

КЛАССИФИКАЦИЯ ФУТЕРОВОК ШАРОВЫХ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Н.А. Алтынников¹, В.А. Плащинский¹, С.Л. Иванов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: plaschinskiy_va@pers.spmi.ru

Аннотация: На основе проведенного патентного поиска и обзора применяемых на производстве технических решений футеровок барабанных мельниц собрана база данных решений. Классификационными признаками выбраны: назначение, структура футеровки, структура элемента, материал, вид профиля, тип крепления, способ укладки в барабан. Каждому классификационному признаку соответствуют от 3 до 5 категорий, расширяющих и конкретизирующих соответствующие технические решения. Помимо собственно классификации предусмотрен принцип цифрового поиска по базе необходимого технического решения. Для этого каждому из технических решений присваивается цифровой код, говорящий о классификационном признаке и соответствующей ему категории. Представлены сведения об основных направлениях исследований по разработке футеровок мельниц, выполнен сравнительный анализ известных технических решений в соответствии с наименованием их при помощи предложенной классификации. В итоге проведенного авторами исследования сделан вывод, что для многих современных технических решений футеровок характерны такие недостатки, как сложность конструкции и монтажа, увеличение затрат на их эксплуатацию и ремонт, а также негативное влияние на параметры рабочего процесса мельницы. В этой связи представляется перспективным разработка футеровок, реализующих принцип самофутерования, обеспечивающий защиту барабана мельницы от изнашивания.

Ключевые слова: измельчение в барабанной мельнице, виды футеровок, классификация футеровок барабанных мельниц, материал футеровки, износостойкость, самофутерование, профиль футеровки, крепление футеровки, цифровизация.

Для цитирования: Алтынников Н. А., Плащинский В. А., Иванов С. Л. Классификация футеровок шаровых барабанных мельниц // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_5.

Classification of ball drum mill lining

N.A. Altynnikov¹, V.A. Plashchinsky¹, S.L. Ivanov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Plaschinskiy_VA@pers.spmi.ru

Abstract: Based on a patent search and a review of the technical solutions used in the manufacture of drum mill linings, a database of solutions has been compiled. The classification criteria are: purpose, lining structure, element structure, material, profile type, mounting type, and packing into the drum. Each classification feature corresponds to 3 to 5 categories that expand and specify the relevant technical solutions. In addition to the classification itself, the principle

of digital search based on the necessary technical solution is provided. To do this, each of the technical solutions is assigned a digital code indicating the classification feature and the corresponding category. Information is provided on the main research directions for the development of mill linings, and a comparative analysis of known technical solutions is performed in accordance with their names using the proposed classification. As a result of the research conducted by the authors, it was concluded that many modern technical solutions for linings are characterized by such disadvantages as the complexity of the design and installation, increased costs for their operation and repair, as well as a negative impact on the parameters of the mill's workflow. In this regard, it seems promising to develop linings that implement the principle of self-milling, which protects the mill drum from wear.

Key words: drum mill grinding, types of linings, classification of drum mill linings, lining material, wear resistance, self-lining, lining profile, liner fastening, digitalisation

For citation: Altyunnikov N. A., Plashchinsky V. A., Ivanov S. L. Classification of ball drum mill lining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(5):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_5.

Введение

Процесс измельчения минерального сырья в барабанных мельницах сопровождается значительными энергоматериальными затратами на измельчение материала [1–3]. Так, например, расходы только на обслуживание и ремонт футеровки и мелющих тел барабанных мельниц могут превышать 40% эксплуатационных затрат на содержание мельницы [2].

В особо тяжелых условиях находятся футеровочные плиты, предназначенные для обеспечения заданного режима движения мелющих тел и измельчаемой ими породы, защиты корпуса барабана мельницы от абразивного воздействия продуктов измельчения [4–6]. При проектировании футеровок учитывают такие факторы, как параметры рабочего режима мельницы [6–8], свойства измельчаемой среды, от которых зависят конструктивные параметры футеровок, выбор материала для их изготовления, размещение вдоль барабана мельницы и т.д. [5–7]. Кроме того, шаровые мельницы, как и большинство горных машин, работают в тяжелых условиях эксплуатации, в связи с этим учитываются

повышенные требования к их рабочим элементам по ударной и абразивной стойкости [9–11], технологичности конструкции, унификации типоразмеров и элементов крепежа [12–14], а также минимальной трудоемкости выполнения монтажных и ремонтных работ [15–17].

Известно большое количество исследований, направленных на установление влияния конструктивных параметров футеровки на режим движения материала и эффективность измельчения материала [18–20]. В других работах анализируют влияние рабочих нагрузок на показатели надежности и долговечности рабочих элементов горного оборудования, в соответствии с которыми возможно оптимизировать мероприятия по ремонту и замене футеровок в мельнице [21–23]. Работы некоторых исследователей направлены на установление рациональных параметров рабочих элементов оборудования в зависимости от конкретных производственных условий [24–26]. В настоящее время большое распространение получили методы компьютерного моделирования, при помощи которых исследуют влияние различных факторов на процесс измельчения

