

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАЛКОВЫХ ДРОБИЛОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПРОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

¹*Tumov A.A.*

¹ *Национальный технический университет «Днепровская политехника»*

МОДЕРНІЗАЦІЯ ВАЛКОВИХ ДРОБАРІОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РУЙНУВАННЯ МІЦНИХ ГІРНИЧИХ ПОРІД

¹*Tumov O.O.*

¹ *Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

MODERNIZATION OF ROLL CRUSHER TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF HARD MINING ROCKS DESTRUCTION

¹*Tytov O.O.*

¹*National Technical University «Dnipro Polytechnic»*

Аннотация. Проанализированы существующие конструкции валковых дробилок для переработки горной массы, имеющих гладкие, рифленые, зубчатые валки, а также валки с периодическим прямоугольным профилем. Показано, что повышение эффективности разрушения прочных кусков путем замены сжимающих усилий на более эффективные виды нагружения может быть достигнуто с применением таких профилей рабочей поверхности, которые не подвергаются существенному износу. Это достигается отходом от цилиндрической поверхности валков к набору чередующихся конических участков, позволяющих достигнуть излома плоского куска материала, однако, при этом валки не имеют таких явно выраженных выступающих частей, как зубья, которые подвергаются усиленному износу. В работе проанализирован периодический волнистый профиль валков собственной разработки, позволяющий частично заменить разрушение кусков сжатием на разрушение от сдвиговых и изгибных нагрузок, приводящих к снижению энергопотребления при дезинтеграции, а также к уменьшению переизмельчения материала. Дана оценка эффективности предложенной конструкции по сравнению с аналогами. Установлено, что угол захвата кусков материала между выступом и впадиной соседних валков зависит от коэффициента трения материала о бандаж и угла конусности профиля валков. Угол захвата увеличивается с ростом обеих величин. Проведено сравнение усилий при дроблении лещадного куска гладкими и волновыми валками. Рассмотрены случаи разрушения куска в форме прямоугольного параллелепипеда сжимающими и изгибными нагрузками. Проведено сравнение усилий дробления при одноосном сжатии куска вдоль самой короткой стороны, что соответствует условиям нагружения между гладкими валками, со случаем изгиба при зажатии крупного куска материала симметрично по трем точкам вдоль самой длинной стороны, характерного для использования волнового профиля. Показано, что выигрыш в силе для периодического волнового профиля валков может достигать нескольких десятков раз по сравнению с гладкими валками. Результаты работы могут быть использованы для повышения эффективности переработки мелкозернистых твердых материалов с использованием валковых дробилок.

Ключевые слова: валковая дробилка, горная порода, профиль валка, энергоэффективность, способ разрушения.

Введение. Валковые дробилки являются традиционным типом оборудования для среднего и мелкого дробления горных пород [1]. Их основными преимуществами являются простота конструкции приводного механизма и рабочего органа, а также надежность в эксплуатации.

Для дробления прочных пород применяют дробилки с гладкими валками (рис. 1, а). Отсутствие выступающих частей на рабочей поверхности гарантирует минимальный износ, но существуют проблемы с втягиванием крупных кусков. Так, размер куска должен быть в 20 и более раз меньшим, чем диаметр валка, поэтому область применения ограничена мелким дроблением.

Разрушение кусков происходит в результате раздавливания, которое является наиболее энергозатратным способом разрушения.

Для увеличения размера вытягиваемых кусков применяют рифленые (рис. 1, б) и зубчатые валки (рис. 1, в), для которых размер вытягиваемых кусков составляет не более, соответственно, $1/10$ и $1/2$ от диаметра валка [1], поэтому зубчато-валковые дробилки могут применяться при среднем и, частично, крупном дроблении. Острые вершины и кромки зубьев создают высокую локальную концентрацию контактных напряжений, что способствует разрушению куска раскалыванием с уменьшенной энергоемкостью и выходом мелочи.

