

## **К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА РУДОПОДГОТОВКИ**

*Господариков А.П., Ефимов Д.А.*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** рудоподготовка, минеральное сырье, валковая дробилка, футеровочные бандажы, износ.

**Аннотация.** Валковые дробилки широко используются в различных отраслях горной промышленности для дробления рудных материалов. Одним из ключевых элементов таких дробилок являются цилиндрические футеровочные бандажы, подвергающиеся интенсивной эксплуатации и абразивному износу, негативно влияющие на ее технико-технологические показатели. Абразивный износ является результатом трения и столкновений материалов, происходящие при дроблении, что приводит к потере геометрической точности и повышению зазора между валками. Установление причин абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей является важным шагом для разработки эффективных способов решения проблемы повышения эффективности процесса рудоподготовки. В статье рассмотрены основные причины абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей и влияние последнего на технологические показатели рудоподготовки, что отрицательно сказывается на эффективности работы оборудования в целом.

## **ABOUT SOME APPROACH TO NUMERICAL CALCULATION OF CYLINDRICAL LINING BANDS OF ROLLER CRUSHERS**

*Gospodarikov A.P., Efimov D.A.*

*Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg*

**Keywords:** ore preparation, mineral raw material, roller crusher, lining bandages, wear.

**Abstract.** Roll crushers are widely used in various branches of the mining industry for crushing ore materials. One of the key elements of such crushers are cylindrical liner bands, which are subjected to intensive operation and abrasive wear, negatively affecting its technical and technological performance. Abrasive wear is the result of friction and collisions of materials occurring during crushing, which leads to the loss of geometric accuracy and increased gap between the rolls. Establishing the causes of abrasive wear of cylindrical liner gangs is an important step in developing effective ways to address the problem of improving the efficiency of the ore preparation process. The article considers the main causes of abrasive wear of cylindrical liners and the impact of the latter on the technological performance of ore preparation, which adversely affects the efficiency of the equipment as a whole.

### **Введение**

Валковые дробилки широко используются в геотехнологии и других отраслях промышленности для дробления мягких, влажных, глинистых руд и руд средней твердости. Они представляют собой два параллельных вала, оборудованных концентрическими футеровочными бандажами, которые служат рабочей поверхностью.

Принцип работы валковых дробилок основан на сжатии и последующем дроблении материала между вращающимися валами (рис. 1). Футеровочные бандажы играют ключевую роль в этом процессе, поскольку именно они контактируют с дробимым материалом. Зачастую при интенсивной эксплуатации эти бандажы подвергаются значительным нагрузкам, что вызывает потребность в их своевременном ремонте или замене. Поэтому расчет цилиндрических футеровочных бандажей является критическим этапом при проектировании и эксплуатации этих устройств [1, 2].

Целью данной статьи является исследование абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок.

Абразивный износ цилиндрических футеровочных бандажей имеет большую актуальность для промышленности. Повышение эффективности работы валковых дробилок

является важной задачей для горных предприятий, так как это позволяет увеличить производительность и снизить затраты на обслуживание и ремонт оборудования.