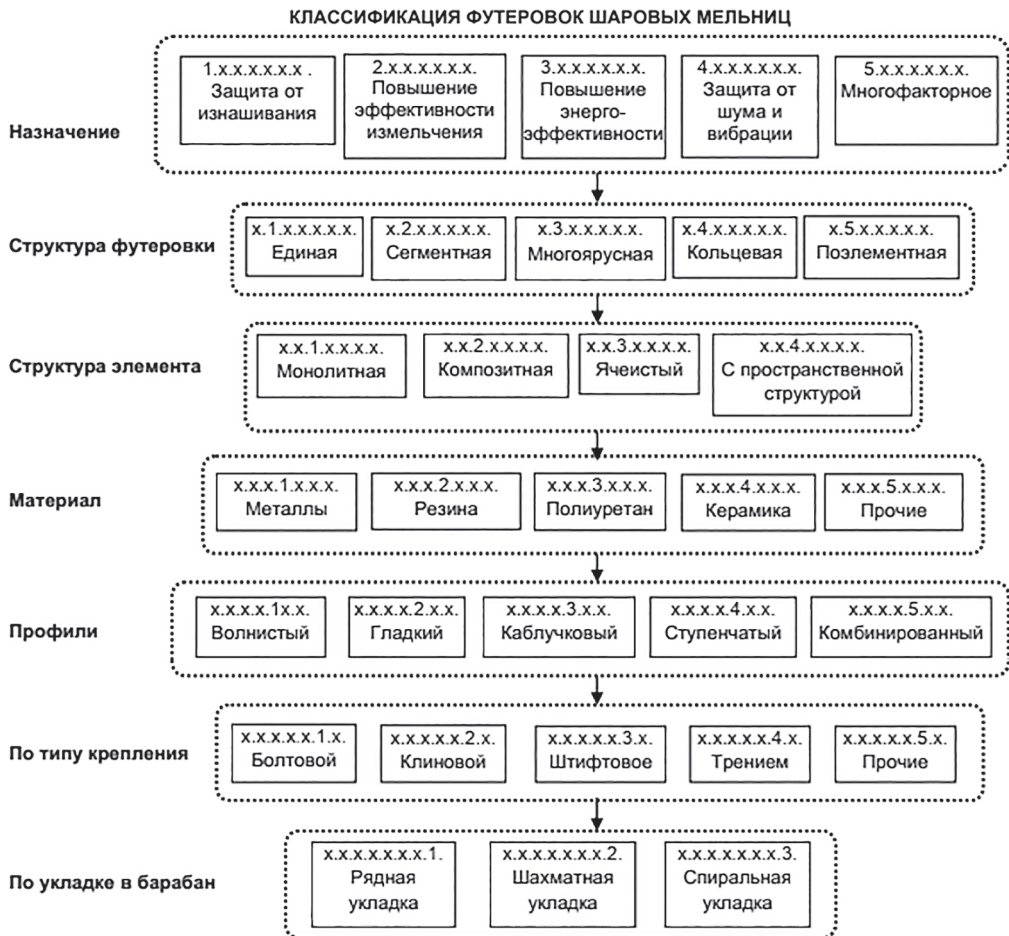
в барабанной мельнице [27 – 29]. При помощи инструментов численного моделирования исследуют влияние таких рабочих параметров, как скорость вращения барабана, степени загрузки измельчаемой среды в мельнице, на процесс измельчения [30 – 32], применяют их и для оценки эффективности использования различных футеровок в тех или иных рабочих условиях [33 – 35].

Условия работы футеровочных элементов барабанных мельниц отличаются большим разнообразием, что обуславливает и большую номенклатуру их наименований [36, 37]. Однако, несмотря на

большое разнообразие видов футеровок барабанных мельниц, в литературных данных обнаружено мало работ, посвященных разработке классификации существующих решений в зависимости от влияющих на процесс факторов и условий. Данная работа посвящена разработке цифровой классификации, руководствуясь которой, можно обоснованно выбрать ту или иную футеровку по интересующим критериям.

Методология

На основе проведенного патентного поиска и анализа применяемых в про-



Классификация футеровочных решений (составлено авторами)

Classification of lining solutions (compiled by the authors)

мышленности футеровок барабанных мельниц была собрана база технических решений из 308 объектов, анализ которых позволил классифицировать их конструкции. В качестве классификационных признаков выбраны назначение, структура футеровки, структура элемента, материал футеровки, ее профиль, тип крепления, способ укладки в барабан.

Разработанная классификация представлена на рисунке.

Каждому классификационному признаку присвоен разряд, соответствующий порядковому номеру цифры в семизначном цифровом коде, присвоенному каждому техническому решению футеровки, созданной на базе этих объектов. В рамках каждого классификационного признака представлены от трех до пяти категорий, уточняющих соответствующий признак, номер категории устанавливается на позиции соответствующего разряда в цифровом коде соответствующего технического решения футеровки из базы объектов.

Результаты

Основным по приоритетности выбран классификационный признак назначение, в соответствии с которым известные футеровки можно разделить по тому, какого технического эффекта пытались достичь при их разработке.

В частности, под категорией «защита от изнашивания» понимается футеровка, выполненная из износостойкого материала или имеющая конструктивные или иные особенности, которые позволяют снизить интенсивность ее изнашивания, таким же образом к категории «защита от шума и вибрации» следует отнести футеровки с высокими шумо- и виброзащитными свойствами. Подобный подход принят и к категории «повышение интенсивности измельчения», под которой понимается комплексный

показатель, учитывающий размерные фракции и производительность процесса. Категория «для снижения энергозатрат на осуществление процесса» характеризует энергоемкость измельчения при применении той или иной футеровки. Под категорией «многофакторное» понимается сочетание ранее перечисленных признаков при достижении комплексного эффекта от них. Так, футеровка из износостойкого чугуна (RU 7347 U1), главным назначением которой является защита от изнашивания, будет соответствовать категории под номером 1 и располагаться на месте первого разряда в цифровом коде этого технического решения: 1.х.х.х.х.х.х. Назначением другого известного технического решения «футеровка барабанной мельницы» (RU 120375) является повышение энергоэффективности измельчения, в данном случае первая цифра на месте первого разряда в семизначном цифровом коде будет 3х.х.х.х.х.х.х., ступенчатая же футеровка (RU 179532) будет иметь обозначение 2.х.х.х.х.х.х.х.

Вторым классификационным признаком является структура футеровки, в нем выделено пять категорий. Категория «единая» имеет цифру 1 на месте второго разряда, примером данной категории могут являться футеровки для небольших лабораторных мельниц, перерабатывающих мягкие материалы, а также для мельниц, использующихся в пищевой промышленности, в которых весь корпус футерован едиными футеровочными вставками, либо вообще без использования футеровочных плит.

