

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123

Романович А.А., *Духанин С.А., Романович М.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: duhanin777@yandex.ru

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОТОРНО-ВИХРЕВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. Статья направлена на повышение долговечности рабочих органов роторно-вихревых мельниц, получивших широкое применение в производстве сухих строительных смесей. Приведено описание устройства роторно-вихревой мельницы.

В статье предложен разработанный учеными БГТУ им. В.Г. Шухова новый метод повышения долговечности рабочих органов (била) мельницы, путем нанесения на их поверхности ячеек с размерами, позволяющими запрессоваться в них частиц измельчаемого материала, и тем самым защитит поверхность от быстрого износа.

В результате аналитического исследования, силового взаимодействия измельчаемого материала с поверхностью ячейки била, получено уравнение для определения геометрических размеров ячейки, позволяющих за счет сил трения удерживать объем частиц запрессованного материала от выпадения из неё.

Установлено, что размеры ячейки взаимосвязаны между собой и определяются таким образом, чтобы результирующая выталкивающая сила была равной или меньше удерживающей (силы трения). Доказано, что запрессовка частиц измельчаемого материала, в прямоугольных ячейках наплавленной сетки на рабочей поверхности била, во многом определяется геометрическими размерами ячейки, а также зависит от физико-механических характеристик дробимых материалов. Предложена конструкция била, которая позволяет повысить его долговечность, за счет уменьшения площади контакта измельчаемого материала с рабочей поверхностью била.

Ключевые слова: рабочие органы (била), износостойкость, роторно-вихревая мельница, износ, наплавка.

Введение. В странах западного мира, начиная с 1960-х гг., в отрасли строительства нашли широкое применение сухие строительные смеси. В России производство этих смесей начато с 90-х годов.

Среднедушевой расход строительных смесей в Российской Федерации составляет около 2–3 кг за год, тогда как в зарубежных развитых странах, например, в Германии он составляет около 30 кг, в Финляндии, Польше, Франции около 20 кг (рис. 1) [1–4].

