

РАСЧЕТ ЧИСЛА ОБОРОТОВ ВАЛКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ДРОБИЛКИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СДВИГ

Никитин А.Г., Курочкин Н.М.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

Ключевые слова: дробление, энергоэффективность, валковая дробилка, деформация, сдвиг, касательные напряжения, упор.

Аннотация. В статье приведен анализ работы дробилок различного типа с точки зрения их энергопотребления. Выявлено, что дробилки, работающие на сжатие разрушаемого материала, имеют примерно одинаковую удельную энергоёмкость, то есть одинаковый расход энергии на разрушение единичного объема материала равной прочности, при этом разрушение сжатием самый энергоёмкий из известных способов дробления. Ударные (роторные и молотковые) дробилки предназначены для ударного дробления различных хрупких материалов, при этом разрушение происходит за счет раскалывания. Разрушение сжатием требует почти полуторакратных затрат энергии, по сравнению с разрушением ударом, однако, дробилки ударного действия имеют существенный недостаток, который выражается в том, что лишь 25-30% готового продукта получаются с заданным фракционным диапазоном. Описана конструкция энергосберегающей валковой дробилки, работающей на сдвиг, при работе которой хрупкий материал разрушается при создании в разрушаемом куске только касательных напряжений, действующих при возникновении сдвиговых деформаций. Приведен метод расчета числа оборотов валка, при котором накапливается кинетическая энергия, соответствующая запасу потенциальной энергии, необходимой для разрушения куска хрупкого материала. Материалы статьи представляют интерес для специалистов в области машиностроения, а также горной, металлургической, химической и строительной промышленности.

CALCULATION OF THE NUMBER OF REVOLUTIONS OF THE ROLL OF AN ENERGY-EFFICIENT CRUSHER OPERATING ON A SHEAR

Nikitin A.G., Kurochkin N.M.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Keywords: crushing, energy efficiency, roll crusher, deformation, shear, tangential stresses, thrust.

Abstract. The article provides an analysis of the operation of crushers of various types in terms of their energy consumption. It has been revealed that crushers working to compress the destroyed material have approximately the same specific energy intensity, that is, the same energy consumption for the destruction of a single volume of material of equal strength, while destruction by compression is the most energy-intensive of the known crushing methods. Impact (rotary and hammer) crushers are designed for impact crushing of various brittle materials, while destruction occurs due to splitting. Compression destruction requires almost one and a half times the energy consumption compared to impact destruction, however, impact crushers have a significant disadvantage, which is expressed in the fact that only 25-30% of the finished product is obtained with a given fractional range. The design of an energy-saving shear roller crusher is described, during which the brittle material is destroyed when creating only tangential stresses in the piece being destroyed, acting upon the occurrence of shear deformations. A method is given for calculating the number of revolutions of the roll, in which kinetic energy is accumulated corresponding to the reserve of potential energy necessary for the destruction of a piece of brittle material. The materials of the article are of interest to specialists in the field of mechanical engineering, as well as mining, metallurgical, chemical and construction industries.

Введение

Мировая потребность в различных видах раздробленного материала в горной, металлургической, строительной и других отраслях промышленности обуславливает увеличение использования минерального сырья, необходимого для ведения технологических процессов, растет на 3-8% в год [1]. Все способы подготовки минерального сырья к дальнейшему использованию на первых этапах включают в себя его дробление с целью получения необходимого фракционного состава для дальнейшей переработки.

Одним из основных показателей процесса дробления является его энергоэффективность [2], которая определяется массой дроблёного материала, получаемой при расходовании единицы электроэнергии.

Состояние вопроса

В промышленности используются дробилки для разрушения хрупких материалов сжатием (валковые, щековые, конусные) и ударом (зубчатые, молотковые), поэтому свойства дробимости на уровне количественных оценок и характеристик изучены для этих двух видов разрушающего воздействия [3].