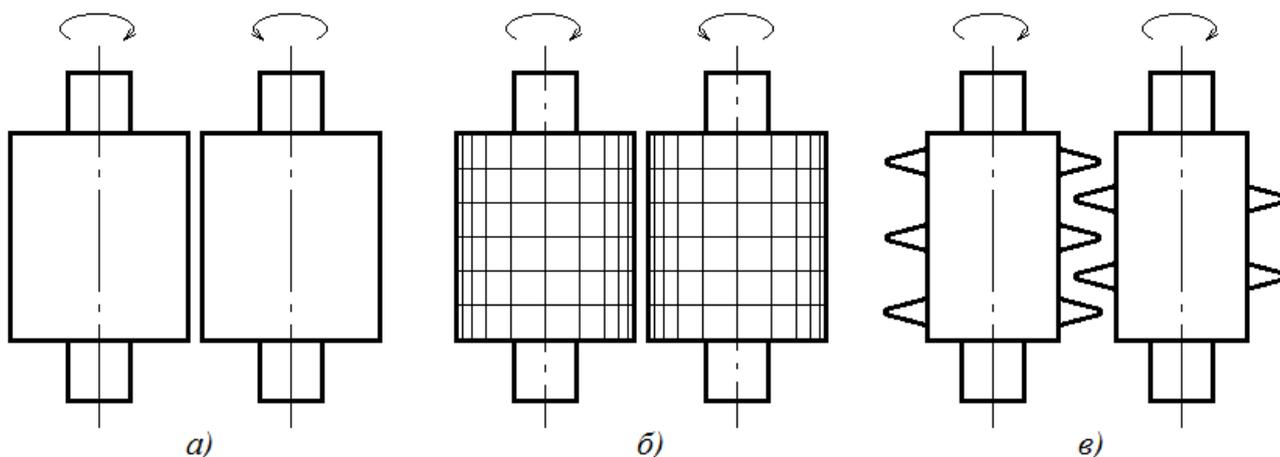


Рисунок 1 – Схемы рабочих органов традиционных дробилок с валками:
а – гладкими; б – рифлеными; в – зубчатыми

Однако, при переработке прочных кусков, резко возрастает износ выступающих частей валка и возможны даже поломки зубьев, что ограничивает область применения некрепкими породами.

Известно, что одним из вариантов снижения энергопотребления при дезинтеграции горной массы является применение сдвиговых и изгибных нагрузок вместо сжимающих для разрушения кусков [2]. Для достижения такого эффекта в валковых дробилках требуется, с одной стороны, отход от цилиндрического профиля бандажей валков, а, с другой стороны, избегание чрезмерно выступающих элементов профиля валков. Таким компромиссным решением является применение периодического волнового профиля валка [3].

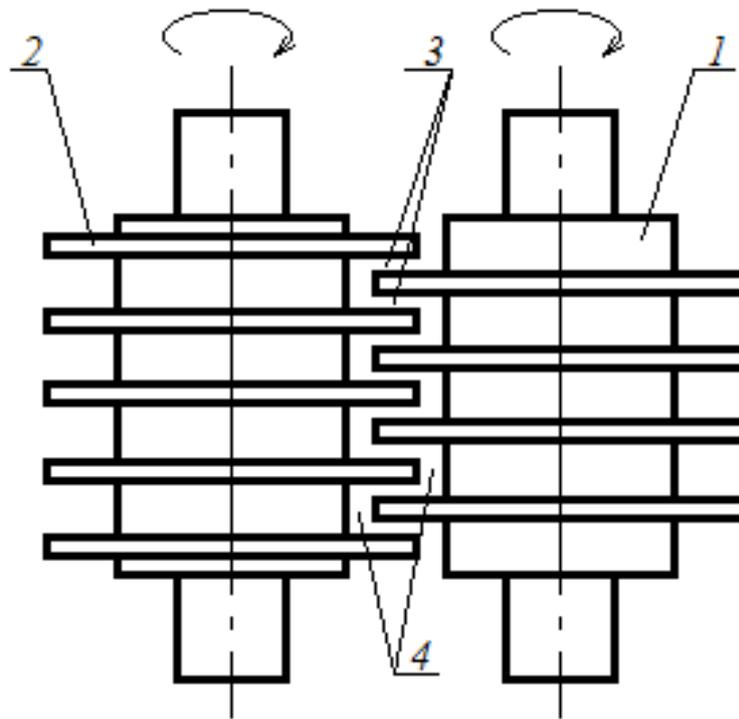
Цель работы. Оценить повышение эффективности применения валковых дробилок для переработки прочных горных пород за счет использования периодического наклонного волнового профиля валков.