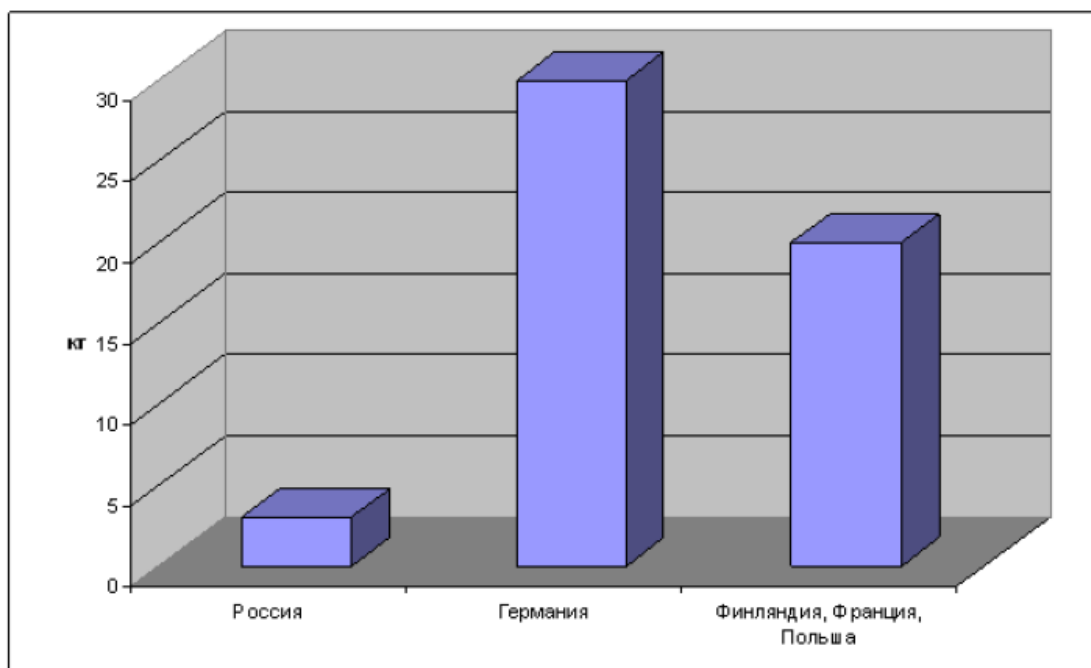


Рис. 1. Среднедушевой расход сухих строительных смесей за год

Главные покупатели сухих строительных смесей компании, которые занимаются строительством и ремонтом. Их доля составляет около 75 % от общего количества продаж смесей. В настоящее время на внутреннем рынке нашей страны прослеживается ежегодное увеличение производства сухих смесей в среднем на 15–20 %.

Поэтому в последние десятилетия большое внимание уделяется учеными и специалистами стройиндустрии вопросам создания новых технологий и повышения эффективности применяемого оборудования. Как показывает практика, их прикладные работы позволяют снизить энергозатраты процесса и повысить надежность агрегатов, в том числе и долговечность их рабочих органов [1–5].

Одними из наиболее распространенных помольных агрегатов, получивших широкое распространение в технологии производства сухих строительных смесей, являются роторно-вихревые мельницы (РВМ). Они предназначены для тонкого измельчения и смешивания готовой продукции с механохимической активацией их частиц.

Представителем этого класса агрегатов является роторно-вихревая мельница РВМ-3000-01, которая имеет следующие технические характеристики: производительность, в зависимости от перерабатываемого материала, 3–5 тонн в час, размер частиц исходного материала составляет не более 5 мм, при этом готового продукта доходит 100 мкм, скорость вращения ротора - 3000 мин⁻¹, а потребляемая мощность 90 кВт. Сравнительно небольшие размеры роторно-вихревых мельниц позволяют устанавливать их в ограниченных пространствах [5, 6].

Одним из узких мест при работе данных агрегатов является быстрый износ их рабочих органов – бил, который в зависимости от технологии производства на сегодня составляет 150-200 часов.

Поэтому многие крупные компании, такие как «KRUPP Polysius AG», «KHD Humboldt Wedag AG» и «Корперн», эффективно работают над созданием надежных конструкций рабочих органов – бил.

Вышеуказанные компании предлагают конструкции бил, которые выполнены из износостойкого металла, но используются при небольших скоростях вращения роторов и невысоких температурах, так как они обладают повышенной хрупкостью, а также имеют высокую стоимость. Эти рабочие элементы в зависимости от абразивности материала работают в диапазоне от 200 до 400 часов [7].

Материалы и методы. Практическое использование мельниц роторно-вихревого действия показывает, что условия их эксплуатации оказывают существенное влияние на работоспособность бил и величину их износа. Например, высокая температура исходного материала может представлять серьезную опасность для бил со сплошной наплавленной рабочей поверхностью, причем использование такого приема приводит к повышенному расходу дорогостоящих материалов.

Учеными БГТУ им. В.Г. Шухова разработан новый метод повышения долговечности бил за счет нанесения специальной сетки на их рабочую поверхность, что способствует запрессовке в них частиц измельчаемого материала и тем самым осуществить защиту от износа. Применение наплавки в виде сетки с ячейками по сравнению со сплошной наплавкой позволяет снизить расход дорогостоящего материала. Однако для удержания от выпадения из ячейки частиц измельчаемого материала её геометрические размеры имеют существенное значение.

Отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по величине и форме ячеек наносимых на рабочую поверхность бил тормозит внедрение данного метода в промышленность.

Основная часть. Техническое решение ученых БГТУ им. В.Г. Шухова [8] использовано в конструкции роторно-вихревой мельницы, рабочие органы которой закреплены в перпендикулярной плоскости к валу ротора в его корпусе путем вкручивания и выполнены цилиндрической формы (рис. 2.)