Под категорией сегментная подразумевается футеровка, которая состоит из нескольких отдельных сегментов, соединенных в конструкцию. В качестве примеров можно привести техническое решение «футеровочная плита с магнитными элементами» (SU 631203), а также футеровку внутренней рабочей по-

верхности барабанов, выполненной из набора замкнутых колец, где наружный диаметр колец несколько меньше внутреннего диаметра барабана, а боковые, обращенные к крышкам, поверхности колец снабжены выступами и впадинами по всему периметру, что позволяет подвижно стыковать смежные футеровки между собой и уплотнять их зазоры (АС SU 292706). В соответствии с классификацией их цифровой код будет иметь вид х.2.х.х.х.х.х.х.

Многоярусная футеровка структурно представляет собой конструкцию, в которой составляющие ее элементы образуют несколько уровней или ярусов. Так, например, в техническом решении RU2535396C1 разработана футеровка, в которой рабочие элементы выполнены в виде многогранных призм, высота которых изменяется вдоль барабана мельницы, что позволяет добиться одновременного повышения износостойкости и увеличения ресурса футеровки. Менее распространенным типом является кольцевая, которая представляет собой набор кольцевых элементов, уложенных в барабан. Так, например, в известном техническом решении (RU2712898C1) составляющие монолитные эластомерные кольцевые элементы уложены в барабан со смещением друг относительно друга на определенный угол по окружности, при этом ребра колец образуют в соединении друг с другом многозаходную винтовую поверхность. Такая конструкция позволяет обеспечить герметичность соединений футеровок за счет их плотного сжатия друг с другом и заполнения зазоров и неровностей между ними, а также создать переменный режим движения материала в поперечном и продольном направлении, что повышает эффективность измельчения.

Также примерами могут служить технические решения (АС SU 706114, АС SU 292706), где предлагается исполь-

зовать набор однотипных резиновых камер, которые заполняются жидкостью или воздухом, обеспечивая плотное прилегание футеровок.

Другая категория — поэлементная — характеризует футеровку, в которой конструкция представляет собой набор соединенных между собой однотипных элементов, что соответствует большинству применяемых на производстве футеровок.

Основные направления развития футеровок с позиций структуры футеровки — создание составных футеровок с дополнительными конструктивными элементами и устройствами для защиты основного рабочего слоя плит от ударного и истирающего воздействия измельчаемой среды. Однако среди общих недостатков таких технических решений стоит выделить невысокую надежность мест соединений составляющих элементов, сложность монтажа и ремонта.

Следующим классификационным признаком является структура элемента, согласно которой она разделяется на три категории — монолитная (х.х.1.х.х.), композитная (х.х.2.х.х.), ячеистая (х.х.3.х.х.) и с пространственной структурой (х.х.4.х.х.). Признак определяет то, каким образом выполнен единичный футеровочный элемент — единым однородным твердым телом из одного материала, либо композитным в виде набора слоев из нескольких материалов, в виде ячеистой структуры, либо как сложный с пространственной структурой с составляющими дополнительными вставками.

В качестве примеров композитной структуры можно привести технические решения (патент SU 1636048, патент RU 62343), в которых футеровочные элементы шаровых мельниц выполнены в виде биметаллических плит, состоящих из пластичной металлической основы и твердого износостойкого рабочего слоя.

Применение такого сочетания материалов позволяет достигать высокой износостойкости футеровки, увеличивать срок ее службы, однако недостатком данного типа футеровок является низкая надежность соединения металлической основы с рабочим слоем, обусловленная возможным расслоением в местах их сплавления, что вызывается накоплением трещин вследствие ударов породы по поверхности рабочего слоя. Другим техническим решением является гибкая противоизносная футеровка (патент RU 2206401), представляющая собой двухслойную плиту, в которой слой, прикрепляемый непосредственно к барабану мельницы, выполняется из магнитотвердой резины, с керамическими магнитами. Образованное на поверхности верхнего слоя плиты магнитное поле притягивает ферромагнитные частицы перерабатываемой руды, создавая защитный слой и снижая интенсивность изнашивания футеровки.

К категории ячеистая можно отнести футеровки, структура которых представлена в виде набора ячеек. Примером может служить решение, когда изготавливаемая футеровочная плита состоит из двух слоев: собственно плиты и подкладки (патент RU 2105610). Плита выполнена с отверстиями в виде трапеции в поперечном сечении плиты, распределенными по ее рабочей поверхности и перекрытыми подкладкой. Куски породы, удерживаясь в отверстиях, самофутеруют плиту, уменьшая интенсивность изнашивания футеровки. Обозначение футеровок в данной категории будет иметь вид х.х.3.х.х.х.х.

Примером футеровки с пространственной структурой может служить техническое решение (RU2197326C2) в которой футеровка представляет собой пластичную основу в виде продольных ребер, содержащих вставки с фигурной рабочей поверхностью, которые выпол-

нены из твердых материалов, при этом отдельные элементы вставок могут быть выполнены блоками из нескольких элементов и размещены на разных уровнях. Также к данной категории можно отнести футеровки, реализующие принцип самофутерования, в котором измельчаемый материал заполняет предусмотренные конструкцией полости, тем самым изолируя основной слой барабана от взаимодействия с измельчаемой средой. Так, например, в техническом решении (RU 2837963C1) разработана футеровка мельницы самоизмельчения, в которой обечайка барабана мельницы укрывается специальной ячеистой конструкцией — металлическими матами, в процессе измельчения среды заполняющимися продуктами ее разрушения, что изолирует основной слой барабана мельницы от изнашивания. Цифровой код такого решения будет х.х.4.х.х.х.х.