Идея работы. Провести сравнение эффективности разрушения кусков изометрической и плоской формы в валковых дробилках традиционной и модернизированной конструкции.

Конструкции валковых дробилок с периодическим профилем валков.

Известна конструкция дробилки, у которой бандажи валков 1 имеют периодический профиль с прямоугольными выступами 2 (рис. 2), именуемыми режущими элементами и расположенными в шахматном порядке, при этом зазоры между боковыми поверхностями соседних режущих элементов 3 и

радиальные зазоры 4 имеют разные величины [4]. Одним преимуществом данной дробилки является возможность приложения изгибных нагрузок к крупным кускам при их зажатии хотя бы тремя режущими элементами на соседних валках. Второе преимущество заключается в классификации материала за счет увеличенных радиальных зазоров 4, в которые проваливаются мелкие частицы. Недостатками данной конструкции, с нашей точки зрения, являются небольшая степень дробления и невозможность эффективного разрушения мелких частиц. Кроме того, разница зазоров 3 и 4 приводит к большему разбросу конечного продукта по крупности и перерасходу энергии.



1 - бандаж; 2 - режущий элемент; 3 - зазор боковой; 4 - зазор радиальный

Рисунок 2 – Схема валков с периодическим прямоугольным профилем

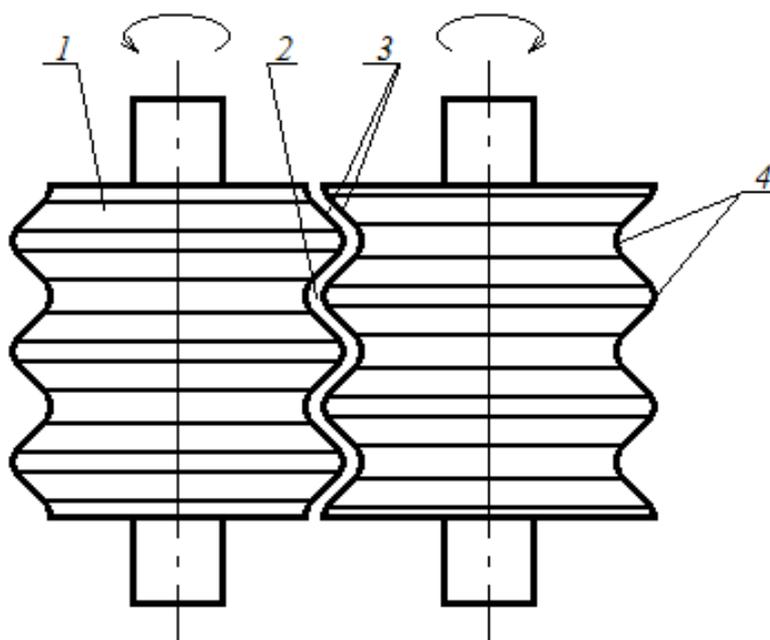
Модернизированный при участии автора вариант валковой дробилки (рис. 3) имеет периодический волновой профиль бандажей валков 1 с постоянным зазором в плоскости осей валков 2 [3]. Профили соседних валков имеют конические участки 3, на которых образующие конусов параллельны друг другу, а также закругления 4 между коническими участками, которые выполнены с постоянным зазором в плоскости осей валков.

Разрушение крупных кусков производится за счет изгиба при их зажатии силами трения между выступом и впадиной соседних профилей. Кроме того, в отличие от валков с периодическим прямоугольным профилем, на конических участках осуществляется комбинированное воздействие на мелкие куски силами раздавливания и сдвига, что приводит к снижению энергопотребления. Наличие постоянного зазора между соседними валками приводит к уменьшению разброса по крупности готового продукта.

Сравнительная оценка эффективности валков с периодическим волновым профилем.

Таким образом, основные преимущества модернизированного профиля валков следующие:

- наличие постоянного зазора между валками в плоскости осей валков, что снижает разброс продукта по крупности;
- наличие выступов, впадин и скруглений профиля, способствующим разрушению крупных кусков с помощью изгибных нагрузок;
- наличие конических участков, на которых появляются значительные сдвиговые составляющие усилий для мелких кусков;
- отсутствие выступающих острых углов и кромок на поверхности валков, что снижает их износ.