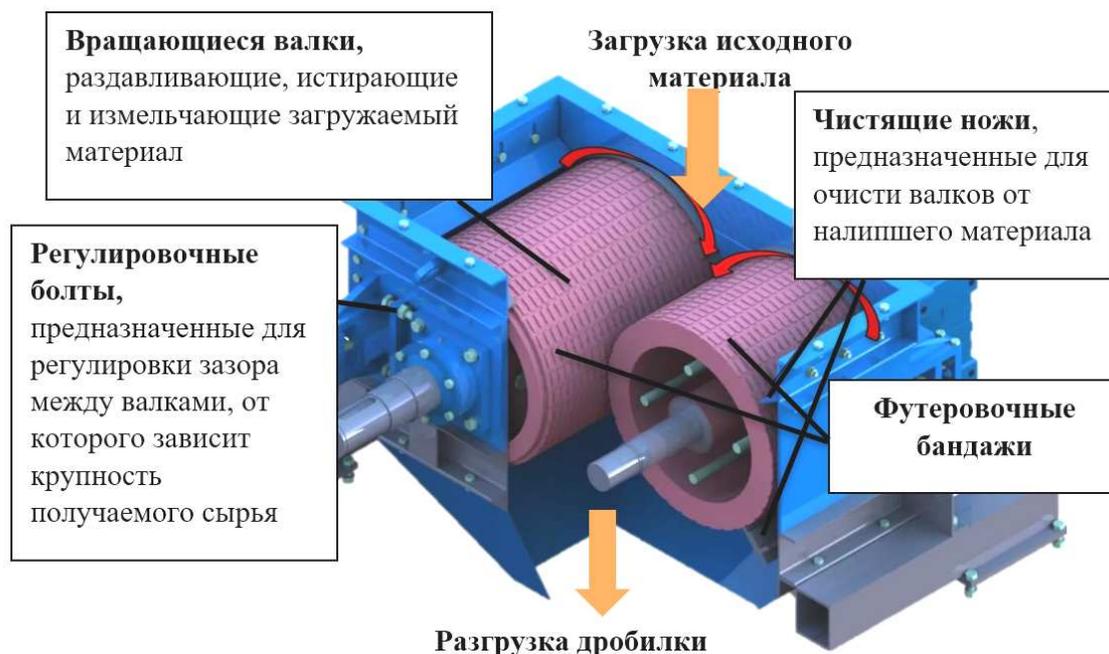


Рис. 1. Принцип работы и устройство валковой дробилки (составлено авторами)

### Формулировка научной проблемы

Научная проблема состоит в определении основных факторов, влияющих на абразивный износ цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок, и разработке способов его снижения. Для решения этой задачи необходимо провести комплексное исследование, включающее как анализ проблемы износа футеровок, так и методы его предотвращения и рекомендации для повышения стойкости бандажей к абразивному износу.

*Введение в проблему абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок*

Валковые дробилки широко используются в различных отраслях промышленности для измельчения и обработки материалов. Однако, при эксплуатации этих устройств возникает проблема абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей – важной составляющей конструкции дробилки [3, 4].

Абразивный износ – это процесс постепенного удаления материала с поверхности твердого тела под воздействием абразивных частиц. В случае цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок, это означает, что со временем бандажи теряют свою первоначальную форму и размеры, что негативно сказывается на работе всего устройства.

Причинами абразивного износа могут быть различные факторы. Прежде всего, это качество материала, из которого изготовлены бандажи. Если материал бандажа обладает достаточной стойкостью к абразивным частицам или имеет низкую плотность, то он быстрее будет разрушаться. Кроме того, весомую роль играет и сам процесс измельчения материалов в дробилке. При работе устройства с высокой интенсивностью при дроблении абразивных материалов происходит интенсивный износ бандажей. Однако, отметим, что на абразивный износ может влиять и физико-химические свойства сырьевых материалов. Некоторые из них содержат вредные примеси, ускоряющие процесс разрушения бандажей [5, 6].

Установление причин абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей является важным шагом для разработки эффективных способов решения данной проблемы. Поэтому, в первую очередь, необходимо провести комплекс исследований свойств материалов, использованных при производстве бандажей, а также определить условия эксплуатации дробилки, способствующие возникновению износа [7].

### *Основные факторы, влияющие на абразивный износ бандажей валковых дробилок*

Цилиндрические футеровочные бандажи являются одними из основных деталей валковых дробилок, предназначенных для измельчения различных материалов. Они подвержены абразивному износу, который может быть вызван рядом факторов, например, самый значимый фактор, влияющий на абразивный износ бандажей, - это природа материала, который подвергается дроблению. Традиционно износостойкость футеровочных бандажей тем выше, чем выше их твердость. Абразивный износ футеровок с интегрированными штифтами из карбида вольфрама может быть до 30 раз менее интенсивным, чем у гладких бандажей из стального литья. Образование самофутерующего слоя материала на рабочей поверхности валков также существенно снижает их абразивный износ.