Дробилки сжатия, широко используемые в промышленности, делятся на следующие виды: щековые [4]; валковые [5]; конусные [6]. Эти дробилки, работающие на сжатие разрушаемого материала, имеют примерно одинаковую удельную энергоёмкость, то есть одинаковый расход энергии на разрушение единичного объема материала равной прочности [7]. Разрушение сжатием самый энергоёмкий из известных способов дробления [8].

Ударные (роторные и молотковые) дробилки предназначены для ударного дробления различных хрупких материалов [9], при этом разрушение происходит за счет раскалывания.

Разрушение хрупких пород ударом и сжатием требуют различных энергозатрат, необходимых для разрушения материала, при этом разрушение сжатием требует почти полтора кратных затрат энергии, по сравнению с разрушением ударом. Однако, дробилки ударного действия имеют существенный недостаток, который выражается в том, что лишь 25-30% готового продукта получают с заданным фракционным диапазоном [10].

Известны конструкции одновалковых дробилок, у которых кусок подается в зазор между валком и сплошной неподвижной плитой. В процессе работы в разрушаемом материале генерируется сложное напряженное состояние, при котором на кусок дробимого материала действуют как сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений [11]. При действии в материале сложного напряженного состояния прочность оценивается через эквивалентное напряжение, предел прочности которого меньше, чем при действии только нормальных напряжений [12]. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление на 50-70% по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

Из проведенного анализа работы дробильных машин, различных по способу создания в разрушаемом куске хрупкого материала напряжений, следует, что оптимальным, с точки зрения энергоэффективности, является способ дробления, при котором измельчение исходного куска осуществляется путем генерации в перерабатываемом материале касательных напряжений, при действии которых возникает деформация сдвига. В этом случае предел прочности для данного материала принимает минимально возможное значение, в два раза меньшее, чем при действии только нормальных напряжений, возникающих при сжатии [13].

Объект исследования

Сотрудниками Сибирского государственного индустриального университета разработана конструкция одновалковой дробилки, работающей на сдвиг [14].

На рисунке 1 схематично изображена дробилка, работающая на сдвиг.

Дробилка состоит из корпуса 1, в котором установлен в радиальных подшипниках приводной валок 2. Валок приводятся во вращение электродвигателем (на рисунке 1 условно не показан) через муфту и клиноременную передачу, передающую вращение валку. Валок оснащен упорами 3, закрепленными на поверхностях валка, при этом рабочая поверхность упоров совпадает с радиальной линией валка. Высота упоров должна быть одинаковой и равна величине зазора между наружной поверхностью валка и нижней кромкой выходного отверстия точки, чтобы обеспечить генерацию в исходном разрушаемом куске сдвиговую деформацию.

В верхней части корпуса имеется точка 4 для подачи материала, размер выпускного отверстия которой соответствует размеру загружаемого куска, при этом ось точки совпадает с вертикальной осью валка. Нижняя кромка точки не должна касаться верхней части ребра, установленного на валке.