Схема наплавки ячеек на рабочей поверхности била представлена на рисунке 3, согласно которой, они имеют прямоугольную форму, с соответствующими размерами сторон m , n и c , а в углах ячейки в результате наплавки образуются закругления радиусом r (рис. 4) [8–10].

Размеры ячейки необходимо подбирать таким образом, чтобы результирующая выталкивающая сила, действующая в ней, была равной или меньше удерживающей, но при этом её размеры оставались достаточными для реализации способа наплавки износостойкого материала на рабочую поверхность била.

Из вышеуказанного следует, что условия запрессовки во многом зависят от величины размеров самой ячейки, и физико-механических свойств измельчаемого материала.

Установлено, что в момент соударения об била, измельчаемый материал запрессовывается в ячейку под усилием удара, в момент уравнивания скоростей в ячейке возникает упругое расширение, которое направленно на выталкива-

ние запрессованных частиц из ячейки. Если суммарные выталкивающие силы будут меньше или равны силам трения частиц о поверхность ячейки била, следовательно, произойдет удержание частиц измельченного материала внутри ячейки [11–19].

Делаем предположения о том, что усилие F упругого расширения равномерно по всей ее боковой поверхности $S_{бок}$.

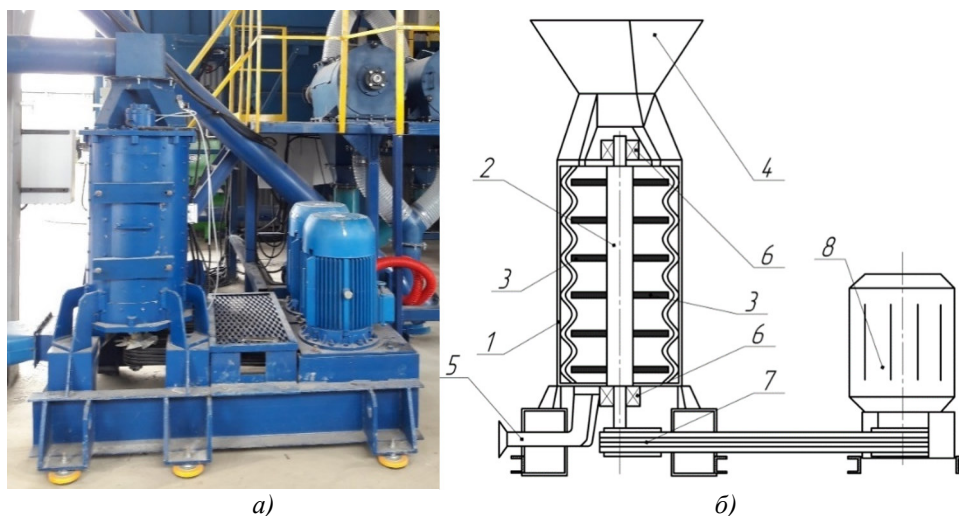


Рис. 2. Роторно-вихревая мельница: а – вид на действующий агрегат; б – конструктивная схема: 1 – цилиндрический корпус со съемной футеровкой волнистого типа; 2 – корпус ротора; 3 – била; 4 – загрузочное отверстие; 5 – разгрузочное отверстие; 6 – подшипниковые опоры; 7 – редуктор, 8 – электродвигатель

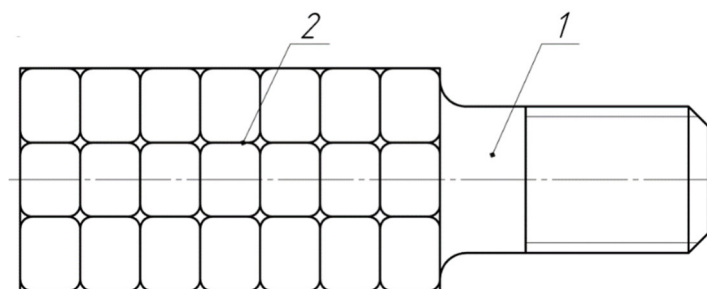


Рис. 3. Схема наплавки на рабочей поверхности била: 1 – било, 2 – сетка прямоугольной формы