Для достоверного прогнозирования интенсивности абразивного износа валков на стадии технологических исследований руды необходимо определить:

- абразивность (по результатам тестирования на лабораторной дробилке);
- вещественный состав и крупность минеральных зерен;
- прочностные свойства материала.

Более твердые материалы обычно более абразивны, но при наличии в мягкой руде существенного количества силикатов и слюд необходимо рассматривать как возможные исключения из этого правила. Вещественный состав в совокупности с крупностью минеральных зерен оказывает существенное влияние на абразивность. Такие горные породы, как граниты и диориты, содержат свободный кварц и полевои шпат, обладающие высокой абразивностью, в то время как более твердым скарновым породам часто соответствует менее интенсивный износ [8, 9].

Отметим, что большое влияние на абразивный износ дробилки оказывает гранулометрический состав питания. Очевидно, что более прочные и крупные куски материала требуют для разрушения приложения значительных усилий. С ростом требуемого измельчающего усилия растет и интенсивность абразивного износа рабочей поверхности. Перед разрушением крупных частицы с большим отношением размера к рабочей ширине щели в зоне преддробления на поверхности валков возникают высокие точечные нагрузки, что приводит к их повышенному износу. Частицы, размер которых не превышает рабочей ширины щели, характеризуются самой низкой абразивностью [10].

По известным данным практического применения дробилок низкое содержание влаги до 5-7% в питании не оказывает пагубного влияния на износостойкость футеровочных бандажей и может даже способствовать образованию самофутерующего слоя. Дальнейшее увеличение влажности приводит к росту интенсивности износа рабочих поверхностей.

В таблице 1 представлены результаты лабораторного тестирования материала на абразивный износ дробилки.

Режим работы дробилки также оказывает существенное воздействие на абразивный износ бандажей, включающий в себя такие параметры, как скорость вращения валков, давление на материал и время работы дробилки. Высокая скорость и высокое давление приводят к интенсивному износу бандажей.

Табл. 1. Результаты тестирования абразивности материала в лабораторной дробилке

Материал	Расход стали, г/т	
	Минимальный	Максимальный
Золотоносные руды	15	35
Мягкие медные руды	10	25
Твердые медные руды	25	50
Граниты	40	40
Железные руды	5	15
Черновые железные концентраты	0,5	3
Известняк	0,5	5
Кимберлиты	2	40

В целях снижения интенсивности абразивного износа рабочих поверхностей и повышения производительности рекомендуется эксплуатация дробилки на питании с полным гранулометрическим составом без предварительного грохочения. Результаты лабораторных тестов абразивности руд показывают, что предварительный отсев тонких частиц из питания приводит к резкому росту износа валков. Более того, при использовании футеровочных бандажей с интегрированными штифтами, мелочь в питании улучшает условия образования самофутерующего слоя. Целесообразность предварительного грохочения может быть обоснована лишь для мягких глинистых материалов в тех случаях, где требуется снижение влажности [11].

Материал, из которого изготовлены бандажы, также играет важную роль в их абразивном износе. Более твердые и прочные материалы обычно имеют большую стойкость к абразивному износу.

Футеровочные бандажы с интегрированными штифтами из карбида вольфрама по сравнению с литыми поверхностями более чувствительны к прочности руды и пиковым точечным нагрузкам, возникающим в результате попадания в рабочую зону крупных кусков, что приводит к увеличению вероятности поломки отдельных штифтов. В результате при применении бандажей со штифтами на твердых рудах с пределом прочности более 250 МПа рекомендуемое отношение  $x_{\max}/s$  ( $x_{\max}$  – размер максимального куска в питании, мм;  $s$  – рабочая ширина щели, мм) не превышает 1, в то время как на мягких рудах с пределом прочности до 100 МПа это значение может достигать 1,5.