Следующим классификационным признаком является материал футеровочной плиты. К материалам для изготовления футеровок предъявляются высокие требования в части их механических свойств, в том числе стойкости к абразивному и ударному изнашиванию; как правило, металлы и сплавы являются наиболее распространенным материалом для изготовления футеровочных плит. Так, одним из перспективных материалов для производства футеровок является высокохромистый белый чугун, а также сплав чугуна с никелем и хромом «Нихард», имеющие высокие износостойкие и ударопрочные свойства. Кроме того, распространены футеровки из хромистого чугуна (ЧХ16, ЧХ 22, ИЧХ 300). Среди групп сталей для изготовления футеровок наиболее распространены хромомолибденовая мартенситная сталь, хромомолибденовая перлитная сталь, а также зарубежные износостойкие стали типа Hardox, однако они значительно дороже отече-

ственных аналогов. Ограниченное применение находят твердые сплавы, такие как релиты и стеллиты, представляющие собой сплавы на основе вольфрама, кобальта и хрома. Отдельно стоит отметить получившие большое распространение марганцовистые стали (09Г2С, 110Г13Л и др.), которые обладают способностью к самоупрочнению в процессе эксплуатации, в результате которого значительно повышается твердость поверхностного слоя плит, что приводит к увеличению износостойкости. Для данных технических решений на месте четвертого разряда в цифровом коде будет стоять цифра 1 (х.х.х.1.х.х.х.).

Наравне с металлическими большое распространение получили футеровки, выполненные из эластомерных материалов, главным образом из резины или полиуретана. Футеровки из резины, по сравнению с металлическими, имеют более высокие упругие свойства и меньший вес (до 7 раз), что приводит к снижению нагрузок на привод и к снижению момента трения и потерь энергии на трение в целом. Кроме того, меньший вес футеровки в сравнении со стальными аналогами способствует облегчению условий пуска: снижение момента трения позволяет увеличить момент двигателя более чем на 20% и сократить время пуска до 50%. Резина обладает высокими демпфирующими свойствами, хорошо поглощает вибрацию и шум, имеет стойкость к ударным нагрузкам от измельчаемой породы. Согласно данным [15], применение резиновых футеровок позволяет добиться увеличения межремонтного периода до 2,5 раз. Однако резиновая футеровка имеет также и ряд ограничений для возможности применения таких футеровок, в частности: ограничения по температурному режиму (не более 80 °С) и кислотности среды (не должна превышать 10 единиц), кроме того, по крупности измель-

чаемых шаров и загружаемого материала. В качестве примера такой футеровки можно привести резиновую гибкую футеровку (RU 2206401).

Похожими свойства имеют футеровки из полиуретана, который обладает разнообразием физико-механических свойств в зависимости от своего состава. В целом полиуретан, также как и резиновые футеровки, имеет улучшенные амортизационные качества по сравнению со сталью, повышенное сопротивление ударным нагрузкам. В сравнении же с резиновыми футеровочными плитами полиуретановые отличаются более высокой прочностью и износостойкостью [16], кроме того, они обладают более низким коэффициентом сцепления с поверхностью, что, с одной стороны, предотвращает налипание материала, а с другой — ограничивает их применение, так как увеличивает потребный момент трения для подъема измельчаемого материала на заданную высоту, что в свою очередь увеличивает энергозатраты на измельчение. Полиуретановые футеровочные плиты обладают повышенной устойчивостью к коррозии, сопротивлению ударному и абразивному изнашиванию, а также эффективно смягчают удары, что делает их надежным решением для эксплуатации в сложных условиях. Полиуретановые футеровки применяют для сверхтонкого помола высокоабразивных материалов, примером такой футеровки является техническое решение (RU 2546883С1, RU 2038149С1), с цифровой записью категории х.х.х.3.х.х.х.

Применение керамических материалов при изготовлении футеровок позволяет придавать им такие свойства, как огнеупорность, высокая износостойкость, стойкость к коррозии, к высоким температурам и агрессивным средам, однако недостатками их являются низкая ударостойкость, сложность монтажа и

ремонта. В последнее время широко рекомендованным типом футеровок является резино-керамическая футеровка, которая состоит из резиновой основы с твердыми минералокерамическими вставками. Данный тип футеровок демонстрирует исключительно высокую износостойкость при условии отсутствия значительных ударных нагрузок, приводящих к раскрошиванию керамических вставок, примером могут служить технические решения (RU 2798973C1, RU 2650308C1), обозначение будет иметь вид х.х.х.4.х.х.х.

Ограниченное применение находят прочие материалы, в том числе состоящие из эпоксидных и полиэфирных смол, армирующих волокон, в структуру дополнительно включают наполнители для улучшения износостойкости, стойкости к высоким температурам, агрессивным средам, а также эластичные материалы для лучшего ударо- и вибропоглощения.

Классификация по следующему признаку разделяет футеровки по виду профиля их рабочей поверхности. На рисунке представлены наиболее распространенные виды профилей, выбор которых зависит от таких факторов, как крупность измельчаемого материала, размер мелющих тел, рабочие параметры процесса измельчения и т.д.

Категория гладкие относится к футеровкам, представляющим собой геометрический профиль в виде плоской ровной поверхности, они применяются там, где нужно создать оптимальный режим движения среды в барабане. Такие футеровки снижают скольжение мелющих тел по поверхности футеровки, а благодаря гладкому профилю футеровка не меняет характер своего влияния на среду в процессе работы, что обеспечивает стабильность режима.

Волнистая футеровка имеет волнообразные выступы различного радиуса

кривизны, за счет чего обеспечивается лучшее сцепление между материалом и плитами, уменьшается проскальзывание материала и мелющих тел, что способствует большему поднятию материала вместе с корпусом барабана. Волнистые футеровки применяют с целью обеспечения водопадного режима работы мелющих тел. Примером футеровки с данным профилем может служить техническое решение (SU 1011256A1) с цифровым кодом х.х.х.х.1.х.х.

Футеровки со ступенчатым и каблучковым профилем применяются для повышения эффективности измельчения, в основном для крупного измельчения. В данных видах футеровок увеличение сцепления и уменьшение скольжения между материалом и плитами достигается за счет выступающих частей, которыми захватывается мелющая среда и поднимается на большую высоту по сравнению с другими футеровками, что приводит к накоплению большей потенциальной энергии падения частиц, кроме того, более рационально распределяются мелющие тела по сечению барабана, снижается зона малоподвижного ядра.