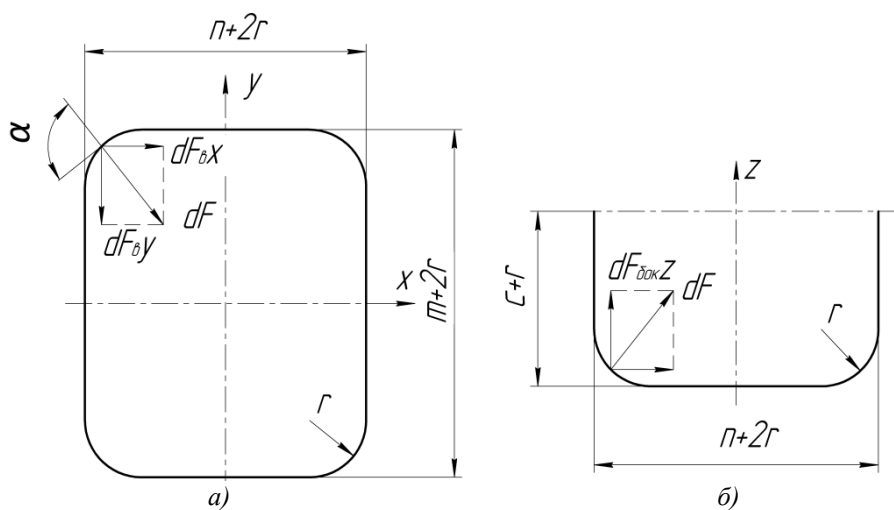


Рис. 4. Форма ячейки футерующей сеткой: а – вид в профиль, б – поперечный вид:

dF – величина усилия, действующего на элементарную площадку боковой поверхности ячейки била; $dF_{бок}(z)$, $dF_{бок}(x)$ и $dF_{бок}(y)$ – силы упругого расширения, действующие на боковую поверхность на соответствующей оси координат

Тогда величина усилия, действующего на элементарную площадку боковой поверхности ячейки била может быть представлена выражением:

$$dF = FdS_{бок} = Fr \cdot d\alpha \cdot l_6, \quad (1)$$

где l_6 – длина периметра ячейки; r – радиус скругления в углах ячейки; $d\alpha$ – средний угол направления результирующей выталкивающей силы; $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности; F – усилие упругого расширения.

Уравнение для определения усилия упругого расширения от всей боковой поверхности примет вид:

$$\sum F_{бок.z} = \int dF_{бок}(z) \cdot \cos \alpha = 2r^2 d\alpha(n+m)F \cdot \int \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (3)$$

После интегрирования уравнение (3) преобразуется в следующее выражение:

$$\sum F_{бок.z} = 2r^2(n+m)F_z \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Таким же образом получим уравнение для расчета усилия выталкивания, действующего от всей сферической поверхности ячейки:

$$\sum F_{сф.z} = r^2 F \int_0^{2\pi} dS_{бок} \int_0^{\pi/2} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha. \quad (5)$$

После интегрирования уравнение (5) преобразуется в следующее выражение:

$$\sum F_{сф.z} = \pi r^2 F. \quad (6)$$

$$F_{тр.б} = \int f dF_{бок} \cdot \sin \alpha = -f \cdot 2r^2(n+m) \cdot F \cdot \cos \alpha, \quad (9)$$

где f – коэффициент внешнего трения, зависящий от свойств материала и поверхности бил;