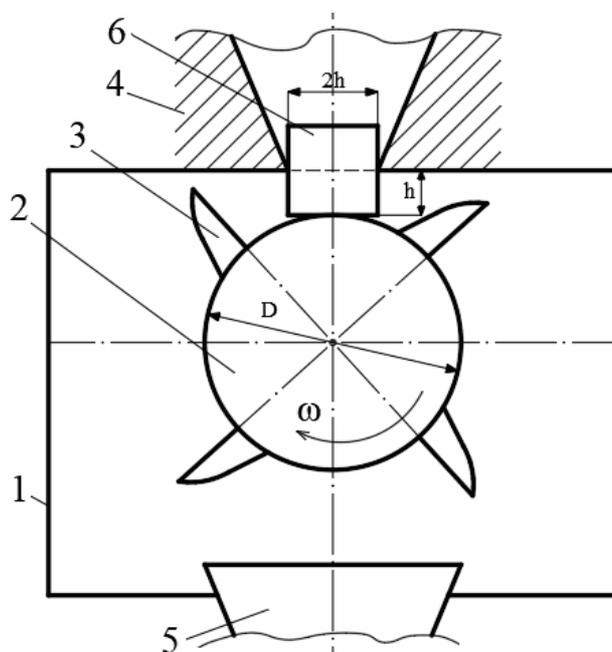


Рис. 1. Схема дробилки, работающей на сдвиг: 1 – корпус дробилки; 2 – приводной валок; 3 – ребро; 4 – течка; 5 – разгрузочная воронка; 6 – дробимый кусок

В нижней части корпуса расположена разгрузочная воронка 5.

Дробление происходит следующим образом. Куски дробимого материала 6 через течку один за другим подаются в зону дробления, образованную внешней поверхностью валка, рабочей поверхностью упора и нижней кромкой выходного отверстия течки.

При вращении валка упоры, расположенные на поверхностях валка, периодически образуют зазор между нижней кромкой выходного отверстия течки и внешней поверхностью валка, размер которого больше размера куска, в который проваливается кусок и опирается на кромку течки, находящейся со стороны, противоположной направлению вращения валка. При дальнейшем вращении валка кусок захватывается упором и зажимается между рабочей поверхностью упора и кромкой течки, при этом за счет возникновения в нем касательных напряжений развивается деформация сдвига и кусок разрушается. В результате разрушения исходного куска образуется два фрагмента.

Один из полученных фрагментов, который находится под упором,двигающимся в сторону вращения валка, проваливается в разгрузочную воронку. Другой фрагмент падает вниз в карман, образованный поверхностями валка и следующего упора, а затем перемещается, опираясь на рабочую поверхность следующего упора, в сторону разгрузочной воронки.

В зависимости от заданного гранулометрического состава исходного продукта и требуемого размера фракции конечного, устанавливается необходимый зазор между валком, на котором крепятся сменные упоры соответствующей высоты, и нижней кромкой выходного отверстия течки, а также меняется течка соответствующего размера.

Технологические машины характеризуются своими параметрами, которые определяют функциональное назначение машины, то есть её целевое назначение, а также режим работы. При проектировании новой оригинальной конструкции машины, в данном случае одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, необходимо разработать соответствующие методы расчета параметров, непосредственно влияющих на ее энергоэффективность.

Для разрушения хрупкого тела при внешнем воздействии, в нем необходимо накопить некоторый запас кинетической энергии.

Метод расчета числа оборотов валка основан на законе сохранения энергии [15].

Исходным положением является условие, что для диспергирования куска в дробилке, работающей на сдвиг, в нем необходимо создать касательные напряжения, превышающие предел прочности:

$$\tau_B = \frac{2 \cdot W}{A \cdot \delta}, \quad (1)$$

где W – работа внешних сил при чистом сдвиге; A – площадь сдвига; δ – абсолютный сдвиг.

В пределах упругой деформации до разрушения хрупкого материала вся работа, затрачиваемая на создание касательных напряжений, практически полностью преобразуется в потенциальную энергию деформации, тогда:

$$W = \Pi = \frac{\tau_B \cdot A \cdot \delta}{2}. \quad (2)$$

где Π – потенциальная энергия деформации при чистом сдвиге.

По закону Гука при чистом сдвиге касательные напряжения прямопропорциональны относительной деформации:

$$\tau_B = G \cdot \gamma, \quad (3)$$

где G – модуль упругости второго рода; $\gamma = \frac{\delta}{h}$ – угол сдвига, определяющий относительную деформацию при сдвиге; δ – абсолютная деформация при сдвиге; h – расстояние между опорной поверхностью и гранью сдвига.