Конструкция дробилки может также оказывать значительное влияние на абразивный износ бандажей. Неправильная геометрия бандажей или недостаточное уплотнение между ними приводит к неоднородности распределения нагрузки и повышению абразивного износа.

Регулярное обслуживание бандажей являются важными факторами для предотвращения абразивного износа. Регулярная очистка от накопления материала на поверхности бандажей и проверка наличия трещин или деформаций также предотвращают повышенный износ [2, 4].

### **Технологические показатели работы валковых дробящих агрегатов**

Основными технологическими показателями работы дробилки, как рудоподготовительного аппарата, являются производительность, степень сокращения крупности разрушаемого материала и удельный расход энергии. Далее приведем некоторые общие сведения об этих величинах.

Производительность зависит от ряда факторов, связанных с параметрами самой машины, свойствами руды и конфигурацией питания. К рассматриваемым параметрам машины следует отнести тип поверхности футеровочного бандажя, измельчающее усилие, скорость вращения валков и отношение ширины валка к его диаметру; к свойствам руды – плотность, влажность, прочность, гранулометрический состав и размер максимального куска. Под конфигурацией питания понимается уровень заполнения питающей коробки, производительность течи питающей коробки, наличие сегрегации питания, количество материала, подающегося в продукт в обход дробилки в результате срабатывания системы защиты от недробимых металлических предметов. Влияние тех или иных факторов на производительность дробилки варьируется в зависимости от типа руды. Некоторые материалы чрезвычайно чувствительны даже к малым колебаниям перечисленных параметров.

Подавляющее влияние на производительность оказывает тип поверхности футеровочного бандажя (рис. 2). Применение штифтов из карбида вольфрама позволяет достичь максимальной пропускной способности, в 1,5-2 раза превышающей результаты использования поверхностей других типов. Более того, гранулометрический состав разгрузки дробилки со штифтами гораздо менее чувствителен к высокой влажности материала, колебаниям измельчающего усилия и скорости вращения валков.

Диапазон крупности гранулометрического состава питания дробилки весьма существенно сказывается на ее производительности. Более узкому грансоставу соответствует меньшая удельная пропускная способность. Материал с малым содержанием тонких

фракций, заполняющих пустоты между более крупными частицами, может быть сжат в большей степени, что приводит к сужению рабочей ширины щели и соответствующей потере производительности. Твердые руды имеют более узкую гранулометрическую характеристику в результате дефицита тонких классов, что обуславливает низкую удельную пропускную способность. Аналогично, надрешетный материал после предварительного грохочения характеризуется более низкой удельной пропускной способностью. Но, в ряде случаев, возможны и некоторые преимущества от предварительного грохочения в плане снижения удельных энергозатрат: они могут нивелироваться повышением абразивного износа футеровочных бандажей [4, 7].

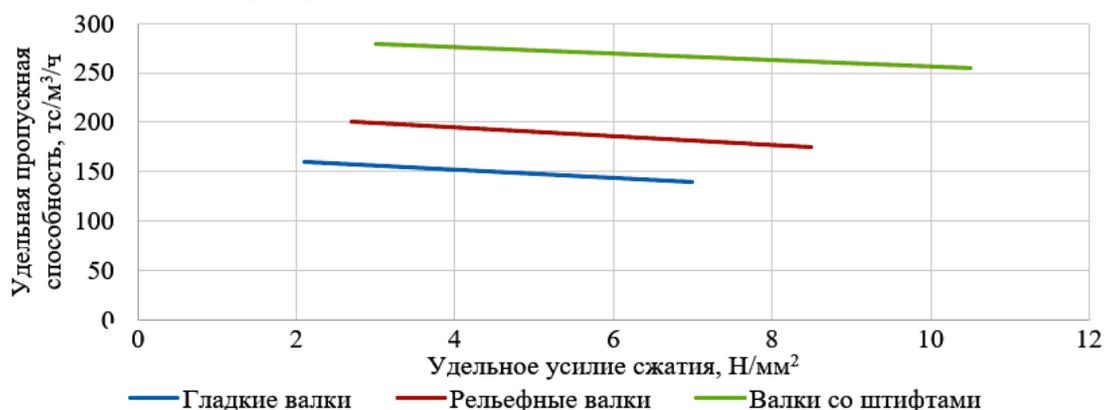


Рис. 2. Влияние типа поверхности футеровочного бандажа на удельную пропускную способность