- по боковой поверхности ячейки высотой «с»:

$$F_{тр.б} = \int f dF_{бок} = -frc(n+m) \cdot F; \quad (10)$$

$$2r^2(n+m) \cdot F \cdot \sin \alpha + F \cdot n \cdot m \cdot r^2 + \pi \cdot r^2 \cdot F \leq f \cdot 2r^2(n+m) \cdot F \cdot \cos \alpha + f \cdot \pi \cdot r^2 \cdot F + f \cdot r \cdot c(n+m) \cdot F. \quad (12)$$

Из уравнения (12) можно определить требуемую высоту ячейки:

$$c \geq \frac{2r \cdot (\sin \alpha(n+m) + 0,5 \cdot n \cdot m - f \cdot \cos \alpha(n+m))}{f \cdot (n+m)}. \quad (13)$$

Полученное выражение (13) позволяет рассчитывать геометрические размеры ячейки, наплавленной на рабочей поверхности бил сетки, при которых выталкивающие силы, действующие на объем запрессованного материала будут меньше или равными силам трения. Предложенный метод нанесения на рабочую поверхность позволяет уменьшить проскальзывание частиц измельчаемого материала относительно не наплавленной части била, что позволяет повысить его долговечность [20].

$$dF_{бок} = cr \cdot d\alpha \cdot (2nr + 2mr) \cdot Fd\alpha, \quad (2)$$

где n , m и c – целые числа, кратные радиусу закругления r .

Спроецировав силы, действующие на боковую поверхность $dF_{бок}$ на оси координат: $dF_{бок}(z)$, $dF_{бок}(x)$ и $dF_{бок}(y)$ с учетом, что в ячейке силы упругого расширения $dF_{бок}(x)$ и $dF_{бок}(y)$ взаимно компенсируются (рис. 4). Тогда величину бокового суммарного выталкивающего усилия $\sum F_{бок.z}$, можно описать уравнением:

Выталкивающее усилие F_H , действующее от нижней поверхности ячейки с площадью, $S_я$, можно определить по следующему уравнению:

$$F_H = S_я \cdot F. \quad (7)$$

Тогда величину результирующего усилия, способствующего выталкиванию объема частиц их ячейки можно найти из выражения:

$$\sum \bar{F} = \sum F_{бок.z} + \sum F_{сф.z} + F_H. \quad (8)$$

По аналогии получаем уравнения для расчета сил трения удерживающих спрессованный объем частиц в ячейке:

- по поверхности радиусов закругления:

- по сферической поверхности в углах ячейки:

$$F_{тр.сф} = f dF_{сф.z} \cdot \sin \alpha = f\pi r^2 \cdot F. \quad (11)$$

Исходя из условия обеспечивающего удержания объема частиц в ячейке $\sum F_{тр} \geq \sum F$ имеем:

Выводы

1. Таким образом, предложенный учеными БГТУ им. В.Г. Шухова метод наплавки рабочей поверхности бил в виде сетки с ячейками определенного размера позволяет повысить долговечность бил.

2. В результате проведенного анализа силового взаимодействия в ячейке, нанесенной на рабочей поверхности била, было получено уравнение для определения ее геометрических размеров, позволяющих осуществлять в ней запресовку измельчаемого материала.

3. Установлено, что условия запресовки во многом зависят от величины размеров самой ячейки и физико-механических свойств измельчаемого материала, при этом размеры ячейки