Так, известны технические решения (патент RU 2486959, патент RU 2546881), направленные на увеличение сцепления материала с поверхностью футеровки за счет установки стержневых лифтеров, пространство между которыми в процессе работы мельницы заполняется измельчаемым материалом, обеспечивая самофутеровку плит.

Каблучковая футеровка также способствует более эффективному измельчению за счет дополнительного разрыхления и разделения по крупности увлекаемого материала каблучками разной высоты, пример — каблучковая футеровка с перспективным профилем типа «Норильск-3», цифровой код футеровки будет иметь вид х.х.х.х.4.х.х.

Основным направлением исследования является поиск оптимальной формы и конструктивных параметров, позволяющих увеличить эффективность измельчения, продлить срок службы футеровочной плиты.

Классификационный признак по типу крепления разделяет футеровки согласно способу их закрепления с обечайкой барабана и друг с другом. Под категории в этом признаке выделены болтовой, клиновой, штифтовой способ, а также крепление при помощи трения и прочие. Наиболее распространенный вариант — крепление футеровочной плиты к корпусу барабана при помощи болтового соединения. Примером этого может являться техническое решение RU 2837963, в котором футеровка закрепляется с обечайкой барабана при помощи стержня, нижний конец которой фиксирует ее с барабаном при помощи гайки, а верхний — при помощи оголовка, который также выполняет функции подъемного элемента.

Клиновое соединение предполагает фиксацию футеровок при помощи стыковки отдельных плит друг с другом их выступающими под определенным углом краями. Такой способ крепления позволяет упростить изготовление барабана, а также снизить эксплуатационные затраты. Так, например, известна конструкция футеровки, предлагаемая в изобретении (АС SU 391855), в котором предлагается монтировать футеровочные элементы между Г-образными выступами, дополнительная фиксация осуществляется за счет пазов на футеровочных элементах.

Примером технического решения, в котором реализован штифтовой принцип крепления, может служить футеровка (RU 104093U1), где составляющие конструкцию цилиндрические секции износостойкого элемента фиксируются при помощи штифтов друг с другом, а с по-

мощью зацепов — с рабочей поверхностью футеровки. Штифты в данном случае выполняют роль фиксаторов, обеспечивая жесткое соединение секций, зацеп выполнен в виде скобы из стали. Соответственно, цифровой код такого решения будет иметь вид х.х.х.х.3.х.

Тип крепления трением реализован в техническом решении (АС SU 139918), в котором фиксация волнистых футеровочных плит достигается за счет значительных сил трения, возникающих при установке их в распор к внутренней поверхности барабана. В другом изобретении (АС SU 292706) крепление реализуется за счет монтажа внутрь барабана футеровочного элемента в виде кольца, внутри которого имеются каналы, в которые подается рабочая среда, устанавливающая кольцо в распор.

К категории прочие виды крепления можно отнести изобретение (патент RU 114622U1), где предлагается использовать резиновую футеровочную плиту, в которой во внутренний слой, прилегающий к защищаемой поверхности барабана, внедрены постоянные магниты, которые и обеспечивают надежную фиксацию плиты к барабану.

Большинство разработок с позиций данного признака посвящено повышению надежности крепления футеровки к барабану

Классификационный признак по виду укладки в барабан предполагает разделение существующих футеровок по способу расстановки плит по внутренней поверхности обечайки барабана.

Наиболее распространенным на производстве является рядная укладка футеровки, в которой футеровки размещены вдоль и поперек корпуса мельницы прямыми рядами, однако такой вариант укладки приводит к забиванию материалом образующихся зазоров между футеровками и изнашиванию корпуса мельницы (SU 1470333, RU 2153936C2).

Поэтому такая укладка допустима только для измельчения неабразивных материалов, например угля. В случае абразивных материалов поперечные ряды укладывают в зигзагообразную линию, таким образом достигается исключение возможности перекатывания измельчаемого материала вдоль поверхности поперечных зазоров и истирания им корпуса мельницы.

Категория укладки шахматная менее распространена в производстве, характеризуется тем, что футеровочные плиты уложены на внутренней поверхности барабана мельницы в шахматном порядке, что также позволяет снизить вышеупомянутый эффект от перекатывания материала вдоль зазоров.

Примером спиральной укладки может служить решение SU795561A1, в котором футеровка выполнена в виде рядов колец с выступами и впадинами, которые образуют непрерывные спирали, такая укладка способствует более равномерному продвижению материала вдоль барабана. В соответствии с классификацией цифровой код такого решения будет х.х.х.х.х.х.3.

Выводы

Большинство из рассмотренных направлений разработок технических решений футеровок в основном посвящены защите барабана мельницы от изнашивания и повышению эффективности измельчения. Для этих целей ведут исследования для определения оптимальных конструктивных параметров футеровки в зависимости от свойств измельчаемой среды и условий производства, а также для выбора материала для ее изготовления и т.д. Однако общими недостатками рассмотренных известных решений являются увеличение технологических и эксплуатационных затрат, как, например, в случае применения новых конструкционных материалов; зна-

чительное усложнение монтажа при применении сложных составных конструкций (дополнительные камеры и магниты), а также эксплуатации и ремонта (укладка и крепление к барабану) негативно влияют на параметры процесса (применение плит сложной конструкции и профиля формы).

В этой связи для цели обеспечения износостойкости футеровки представляется перспективной разработка футеровок, реализующих принцип самофутерования барабана мельницы продуктами измельчения, которые предохраняют основной слой барабана от воздействия среды.

Разработана классификация футеровок барабанных мельниц по 7 признакам, каждый из которых разделен на 3–5 категорий. В соответствии с предложенной классификацией любая футеровка может быть представлена в виде 7-значного цифрового кода, в котором цифры определяют футеровку по признаку, а порядковый номер в коде будет соответствовать признаку классификации, при этом сама цифра обозначает категорию.