1 - бандаж; 2 - постоянный зазор; 3 - конические участки; 4 - скругления

Рисунок 3 – Схема валков с периодическим волновым профилем

Однако, такая конструкция валков приводит к изменению угла захвата, величина которого является важной для незубчатых дробилок, поскольку влияет на максимальный размер втягиваемого в дробилку куска.

Известна формула для угла захвата гладких валков [1]:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg(f), \text{ рад}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения куска о валок.

На рисунке 4 показана схема втягивания куска между валками с периодическим волновым профилем, когда он будет контактировать не менее чем с двумя конусами на одном валке и одним выступом на другом валке. Для данного случая получено выражение, из которого определяется угол захвата:

$$f = \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha) + \frac{1}{\cos(\beta)}}, \quad (2)$$

где β – угол наклона образующей конических участков бандажа к оси вала.

Анализ выражения показывает, что с ростом угла β увеличивается угол захвата куска α при симметричном зажатии во впадине профиля по трем точкам.

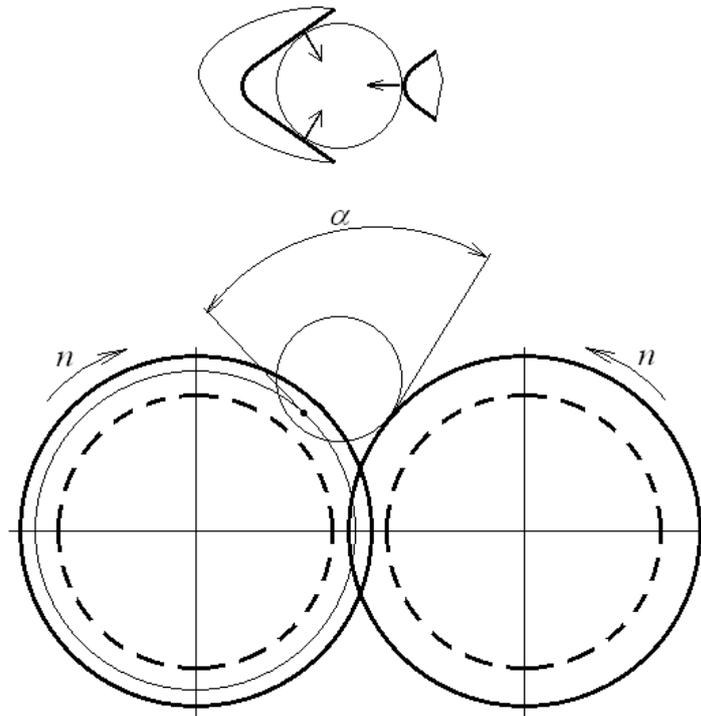


Рисунок 4 – Схема симметричного захвата куска во впадине профиля

Отдельного внимания заслуживает энергоемкость разрушения кусков материала в модернизированной дробилке.

Как было сказано, выше, сжатие материала в данной конструкции заменено на такие высокоэффективные виды нагружения, как сдвиг и изгиб. Это должно поспособствовать как снижению усилий дробления, так и уменьшению выхода лещадных частиц.

Рассмотрим разрушение кусков в форме прямоугольного параллелепипеда толщиной a , шириной b и длиной c . Базовым случаем нагружения будем считать одноосное сжатие куска материала вдоль самой короткой стороны a , при этом выражение для разрушающей силы запишем в виде:

$$P_0 = \frac{b \cdot c \cdot R_c}{\xi}, \text{ Н}, \quad (3)$$

где R_c - предел прочности на одноосное сжатие, Па; ξ - некоторый коэффициент концентрации напряжений, обусловленный отличием реальной формы куска от рассматриваемой.