необходимо подбирать таким образом, чтобы результирующая выталкивающая сила, действующая в ней, была равной или меньше удерживающей силы, но при этом её размеры, позволяли осуществить наплавку на рабочую поверхность била.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Духанин С.А., Романович А.А. Анализ работы и пути повышения долговечности бил мельницы РВМ-3000-01 // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. С. 51–55.
2. Якушев А.А., Духанин С.А. Повышение износостойкости рабочих органов роторно-вихревой мельницы // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно - практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. С. 444–447.
3. Демущкин Н. П., Краснов В.В., Орехова Т.Н. Модернизация роторно-вихревой мельницы // IX Международный молодежный форум "Образование. Наука. Производство". Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 946–950.
4. Yinwei Y., Kai F., Jing X. A novel control method for roll gap of roller crusher based on Fuzzy-PID with decision factor self-correction // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. №892. Pp. 12–19.
5. Xuemin L., Man Z., Nan H. Calculation model of coal comminution energy consumption // Minerals Engineering. 2016. № 92. Pp. 21–27.
6. Romanovich A.A., Glagolev S.N., Babaevskiy A.N. Methods to improve efficiency of production technology of the innovative composite cementing materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Issue 3. 032009.
7. Костылев А.А. Исследование процесса измельчения в роторно-вихревой мельнице тонкого помола // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8(95). С. 245–250.
8. Патент на полезную модель № 208012 U1 Российская Федерация, МПК В02С 13/06. Роторная дробилка : № 2021120119: заявл. 17.08.2021 : опубл. 29.11.2021 / С. А. Духанин, А. А. Романович, М. А. Романович; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (БГТУ им. В.Г. Шухова).
9. Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A., Amirhadi Zakeri. Improving the Wear Resistance of Rotary-Vortex Mill Hammers // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. 2021. №1. С. 277–284.
10. Духанин С.А., Романович М.А., Романович А.А. Пути повышения надежности в работе измельчителей ударного действия // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. С. 99–103.
11. Егоров С. Н., Сиротин П. В., Тамадаев В. Г. Анализ поверхностного слоя помольного элемента роторно-вихревой мельницы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2020. № 1(205). С. 81–85. DOI 10.17213/1560-3644-2020-1-81-85.
12. Духанин С.А., Романович М.А., Романович А.А. Повышение долговечности роторно-вихревой мельницы // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно - практической конференции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. С. 93–99.
13. Кардаш С. Н., Гречнева М.В. Сравнительный анализ наплавочных материалов по сопротивляемости абразивному износу // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2015. С. 198–203.
14. Коротков В.А., Гречнева М.В., Болорсук Б. Абразивное изнашивание и износостойкие материалы // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 232–236.
15. Агафонов Д.С., Киселева В.А., Чеховской Е.И. Анализ конструкции роторной дробилки с целью повышения её производительности // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 1609–1613.
16. Чеховской Е.И., Бутов А.П., Киселева В.А., Агафонов Д.С. Анализ конструкции валковой дробилки с целью повышения её надежности // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 1771–1775.
17. Прокопенко В.С., Шарапов Р.Р., Агарков А.М., Шарапов Р.Р. Оптимизация работы оборуду-

дования для получения тонкодисперсных порошков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №1. С. 80–83.

18. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Разработка центробежных мельниц многократного ударного действия с разной конструкцией рабочих органов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2017. С. 96–100.

19. Гарабажиу А.А., Клоков Д.В., Шостак В.Г., Лешкевич А.Ю. Новая конструкция энерго-сберегающего роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих матери-

алов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы международной научно-практической конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. С. 48–53.

20. Герасимов М.Д., Локтионов И.О. Результаты сверхтонкого измельчения материалов в реакторе роторно-вихревого типа // Энерго-, ресурсосберегающие машины, оборудование и экологически чистые технологии в дорожной и строительной отраслях: Материалы Международной научно-практической конференции. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 60–67.

Информация об авторах

Романович Алексей Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: alexejrom@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Духанин Сергей Александрович, старший преподаватель кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: duhanin777@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Романович Марина Алексеевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: bel31rm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.10.2021 г.

© Романович А.А., Духанин С.А., Романович М.А., 2022

Romanovich A.A., *Dukhanin S.A., Romanovich M.A.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: duhanin777@yandex.ru

METHODS OF INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE WORKING BODIES OF A ROTARY-VORTEX MILL

Abstract. The article is aimed at increasing the durability of the working bodies of rotary-vortex mills, which are widely used in the production of dry building mixes. The description of the device of a rotary-vortex mill is given.