Тогда

$$\delta = \frac{\tau_B \cdot h}{G}. \quad (4)$$

После подстановки выражения (4) в уравнение (2) значение потенциальной энергии определяется соотношением:

$$\Pi = \frac{\tau_B^2 \cdot A \cdot h}{2 \cdot G}. \quad (5)$$

Для разрушения куска хрупкого материала упору, расположенному на вращающемся валке, имеющим форму полого цилиндра, следует придать кинетическую энергию, равную потенциальной энергии, необходимой для разрушения, то есть:

$$T = \frac{J_x \cdot \omega^2}{2}, \quad (6)$$

где T – кинетическая энергия вращающегося полого цилиндра; J_x – момент инерции полого однородного цилиндра (валка) относительно оси его вращения x ; ω – угловая скорость вращения валка.

В свою очередь момент инерции полого однородного цилиндра (валка) относительно оси его вращения x определяется из соотношения:

$$J_x = \frac{m \cdot D^2}{4}, \quad (7)$$

где m – масса валка; D – диаметр валка.

Следовательно:

$$T = \frac{m \cdot D^2 \cdot \omega^2}{8}, \quad (8)$$

С учетом закона сохранения энергии, переход кинетической энергии в потенциальную во время удара упора об обрабатываемый кусок выглядит следующим образом:

$$T = \frac{m \cdot D^2 \cdot \omega^2}{8} = \Pi = \frac{\tau_B^2 \cdot A \cdot h}{2 \cdot G}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что для создания запаса потенциальной энергии, необходимого для разрушения разрушаемого куска, валок должен вращаться с угловой скоростью:

$$\omega = \sqrt{\frac{\tau_B^2 \cdot A \cdot h \cdot 8}{2 \cdot G \cdot m \cdot D^2}} = 2 \cdot \frac{\tau_B}{D} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot h}{G \cdot m}}. \quad (10)$$

Анализ полученного уравнения (10) показал, что с увеличением диаметра валка и его массы угловая скорость вращения валка уменьшается, а увеличение предела прочности хрупкого материала при сдвиге и геометрических размеров дробимого куска (площади сдвига и расстояния между опорной поверхностью и гранью сдвига) приводит к увеличению угловой скорости. Модуль упругости второго рода для хрупких материалов величина инвариантная.

При дроблении куска хрупкого материала в одновалковой дробилке, работающей на сдвиг, у которого предел прочности $\tau_B = 8 \text{ МПа}$, модуль упругости второго рода $G = 10 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, кубической формы размером $40 \times 40 \text{ мм}$ (площадь сдвига $A = 1600 \text{ мм}^2$) на валковой дробилке с диаметром валка $D = 200 \text{ мм}$ и зазором между валком и нижней кромкой точки, определяющим расстояние между опорной поверхностью и гранью сдвига $h = 20 \text{ мм}$, условию разрушения удовлетворяет угловая скорость вращения валка $\omega = 4,56 \text{ с}^{-1}$, что соответствует числу оборотов $n = 43,3 \text{ об/мин}$ и больше.

Выводы. Анализ работы дробильных машин показал, что разрушение сжатием является самый энергоемкий из известных способов дробления. Ударные (роторные и молотковые) дробилки предназначены для ударного дробления различных хрупких материалов, при этом разрушение происходит за счет раскалывания. Разрушение сжатием требует почти полутора кратных затрат энергии, по сравнению с разрушением ударом, однако, дробилки ударного действия имеют существенный недостаток, который выражается в том, что лишь 25-30% готового продукта получают с заданным фракционным диапазоном. Разработана конструкция энергосберегающей дробилки, работающей на сдвиг, при работе которой хрупкий материал разрушается при создании в разрушаемом куске только касательных напряжений, действующих при возникновении сдвиговых деформаций. Приведен метод расчета числа оборотов валка, при котором накапливается кинетическая энергия, соответствующая запасу потенциальной энергии, необходимой для разрушения куска хрупкого материала.