Рассмотрим зажатие крупного куска материала симметрично по трем точкам вдоль длинной стороны (рис. 5), так как это наиболее вероятное положение такого куска при входе в дробилку. Растягивающие напряжения в центральной нижней точке A приближенно можно определить по формуле:

$$\sigma_p = \frac{M_u}{W}, \text{ Н}, \quad (4)$$

где изгибающий момент определяется из выражения

$$M_u = \frac{P \cdot c}{2}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (5)$$

а также, по известным формулам сопротивления материалов, момент сопротивления куска будет равен

$$W = \frac{b \cdot a^2}{6}, \text{ м}^3. \quad (6)$$

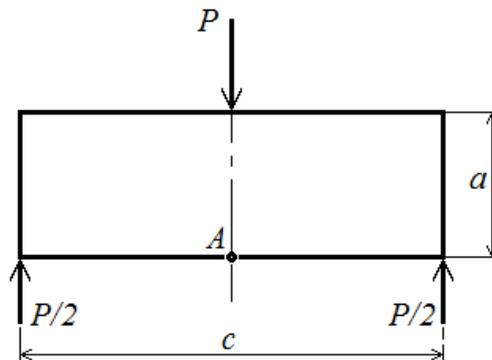


Рисунок 5 – Схема изгиба куска во впадине профиля

Таким образом, имеем:

$$\sigma_p = \frac{3 \cdot P \cdot c}{b \cdot a^2} = R_p, \text{ Па}, \quad (7)$$

где R_c - предел прочности на одноосное растяжение, Па.

Предельная разрушающая сила:

$$P = \frac{b \cdot a^2 \cdot R_p}{3 \cdot c}, \text{ Н}. \quad (8)$$

Выигрыш в силе при разрушении крупных кусков для дробилок с волновым профилем по сравнению со случаем гладких валков найдем таким образом:

$$\lambda = \frac{P_0}{P} = \frac{3}{\xi} \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^2 \cdot \frac{R_c}{R_p}. \quad (9)$$

Оценим полученные величины. Для лещадных частиц согласно [5] имеем $c/a \geq 3$. В соответствии с теорией Гриффитса [6], для хрупких материалов справедливо соотношение $R_c/R_p \cong 8$. Таким образом, даже если принять $\xi = 10$, минимальный выигрыш в силе при разрушении крупных лещадных частиц волновыми валками составит почти 22 раза.

Выводы:

1. Модернизирована конструкция валковой дробилки путем применения валков с периодическим волновым профилем.
2. Достигнуто эффективное разрушение крупных кусков путем частичной замены сжимающих усилий на изгибные и сдвиговые, а для мелких кусков – на усилия сдвига.
3. Показано увеличение угла захвата при зажатии куска во впадине профиля.
4. Определено, что выигрыш в силе при дроблении лещадных частиц в дробилках с волновыми валками по сравнению с гладкими валками может составлять несколько десятков раз.
5. Дробилки с периодическим волновым профилем валков повысят эффективность переработки мелкозернистых горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 415 с.
2. Ревнивцев В.И., Денисов Г.А., Зарогатский Л.П., Туркин В.Я. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов. М.: Недра, 1992. 430 с.
3. Пат. на корисну модель № 132083 UA, МПК В02С 4/02 (2006.01). Валкова дробарка / В.П. Надутий, О.О. Титов; власник НТУ «Дніпровська політехніка». – и 2018 09166; заявл. 06.09.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
4. Пат. № 2288036 RU, МПК В02С 4/12 (2006.01). Валковая дробилка / Б.А. Байбородин, К.В. Федотов, П.К. Федотов; патентообладатель ГОУ ИрГТУ. – 2005120963/03; заявл. 04.07.2005; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33. – 5 с.: ил.
5. ДСТУ Б В.2.7-71-98 (ГОСТ 8269.0-97). Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Увед. 10.12.1997. К: Державний комітет будівництва, архітектури і житлової політики України, 1999. 109 с.
6. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Недра, 1972. 307 с.