Равномерный поток питания в совокупности со стабилизацией уровня загрузки питающей коробки являются необходимыми условиями для выхода на высокие показатели работы дробилки. Снижение производительности происходит из-за недостатка питания или конфигурации питающей точки, препятствующих достижению максимальной пропускной способности и служащих причинами чрезмерного износа рабочих поверхностей. Сегрегация питания наравне с износом щековых плит также является причиной внутреннего байпаса, в результате которого возрастает производительность машины, но снижается эффективность измельчения.

Гранулометрический состав продукта дробилки в основном контролируется измельчающим усилием в зоне сжатия и зависит от ряда факторов, связанных как со свойствами машины, так и с характеристиками разрушаемого материала.

К влияющим на тонину свойствам машины следует отнести:

- удельное усилие сжатия;
- рабочая ширина щели между валками;
- соотношение между разгрузкой центральной, краевых зон и байпасом.

К характеристикам руды, определяющие степень сокращения крупности, можно отнести следующие:

- крупность максимального куска в питании;
- гранулометрический состав питания;
- физико-механические свойства руды (твердость, пластичность, текстура, крупность минеральных зерен, прочность сrostков).

Известно, что подавляющее влияние измельчающего усилия сказывается на распределении тонких классов в разгрузке дробилки, тогда рабочая ширина щели между валками задает форму гранулометрической характеристики продукта в области крупных частиц. Крупность максимального куска в продукте дробилки зависит от гранулометрического состава питания машины. Если в питании присутствуют куски, размер которых превышает рабочую ширину щели, то крупность максимальных частиц в продукте не может быть более ширины щели. В случае, если куски в питании по размеру меньше рабочей ширины щели, то крупность максимальных частиц в продукте может быть такой же, что и в питании. Ранее отмечалось [4], что рабочая ширина щели дробилки является

линейной функцией диаметра валков, то есть при эксплуатации машин больших типоразмеров достижение приемлемой крупности для последующих шаровых мельниц может потребовать организации замкнутого цикла с применением грохотов.

Наряду с производительностью, степенью сокращения крупности и удельным расходом энергии к важным (с технологической, эксплуатационной и экономической точек зрения) свойствам следует отнести интенсивность износа футеровочных бандажей, основное влияние на которую оказывают следующий набор факторов:

- износостойкость материала футеровочных бандажей (твердость, образование самофутерующего слоя);
- абразивные свойства разрушаемого материала (гранулометрический состав, влажность, твердость, вещественный состав, крупность минеральных зерен);
- эксплуатационные параметры дробилки (измельчающее усилие, скорость вращения валков) [12].

*Анализ существующих материалов и технологий для повышения стойкости бандажей к абразивному износу*

В результате постоянного контакта с грубыми и абразивными материалами, поверхность бандажей подвергается интенсивному износу. Для предотвращения преждевременного износа и улучшения стойкости последних используются различные материалы и технологии.

Среди различных подходов к повышению стойкости бандажей к абразивному износу – использование высокотвердых материалов, таких как карбиды или оксиды. Карбид титана (вольфрама), например, обладает высокой твердостью и стойкостью к абразивным процессам. Он может быть добавлен в состав чугунных легировок для улучшения их свойств. Также есть возможность применения бориды титана ( $TiB_2$ ) или других высокотвердых материалов.

