russ].

33. Talerov M. P. The dependence of the wear resistance of the body of the cutters of mining tools on the distribution of hardness along the length of the cutter. *Journal of Mining Institute*. 2010, vol. 186, pp. 140–142. [In Russ].

34. Nasonov M. Yu., Lykov Yu. V., Trong D. D. Study of the resource and durability of metal structures of excavators after the expiration of the service life. *Ugol*. 2020, no. 2, pp. 13–17. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-13–17.

35. Khoreshok A., Mametiev L., Tsekhin A., Borisov A. Relationship between the power of the two-bit cutting body rotation drive of the roadheader and hardness of broken rock. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 41, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20184103017.

36. Bogdanov S. P., Khristiuk N. A., Anisimov A. V., Sychov M. M. Increase of stainless steel wear resistance by diffusion chromium plating using iodine transport. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1040, pp. 139–152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.139.

37. Deleg D., Vanchinzhav S., Purevdorzh N. Study of self-sharpening of an excavator bucket tooth. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2008, vol. 14 (1), pp. 402–416. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Болобов Виктор Иванович*¹ — доктор технических наук, профессор,
ORCID ID: 0000-0002-0810-0132,
email: boloboff@mail.ru;

*Ахмеров Эрик Викторович*¹ — аспирант,
ORCID ID: 0000-0003-1692-4745,
email: s195040@stud.spmi.ru;

*Ракитин Илья Витальевич*¹ — студент,
ORCID ID: 0000-0002-7874-1859,
email: ilja.rakitin@mail.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, Россия.

Для контактов: *Ахмеров Эрик Викторович*, email: s195040@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Bolobov V. I.*¹, Dr. Sci. (Eng.), professor,
ORCID ID: 0000-0002-0810-0132,
email: boloboff@mail.ru;

*Akhmerov E. V.*¹, graduate student,
ORCID ID: 0000-0003-1692-4745,
email: s195040@stud.spmi.ru;

*Rakitin I. V.*¹, student,
ORCID ID: 0000-0002-7874-1859,
email: ilja.rakitin@mail.ru;

¹ Saint-Petersburg Mining University, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia.

For contacts: *Akhmerov Erik Viktorovich*, email: s195040@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 04.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 04.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