На основе разработанной классификации футеровок барабанных мельниц можно производить обоснованный выбор требуемой футеровки из базы технических решений, задавшись теми или иными интересующими признаками и категориями. В соответствии с этим в качестве примера приведен код технического решения «ступенчатая футеровка мельницы» (RU 179532 U1) — 2.1.1.1.4.1.1. Расшифровка кода такова: 2 — назначение футеровки — для повышения эффективности измельчения; 1 — структура футеровки: единая, 1 — структура элемента: монолитная, 1 — материал: металлическая, 4 — вид профиля: ступенчатая, 1 — тип закрепления: болтовой, 1 — вид укладки: рядная укладка.

В качестве другого примера рассмотрим техническое решение с цифровым кодом 1.2.4.1.5.1.3.

Расшифровка кода: 1 — назначение футеровки: для защиты от изнашивания; 2 — структура футеровки: сегментная, 4 — структура элемента: с пространственной структурой, 1 — материал:

металлическая, 5 — вид профиля: комбинированный, 1 — тип закрепления: болтовой, 3 — вид укладки: спиральная укладка. Такому цифровому коду будет соответствовать, например, футеровка из базы технических решений «футеровка мельницы самоизмельчения» (RU 2837963C1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maregedze L., Chiteka K., Masike R., Kanyowa T.* Ball mill energy efficiency optimization: A lifter face angle optimization approach // *Journal of Applied Research and Technology*. 2024, vol. 22, pp. 798 – 805. DOI: 10.22201/jcat.24486736e.2024.22.6.2624.

2. *Матвеев А. И., Лебедев И. Ф., Винокуров В. Р., Львов Е. С.* Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 256. — С. 613 – 622. DOI: 10.31897/PMI.2022.90.

3. *Vasilyeva N., Fedorova E., Kolesnikov A.* Big data as a tool for building a predictive model of mill roll wear // *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 5. DOI: 10.3390/sym13050859.

4. *Vasilev B. U., Malkova Y. M., Mardashov D. V.* Control system of a complete electric drive of a mill for grinding gold-containing ores / 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 936 – 941. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039468.

5. *Ануфриев А. С., Лебедик Е. А., Смирнов А. А.* Автоматизированная система управления шаровым заполнением мелющих агрегатов // *Обогащение руд*. — 2024. — № 1. — С. 3 – 9. DOI: 10.17580/or.2024.01.01.

6. *Tano K. T., Pålsson B. I.* Assessment of mill lifter bar deflection measurements using wavelets and discrete element methods // *Granular Matter*. 2008, vol. 10, pp. 279 – 283. DOI: 10.1007/s10035-008-0087-1.

7. *De Camargo I. L., Lovo J. F. P., Erbereli R., Fortulan C. A.* Influence of media geometry on wet grinding of a planetary ball mill // *Materials Research*. 2019, vol. 22, no. 6, article e20190432. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0432.

8. *Chehrehghani S., Gharehgheshlagh H. H., Haghikia S.* Power consumption management and simulation of optimized operational conditions of ball mills using the Morrell Power model: a case study // *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, vol. 37, no. 2, pp. 123 – 135. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.11.

9. *Жуковский Ю. Л., Королев Н. А., Малькова Я. М.* Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // *Записки Горного института*. — 2022. — Т. 256. — С. 686 – 700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

10. *Usman H., Taylor P., Spiller E.* The effects of lifter configurations and mill speeds on the mill power draw and performance // *AIP Conference Proceedings*. 2017, vol. 1805, article 050001. DOI: 10.1063/1.4974432.

11. *Safa A., Aissat S.* Analyzing the influence of lifter design and ball mill speed on grinding performance, particle behavior and contact forces // *Mechanics and Industry*. 2023, vol. 24, article 37. DOI: 10.1051/меса/2023035.

12. *Закамалдин А. А., Перевошиков Ф. В., Шилин А. А.* Эффективное использование электроэнергии при эксплуатации шаровой мельницы с постоянной скоростью вращения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2023. — Т. 334. — № 9. — С. 115 – 127. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4258.

13. *Корогодин А. С., Иванов С. Л.* Оценка технического состояния опорных подшипников скольжения барабанной мельницы при эксплуатации в составе арктического комплекса горного оборудования // *Горная промышленность*. — 2024. — № 6. — С. 144 – 151. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

14. Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics-an overview // *Energies*. 2020, vol. 13, no. 24. DOI: 10.3390/en13246735.

15. Стихин А. Ю., Ялухин В. А. Резиновая футеровка — современный материал для защиты сырьевых мельниц от износа // *Цемент и его применение*. — 2013. — № 4. — С. 85 — 86.

16. Порсев М. А. Модернизация конструкции бронифутеровочных плит в шаровых мельницах // *Цемент и его применение*. — 2013. — № 5. — С. 44 — 47.

17. Bortnowski P., Gładysiewicz L., Król R., Ozdoba M. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems // *Energies*. 2021, vol. 14, no. 6. DOI: 10.3390/en14061786.

18. Xu Y., Zhang B., Feng G. Research on efficiency optimal torque distribution of stator module combined permanent magnet synchronous machine // *IET Electric Power Applications*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 236 — 247. DOI: 10.1049/elp2.12149.

19. Muratov Kh., Ishnazarov O., Isakov A., Nuritov I. Assessment of effect of lining material on energy efficiency of starting up ball mills // *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 365, article 04005. DOI: 10.1051/e3sconf/202336504005.

20. Nkomo F., Mulenga F. K. Assessing the effects of material properties on load behavior in dry ball mills using DEM // *International Conference on Multidisciplinary Research*. 2022, vol. 2022, pp. 253 — 264. DOI: 10.26803/myres.2022.21.

21. Minin I., Savov S., Dedyalkov P. Research of the charge load influence over the tumbling mill characteristics through general utility function // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2021, vol. 56, pp. 819 — 826.

22. Amannejad M., Barani K. Effects of ball size distribution and mill speed and their interactions on ball milling using DEM // *Mineral Processing and ExtrActive Metallurgy Review*. 2021, vol. 42, no. 6, pp. 374 — 379. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781630.