Другим подходом является использование композитных материалов, которые объединяют преимущества различных компонентов для достижения оптимальных свойств. Например, композитный бандаж может состоять из чугунной основы с добавлением волокон из углепластика или других усилительных веществ. Это позволяет достичь комбинации высокой прочности и стойкости к абразивным процессам.

Помимо выбора подходящего материала важную роль играет, например, и оптимизация технологических параметров процесса изготовления бандажей. Правильная термообработка может существенно улучшить микроструктуру материала и его свойства. Также важен контроль процесса нанесения покрытий для достижения оптимального состояния поверхности бандажа [13, 14].

## **Выводы**

В последние годы проблема абразивного износа цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок становится все более актуальной. Это связано как с увеличением объемов добычи и переработки руды, так и с повышением требований к эффективности работы оборудования. Абразивный износ является одной из основных причин выхода валковых дробилок из строя, что приводит к значительным экономическим потерям.

Для решения этой проблемы проводятся исследования по разработке новых материалов и технологий, направленных на повышение стойкости бандажей к абразивному износу. Одним из перспективных направлений является использование композитных материалов, которые сочетают в себе высокую механическую прочность и устойчивость к абразивному износу.

Один из таких материалов – это карбидное покрытие. Карбидные покрытия обладают высокой твердостью и химической инертностью, что позволяет им эффективно сопротивляться абразивному износу. Они также обладают хорошей адгезией к основе и стойкостью к механическим нагрузкам. Применение карбидных покрытий на поверхности бандажей валковых дробилок способствует увеличению их срока службы и снижению эксплуатационных затрат.

Важным трендом в области повышения стойкости бандажей валковых дробилок является разработка новых конструкций и геометрии бандажей. Оптимальная геометрия бандажа позволяет равномерно распределить нагрузку на его поверхности и предотвратить возникновение острых углов или ребер, которые могут быть подвержены абразивному износу. Использование специальных конструктивных решений, таких как ребра жесткости или противоиносные покрытия на определенных участках бандажа, также может значительно повысить его стойкость к абразивному износу.

Таким образом, перспективы развития и современные тренды в области повышения стойкости бандажей валковых дробилок к абразивному износу включают использование композитных материалов, разработку новых конструкций и геометрий бандажей. Применение таких инновационных решений могут значительно увеличить эффективность работы валковых дробилок и снизить их износ.

#### Список литературы

1. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnostics of rock crushing modes to improve the efficiency of single-roll crusher // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 84, no. 1, p. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012033.
2. Morrell S. Predicting the total specific energy requirements of crushing, high-pressure roller grinding and deburring mill circuits // Minerals Engineering. 2009, vol. 22, no. 6, pp. 544-549. DOI:10.1016/j.mineng.2009.01.005.
3. Климовский Р. Выбор и определение параметров измельчающих валков высокого давления // Mineral processing plant design, practice and control proceedings. – 2002. – Т. 1. – С. 636-668.
4. Daniel M.J., Morrell S. Validation and scaling of the IVWD model // Minerals Engineering. 2004, vol. 17, no. 11-12, pp. 1149-1161. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.016.
5. Зиядаева Т.Ю. Механизмы абразивного изнашивания материалов при шлифовании: монография. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
6. Грубый С.В. Физические закономерности процесса изнашивания твердосплавных и алмазных инструментов: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 123 с.
7. Аблаев Р.Р., Костюков В.С. Основные факторы, влияющие на абразивный износ зубьев зубчатых передач // Studnet. – 2020. – Т. 3, № 2. – С. 39-43.
8. Ефимов Д.А., Господариков А.П. Технические и технологические аспекты использования валков с профилем в виде треугольника Релло в дробильных агрегатах при обогащении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-2. – С. 117-126. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_102\_0\_117.
9. Lieberwisch H., Hilman P., Hesse M. Dynamics of double roll crushers // Minerals engineering. 2017, vol. 103, pp. 60-66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009.
10. Бойко П.Ф. Обеспечение долговечности броней дробилок путем применения новых технологий их изготовления и диагностирования износа // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2019. – № 5. – С. 42-47.
11. Богданов В.С., Ченцов А.Е. Повышение надежности работы роторных дробилок // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – Вып. XX. – С. 12-16.
12. Власенко Д.А. Уточненная методика определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках // Вестник донецкого национального технического университета. – 2020. – № 3. – С. 3-9.
13. Жураева Г.Ш. Продолжительность износного испытания с активным участием абразивных частиц // Universum: технические науки. – 2021. – № 6-1(87). – С. 42-44.
14. Мелкумян С.А., Перинская И.В. Оценка перспектив использования метода лазерного термического упрочнения поверхности бандажа валка валковой дробилки // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. Сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – Т. 4. – С. 274-278.