The article proposes a new method developed by scientists of the V.G. Shukhov BSTU to increase the durability of the mill's working bodies by applying cells with dimensions on their surfaces that allow particles of the crushed material to be pressed into them, and thereby protect the surface from rapid wear.

As a result of an analytical study of the force interaction of the crushed material with the surface of the beale cell, an equation was obtained to determine the geometric dimensions of the cell, allowing due to friction forces to keep the volume of particles of the pressed material from falling out of it.

It is established that the dimensions of the cell are interconnected and are determined in such a way that the resulting pushing force is equal to or less than the holding force (friction force). It is proved that the pressing of particles of the crushed material, in rectangular cells of the deposited mesh on the working surface of the bat, is largely determined by the geometric dimensions of the cell, and also depends on the physical and mechanical characteristics of the crushed materials. The design of the bill is proposed, which allows to increase its durability by reducing the contact area of the crushed material with the working surface of the bill.

Keywords: working bodies (bila), wear resistance, rotary-vortex mill, wear, surfacing.

REFERENCES

1. Duhanin S.A., Romanovich A.A. Analysis of the work and ways to increase the durability of the RVM-3000-01 mill bits [Analiz raboty i puti povysheniya dolgovechnosti bil mel'nicy RVM-3000-01]. *Energo-resursosbergayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2019. Pp. 51–55. (rus)
2. YAKushev A.A., Duhanin S.A. Increasing the wear resistance of the working bodies of the rotary-vortex mill [Povyshenie iznosostojkosti rabochih organov rotorno-vihrevoj mel'nicy]. *Energo-resursosbergayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2020. Pp. 444–447. (rus)
3. Demushkin N. P., Krasnov V.V., Orekhova T.N. Modernization of the rotary-vortex mill [Modernizaciya rotorno-vihrevoj mel'nicy]. IX Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum "Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo". Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhov. 2017. Pp. 946–950. (rus)
4. Yinwei Y., Kai F., Jing X. A novel control method for roll gap of roller crusher based on Fuzzy-PID with decision factor self-correction IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. No 892. Pp. 12–19.
5. Xuemin L., Man Z., Nan H. Calculation model of coal comminution energy consumption *Minerals Engineering*. 2016. No 92. Pp. 21–27.
6. Romanovich A.A., Glagolev S.N., Bабaevskiy A.N. Methods to improve efficiency of production technology of the innovative composite cementing materials IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. Issue 3, 032009.
7. Kostylev A.A. Investigation of the grinding process in a rotary-vortex fine grinding mill [Issledovanie processa izmel'cheniya v rotorno-vihrevoj mel'nice tonkogo pomola]. *Bulletin of KrasGAU*. 2014. No 8(95). Pp. 245–250. (rus)
8. Duhanin S.A., Romanovich A.A., Romanovich M.A. Impact crusher. Patent RF, no. 208012 U1, 2021.
9. Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A., Amirhadi Zakeri. Improving the Wear Resistance of Rotary-Vortex Mill Hammers *Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future*. 2021. No 1. Pp. 277–284.
10. Duhanin S.A., Romanovich M.A., Romanovich A.A. Ways to improve the reliability of impact shredders [Puti povysheniya nadezhnosti v rabote izmel'chitelej udarnogo dejstviya]. *Energo-resursosbergayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2021. Pp. 99–103. (rus)
11. Egorov S.N., Sirotin P.V., Tamadaev V.G. Analysis of the surface layer of the grinding element of a rotary-vortex mill [Analiz poverhnostnogo sloya pomol'nogo elementa rotorno-vihrevoj mel'nicy]. *Izvestiya of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences*. 2020. No 1(205). Pp. 81–85. doi: 10.17213/1560-3644-2020-1-81-85. (rus)
12. Duhanin S.A., Romanovich M.A., Romanovich A.A. Increasing the durability of the rotary vortex mill [Povyshenie dolgovechnosti rotorno-vihrevoj mel'nicy]. *Energo-resursosbergayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: materialy mezhdunarodnoj nauchno - prakticheskoy konferencii*. Belgorod: Izd-vo BGTU. 2021. Pp. 93–99. (rus)
13. Kardash S. N., Grechneva M.V. Comparative analysis of surfacing materials on resistance to abrasive wear [Sravnitel'nyj analiz naplavochnyh materialov po soprotivlyaemosti abrazivnomu iznosu]. *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot polucheniya do utilizacii): materialy dokladov V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Irkutsk: Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet. 2015. Pp. 198–203. (rus)
14. Korotkov V.A., Grechneva M.V., Bolorsuh B. Abrasive wear and wear-resistant materials [Abrazivnoe iznashivanie i iznosostojkie materialy]. *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot polucheniya do utilizacii): Sbornik trudov IV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Irkutsk: Irkutskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2014. Pp. 232–236. (rus)
15. Agafonov D.S., Kiseleva V.A., Chekhovskoj E.I. Analysis of the design of the rotary crusher in order to increase its productivity [Analiz konstrukcii rotornoj drobilki s cel'yu povysheniya eyo proizvoditel'nosti]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im. V.G. SHuhova*. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2019. Pp. 1609–1613. (rus)
16. Chekhovskoj E.I., Butov A.P., Kiseleva V.A., Agafonov D.S. Analysis of the roll crusher design in order to increase its reliability [Analiz konstrukcii valkovojoj drobilki s cel'yu povysheniya eyo nadezhnosti]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im.*