23. Казаринов Л. С., Хасанов Д. Р. Оптимизации степени загрузки мельницы при производстве цемента // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. — 2019. — № 30. — С. 196 — 210.

24. Kuvshinkin S., Ivanova P. Impact analysis of bucket capacity and boom length of mining excavators on hoisting mechanism life // *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 326, article 00032. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600032.

25. Botyan E. Y., Lavrenko S. A., Pushkarev A. E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems // *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2268 — 2275. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

26. Gromyka D. S., Gogolinskiy K. V. Method of state and residual resource assessment of excavator bucket tooth caps // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022, vol. 58, no. 5, pp. 381 — 390. DOI: 10.1134/s1061830922050035.

27. Шешукова Е. И., Шибанов Д. А., Иванов С. Л., Шишкин П. В. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 2) // *Горная промышленность*. — 2024. — № 4. — С. 108 — 114. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-108-114.

28. Ермаков Б. С., Вологжанина С. А., Ермаков С. Б., Швецов О. В. Причины ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов при эксплуатации в условиях Арктических регионов // *Черные металлы*. — 2024. — № 9. — С. 37 — 43. DOI: 10.17580/chm.2024.09.06.

29. Алиева Л., Жуков И. А. Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2024. — Т. 16. — № 4(62). — С. 1681 — 1694. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694.

30. Beloglazov I. Review of advanced digital technologies, modeling and control applied in various processes // *Symmetry*. 2024, vol. 16, no. 5, article 536. DOI: 10.3390/sym16050536.

31. Ignatiev S. A., Kononov P. V., Levashov D. S., Muratbakeev E. K., Glazunov K. O. Computer simulation of deformation and fracture conditions during the detail rolling with a flange with inclined rolls // *Engineering Review*. 2020, vol. 41, no. 2, article e263458. DOI: 10.30765/er.1483.

32. Zvonarev I. E., Folomkin A. I., Muratbakeev E. H. Computer simulation of machining // *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 743, pp. 248 — 251. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.248.

33. Ханин С. И., Ханзаров А. С. Анализ математических моделей процесса измельчения материала в шаровых барабанных мельницах / Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. Выпуск посвящен 50-летию кафедры механического оборудования. Выпуск XIX. — Белгород, 2020. — С. 306—311.
34. Иванов С. Л., Корогодин А. С. Техническое обслуживание и ремонт цапф барабанной мельницы плавучего комплекса горного оборудования // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 3(57). — С. 760—770. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-760-770.
35. Soares A., Almeida J. Multi-compartment rod/ball mill evaluation on bauxite operation // *Procemin geomet.* 2019, pp. 1—8.
36. García G. G., Coello-Velázquez A. L., Pérez B. F., Menéndez-Aguado J. M. Variability of the ball mill bond's standard test in a ta ore due to the lack of standardization // *Metals.* 2021, vol. 11, no. 10, article 1606.
37. Golpayegani M. H., Rezai B. Modelling the power draw of tumbling mills: A comprehensive review // *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 2022. DOI: 10.37190/ppmp/151600. **PLAB**

REFERENCES

- Maregedze L., Chiteka K., Masike R., Kanyowa T. Ball mill energy efficiency optimization: A lifter face angle optimization approach. *Journal of Applied Research and Technology.* 2024, vol. 22, pp. 798—805. DOI: 10.22201/jcat.24486736e.2024.22.6.2624.
- Matveev A. I., Lebedev I. F., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Scientific experimental bases for dry beneficiation of mineral ores. *Journal of Mining Institute.* 2022, vol. 256, pp. 613—622. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.90.
- Vasilyeva N., Fedorova E., Kolesnikov A. Big data as a tool for building a predictive model of mill roll wear. *Symmetry.* 2021, vol. 13, no. 5. DOI: 10.3390/sym13050859.
- Vasilev B. U., Malkova Y. M., Mardashov D. V. Control system of a complete electric drive of a mill for grinding gold-containing ores. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 936—941. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039468.
- Anufriev A. S., Lebedev E. A., Smirnov A. A. Automated ball charge control system for grinding units. *Obogashchenie Rud.* 2024, no. 1, pp. 3—9. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2024.01.01.
- Tano K. T., Pålsson B. I. Assessment of mill lifter bar deflection measurements using wavelets and discrete element methods. *Granular Matter.* 2008, vol. 10, pp. 279—283. DOI: 10.1007/s10035-008-0087-1.
- De Camargo I. L., Lovo J. F. P., Erbereli R., Fortulan C. A. Influence of media geometry on wet grinding of a planetary ball mill. *Materials Research.* 2019, vol. 22, no. 6, article e20190432. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0432.
- Chehrehghani S., Gharehgheshlagh H. H., Haghikia S. Power consumption management and simulation of optimized operational conditions of ball mills using the Morrell Power model: a case study. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik.* 2022, vol. 37, no. 2, pp. 123—135. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.11.
- Zhukovskiy Y. L., Korolev N. A., Malkova Y. M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *Journal of Mining Institute.* 2022, vol. 256, pp. 686—700. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.
- Usman H., Taylor P., Spiller E. The effects of lifter configurations and mill speeds on the mill power draw and performance. *AIP Conference Proceedings.* 2017, vol. 1805, article 050001. DOI: 10.1063/1.4974432.
- Safa A., Aissat S. Analyzing the influence of lifter design and ball mill speed on grinding performance, particle behavior and contact forces. *Mechanics and Industry.* 2023, vol. 24, article 37. DOI: 10.1051/meca/2023035.
- Zakamaldin A., Perevoshchikov F., Shilin A. Efficient use of electric energy when operating a ball mill with a constant rotation speed. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2023, vol. 334, no. 9, pp. 115—127. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2023/9/4258.
- Korogodin A. S., Ivanov S. L. Assessment of the journal bearing health status in a drum mill used as a part of arctic complex mining equipment. *Russian Mining Industry Journal.* 2024, no. 6, pp. 144—151. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

14. Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics an overview. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 24. DOI: 10.3390/en13246735.