#### References

1. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnostics of rock crushing modes to improve the efficiency of single-roll crusher // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 84, no. 1, p. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012033.
2. Morrell S. Predicting the total specific energy requirements of crushing, high-pressure roller grinding and deburring mill circuits // Minerals Engineering. 2009, vol. 22, no. 6, pp. 544-549. DOI:10.1016/j.mineng.2009.01.005.
3. Klimovsky R. Selection and determination of parameters of high-pressure grinding rolls // Mineral processing plant design, practice and control proceedings. 2002, vol. 1, pp. 636-668.
4. Daniel M.J., Morrell S. Validation and scaling of the IVWD model // Minerals Engineering. 2004, vol. 17, no. 11-12, pp. 1149-1161. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.016.

5. Ziyadaeva T.Yu. Mechanisms of abrasive wear of materials during grinding: monograph. – M.: Bauman Moscow State Technical University, 2014.
6. Rude S.V. Physical regularities of wear process of carbide and diamond tools: textbook for universities. – M.: Bauman Moscow State Technical University, 2013. – 123 p.
7. Ablaev R.R., Kostikov V.S. Main factors affecting the abrasive wear of gear teeth // Studnet. 2020, vol. 3, no. 2, pp. 39-43.
8. Efimov D. A., Gospodarikov A. P. Technical and technological aspects of the use of rolls with a profile in the form of Rello triangle in crushing units during ore beneficiation // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 10-2, pp. 117-126. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_102\_0\_117.
9. Lieberwisch H., Hilman P., Hesse M. Dynamics of double roll crushers // Minerals engineering. 2017, vol. 103, pp. 60-66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009.
10. Boyko P.F. Ensuring the durability of crusher armor by applying new technologies of their manufacturing and wear diagnostics // Equipment and technologies for oil and gas complex. 2019, no. 5, pp. 42-47.
11. Bogdanov V.S., Chentsov A.E. Increasing the reliability of rotary crushers // Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials: interuniversity collection of articles. – Belgorod: BSTU n.a. V.G. Shukhov, 2021. – Iss. XX. – P. 12-16.
12. Vlasenko D. A. Refined methodology for determining the energy and power parameters of the grinding process in roller crushers // Bulletin of Donetsk National Technical University. 2020, no. 3, pp. 3-9.
13. Zhuraeva G.Sh. Duration of wear test with active participation of abrasive particles // Universum: Technical Sciences. 2021, no. 6-1(87), pp. 42-44.
14. Melkumyan S.A., Perinskaya I.V. Evaluation of the prospects of using the method of laser thermal hardening of the bandage surface of the roller crusher shaft // Innovative potential of society's development: the view of young scientists. Collection of scientific articles of the 3rd All-Russian Scientific Conference of promising developments. – Kursk: SouthWest State university, 2022. – Vol. 4. – P. 274-278.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Господариков Александр Петрович</b> – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики	<b>Gospodarikov Alexander Petrovich</b> – doctor of technical sciences, professor, head of higher mathematics Department
<b>Ефимов Денис Александрович</b> – аспирант	<b>Efimov Denis Alexandrovich</b> – postgraduate student
efimov.d.aleksa@mail.ru	

Получена 30.11.2023