V.G. SHuhova. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. SHuhova. 2019. Pp. 1771–1775. (rus)

17. Prokopenko V.S., SHarapov R.R., Agarkov A.M., Sharapov R.R. Optimization of equipment operation for obtaining fine powders [Optimizaciya raboty oborudovaniya dlya polucheniya tonkodispersnyh poroshkov]. Bulletin of V.G. Shukhov BSTU, 2015. No1. Pp.80–83. (rus)

18. Matveev A.I., Vinokurov V.R. Development of centrifugal mills of multiple impact action with different design of working bodies [Razrabotka centrobezhnyh mel'nic mnogokratnogo udarnogo dejstviya s raznoj konstrukciej rabochih organov]. Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya: materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Ekaterinburg: Izdatel'stvo "Fort Dialog-Iset". 2017. Pp. 96–100. (rus)

19. Garabazhiu A.A., Klokov D.V., Shostak V.G., Leshkevich A.Yu. New design of energy-sav-

ing rotary centrifugal mixer for mixing dry bulk materials [Novaya konstrukciya energosberegayushchego rotorno-centrobezhnogo smesitelya dlya peremeshivaniya suhих sypuchih materialov]. Energieffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. Imperatora Petra I. 2018. Pp. 48–53. (rus)

20. Gerasimov M.D., Loktionov I.O. Results of ultrafine grinding of materials in a rotor-vortex type reactor [Rezultaty sverhtonkogo izmel'cheniya materialov v reaktore rotorno-vihrevogo tipa]. Energo-, resursosberegayushchie mashiny, oborudovanie i ekologicheski chistye tekhnologii v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2018. Pp. 60–67. (rus)

Information about the authors

Romanovich, Alexey A. DSc, Professor. E-mail: alexejrom@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Dukhanin, Sergey A. Senior lecturer. E-mail: duhanin777@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Romanovich, Marina A. PhD, Assistant professor. E-mail: bel31rm@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46.

Received 11.10.2021

Для цитирования:

Романович А.А., Духанин С.А., Романович М.А. Методы повышения износостойкости рабочих органов роторно-вихревой мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 116–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123

For citation:

Romanovich A.A., Dukhanin S.A., Romanovich M.A. Methods of increasing the wear resistance of the working bodies of a rotary-vortex mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 116–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-116-123