15. Stikhin A. Yu., Yalukhin V. A. Rubber lining is a modern material for protecting raw material mills from wear. *Cement and its Application*. 2013, no. 4, pp. 85–86. [In Russ].

16. Porsev M. A. Modernization of the design of armored lining plates in ball mills. *Cement and its Application*. 2013, no. 5, pp. 44–47. [In Russ].

17. Bortnowski P., Gładysiewicz L., Król R., Ozdoba M. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 6. DOI: 10.3390/en14061786.

18. Xu Y., Zhang B., Feng G. Research on efficiency optimal torque distribution of stator module combined permanent magnet synchronous machine. *IET Electric Power Applications*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 236–247. DOI: 10.1049/elp2.12149.

19. Muratov Kh., Ishnazarov O., Isakov A., Nuritov I. Assessment of effect of lining material on energy efficiency of starting up ball mills. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 365, article 04005. DOI: 10.1051/e3sconf/202336504005.

20. Nkomo F., Mulenga F. K. Assessing the effects of material properties on load behavior in dry ball mills using DEM. *International Conference on Multidisciplinary Research*. 2022, vol. 2022, pp. 253–264. DOI: 10.26803/myres.2022.21.

21. Minin I., Savov S., Dedyalkov P. Research of the charge load influence over the tumbling mill characteristics through general utility function. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2021, vol. 56, pp. 819–826.

22. Amannejad M., Barani K. Effects of ball size distribution and mill speed and their interactions on ball milling using DEM. *Mineral Processing and ExtrActive Metallurgy Review*. 2021, vol. 42, no. 6, pp. 374–379. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781630.

23. Kazarinov L. S., Khasanov D. R. Optimization of the mill loading degree in cement production. bulletin of the perm national research polytechnic university. *Electrical Engineering, Information Technologies, and Control Systems*. 2019, no. 30, pp. 196–210. [In Russ].

24. Kuvshinkin S., Ivanova P. Impact analysis of bucket capacity and boom length of mining excavators on hoisting mechanism life. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 326, article 00032. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600032.

25. Botyan E. Y., Lavrenko S. A., Pushkarev A. E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2268–2275. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

26. Gromyka D. S., Gogolinskiy K. V. Method of state and residual resource assessment of excavator bucket tooth caps. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2022, vol. 58, no. 5, pp. 381–390. DOI: 10.1134/s1061830922050035.

27. Sheshukova E. I., Shibanov D. A., Ivanov S. L., Shishkin P. V. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (Part 2). *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 4, pp. 108–114. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-108-114.

28. Ermakov B. S., Vologzhanina S. A., Ermakov S. B., Shvetsov O. V. Causes of accelerated failure of excavator bucket teeth crowns when operating in Arctic regions. *Chernye Metally*. 2024, no. 9, pp. 37–43. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2024.09.06.

29. Alieva L., Zhukov I. A. Upgrading rotary-percussion drilling of high-strength rocks by improving the structure of a rock-crushing blade-free tool. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4(62), pp. 1681–1694. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694.

30. Beloglazov I. Review of advanced digital technologies, modeling and control applied in various processes. *Symmetry*. 2024, vol. 16, no. 5, article 536. DOI: 10.3390/sym16050536.

31. Ignatiev S. A., Kononov P. V., Levashov D. S., Muratbakeev E. K., Glazunov K. O. Computer simulation of deformation and fracture conditions during the detail rolling with a flange with inclined rolls. *Engineering Review*. 2020, vol. 41, no. 2, article e263458. DOI: 10.30765/er.1483.

32. Zvonarev I. E., Folomkin A. I., Muratbakeev E. H. Computer simulation of machining. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 743, pp. 248–251. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.248.

33. Khanin S. I., Khazarov A. S. Analysis of mathematical models of material grinding process in ball drum mills. *Energosberegayushchie tekhnologicheskie komplekсы i oborudovanie dlya proizvod-*

stva stroitel'nykh materialov: Mezhvuzovskiy sbornik statey. Vypusk posvyashchen 50-letiyu kafedry mekhanicheskogo oborudovaniya. Vypusk XIX [Energy-Saving Technological Complexes and Equipment for the Production of Building Materials: Interuniversity Collection of Articles. Issue dedicated to the 50th Anniversary of the Department of Mechanical Equipment, Belgorod, 2020. Issue XIX], Belgorod, 2020, pp. 306–311. [In Russ].

34. Korogodin A. S., Ivanov S. L. Maintenance and repair of drum mill trunnions of a floating mining equipment complex. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3(57), pp. 760–770. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-760-770.

35. Soares A., Almeida J. *Multi-compartment rod/ball mill evaluation on bauxite operation*. *Procedia*. 2019, pp. 1–8.

36. García G. G., Coello-Velázquez A. L., Pérez B. F., Menéndez-Aguado J. M. Variability of the ball mill bond's standard test in a ta ore due to the lack of standardization. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 10, article 1606.

37. Golpayegani M. H., Rezai B. Modelling the power draw of tumbling mills: A comprehensive review. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2022. DOI: 10.37190/ppmp/151600.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алтынников Николай Алексеевич¹ – студент,
e-mail: altynnikov.n@mail.ru,

Плащинский Вячеслав Алексеевич¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: plaschinskiy_va@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0326-4514,

Иванов Сергей Леонидович¹ – д-р техн. наук,
профессор, e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Плащинский В.А., e-mail: plaschinskiy_va@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Altynnikov¹, Student,

e-mail: altynnikov.n@mail.ru,

V.A. Plashchinsky¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: plaschinskiy_va@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0326-4514,

S.L. Ivanov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: Ivanov_SL@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-7014-2464,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: V.A. Plashchinsky, e-mail: plaschinskiy_va@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 09.12.2025; получена после рецензии 09.02.2026; принята к печати 10.04.2026.

Received by the editors 09.12.2025; received after the review 09.02.2026; accepted for printing 10.04.2026.