Список литературы

1. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. – Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330p.
2. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
3. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
4. Копосов П.В., Жуков И.А., Голиков Н.С. Щековые дробилки с криволинейным продольным профилем щек: классификация, тенденции развития и перспективы применения // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 135-145.
5. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers. Minerals Engineering. 2017, vol. 103-104, pp. 60-66. doi.org/10.1016/j.mineng. 2016.08.009.
6. Atta K.T., Euz'ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model // IFAC-PapersOnLine. 2019, vol. 52, no. 14, pp. 1-6. doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154.
7. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Сравнительный анализ энергозатрат дробилок, работающих на сжатие // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – №4. – С. 56-57.
8. Legendre D. Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor. – Åbo Akademi University: Turku, Finland, 2019. – 78 p.
9. Фишман М.А. Дробилки ударного действия. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 189 с.
10. Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm // Journal of China University of Mining and Technology. 2008, vol. 18, iss. 2, pp. 316-320.
11. Patent 105682804 US. Jaw-crushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders. – Publ. 15.06.2016.
12. Goulet J. Resistance des materiaux. – Bordas, Paris, 1976. – 192 p.
13. Степин П.А. Соппротивление материалов: учебник. – СПб.: Лань, 2014. – 320 с.
14. Патент №2806595 РФ. Способ дробления кусковых материалов в валковой дробилке / А.Г. Никитин, Н.М. Курочкиню – Заявка №2023103566 от 15.02.2023; опубли. 01.11.2023, Бюл. № 31.
15. Meriam J.L., Kraige L.G. Engineering Mechanics. – Hoboken, 111 River Street, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 550 p.

References

1. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. – Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.

2. Tselikov A.I. Machines and aggregates of metallurgical plants. Vol. 1 – M.: Mechanical Engineering, 1987. – 440 p.
3. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, features of operation. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – 320 p.
4. Kuposov P.V., Zhukov I.A., Golikov N.S. Jaw crushers with curved longitudinal profile of cheeks: classification, development trends and application prospects // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 24, pp. 135-145. doi.org/10.26160/2658-3305-2024-24-135-145.
5. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers. Minerals Engineering. 2017, vol. 103-104, pp. 60-66. doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009.
6. Atta K.T., Euz'ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model // IFAC-PapersOnLine. 2019, vol. 52, no. 14, pp. 1-6. doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154.
7. Nikitin A.G., Sakharov D.F. Comparative analysis of energy consumption of crushers working on compression // News of universities. Ferrous metallurgy. 2011, no. 4, pp. 56-57.
8. Legendre D. Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor. – Åbo Akademi University: Turku, Finland, 2019. – 78 p.
9. Fishman M.A. Impact crushers. – M.: Gosgortehizdat, 1960. – 189 p.
10. Zhao L.L., Zang F., Wang Z.B. Multi-object optimization design for differential and grading toothed roll crusher using a genetic algorithm // Journal of China University of Mining and Technology. 2008, vol. 18, iss. 2, pp. 316-320.
11. Patent 105682804 US. Jaw-crushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders. – Publ. 15.06.2016.
12. Goulet J. Resistance des materiaux. – Bordas, Paris, 1976. – 192 p.
13. Stepin P.A. Resistance of materials: textbook. – SPb.: Lan, 2014. – 320 p.
14. Patent No. 2806595 RU. Method of crushing lump materials in a roller crusher / A.G. Nikitin, N.M. Kurochkin. – Appl. No. 2023103566 from 15.02.2023; publ. 01.11.2023, Bul. No. 31.
15. Meriam J.L., Kraige L.G. Engineering Mechanics. – Hoboken, 111 River Street, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 550 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Никитин Александр Григорьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики и машиностроения	Nikitin Aleksandr Grigorievich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of mechanics and mechanical engineering
Курочкин Никита Максимович – аспирант nikitin1601@yandex.ru	Kurochkin Nikita Maksimovich – postgraduate student

Получена 08.10.2024