REFERENCES

1. Andreev S.E., Petrov V.A. and Zverevich V.V. (1980), *Droblenie, izmelchenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Crushing, growing shallow and screening of minerals], Nedra, Moscow, SU.
2. Revnitssev V.I., Denisov G.A., Za1rogatskiy L.P., and Turkin V.Y. (1992). *Vibratsionnaya desintegratsiya tverdykh materialov* [Vibration desintegration of hard materials], Nedra, Moscow, RU.
3. Nadutiy V.P. and Tytov O.O, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (2019), *Valkova drobarka* [Roll crusher], Dnipro, UA, Pat. № 132083.
4. Bajborodin B.A., Fedotov K.V. and Fedotov P.K., GOU IrGTU (2006), *Валковая дробилка* [Roll crusher, Irkutsk, RU] Pat. № 2288036.
5. DSTU B V.2.7-71-98 (HOST 8269.0-97) (1999), *Shchebin i hravii iz shchilnykh hirs'kykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlia budivelnykh robıt*, Uved. 10.12.1997, Derzhavnyi komitet budivnytstva, arkhitektury i zhytlovoi polityky Ukrainy, Kyiv.
6. Khodakov G.S. (1972), *Fizika Izmelcheniia*, Nedra, Moscow, SU.

Про автора

Титов Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри гірничих машин та інжинірингу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» МОН України (НТУ «ДП» МОН України), Дніпро, Україна, alextitovalex77@gmail.com.

About the author

Tytov Oleksandr Oleksandrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in Department of Mining Machines and Engineering, National Technical University «Dnipro Polytechnic», Dnipro, Ukraine, alextitovalex77@gmail.com.

Анотація. Проаналізовано існуючі конструкції валкових дробарок для переробки гірничої маси, що мають гладкі, рифлені, зубчасті валки, а також валки з періодичним прямокутним профілем. Показано, що підвищення ефективності руйнування міцних шматків через заміну стискальних зусиль на більш ефективні види навантаження може бути досягнуто за допомогою використання таких профілів робочої поверхні, які не піддаються суттєвому зносу. Це досягається відходом від циліндричної поверхні валків до сукупності почергових конічних ділянок, які дозволяють досягнути зламу плоского шматка матеріалу, проте, при цьому валки не мають таких явно виражених виступаючих частин, як зуби, що піддаються посиленому зносу. В роботі проаналізовано періодичний хвильовий профіль валків власної розробки, що дозволяє частково замінити руйнування шматків стиском на руйнування від навантажень зсуву та вигину, яке призводить до зменшення енергоспоживання під час дезінтеграції, а також до зниження переподрібнення матеріалу. Дана оцінка ефективності запропонованої конструкції порівняно з аналогами. Встановлено, що кут захоплення шматків матеріалу між виступом і впадиною сусідніх валків залежить від коефіцієнта тертя матеріалу по бандажу та кута конусності профілю валків. Кут захоплення зростає разом із збільшенням обох величин. Проведено порівняння зусиль під час дроблення лежачого шматка гладкими та хвильовими валками. Розглянуто випадки руйнування шматка у формі прямокутного паралелепіпеда стискальними та вигинистими навантаженнями. Проведено порівняння зусиль дроблення при одноісному стисненні куска вздовж найкоротшої сторони, що відповідає умовам навантаження між гладкими валками, з випадком вигину при затисканні крупного куска матеріалу симетрично по трьох точках вздовж найдовшої сторони, характерного для використання хвильового профілю. Показано, що вигравш у силі для періодичного хвильового профілю валків може досягати декількох десятків разів порівняно з гладкими валками. Результати роботи можуть бути використані для підвищення ефективності переробки дрібнозернистих матеріалів з використанням валкових дробарок.

Ключові слова: валкова дробарка, гірнича порода, профіль валка, енергоефективність, спосіб руйнування.

Abstract. The existing design models of roll crushers for mining rocks, having smooth, knurled and toothed rolls and, also, the rolls with periodic rectangular profile, are analyzed. It is shown, that the efficiency enhancing of hard mining rocks destruction can be reached by usage of such profiles of working surface, that don't undergo to sufficient wear. It is reached by withdrawal from cylindrical surface of rolls to the set of alternating cone sites, allowing to reach the break of material lump. But, at the same time, the rolls don't have such obviously expressed protuberances like teeth being undergone by enhanced wear. The rolls periodic wave profile of own development, allowing to replace partly the lumps destruction by compression with the destruction caused by shift and flexural loadings, is analyzed in the work. This leads to the decrease of energy consumption during disintegration and, also, to the less material excessive grinding. The estimation of the proposed design efficiency compared to the analogues is made. It is set, that the grab angle of material lumps between the ledge and the hollow of neighboring rolls depends on the coefficient of material friction with bandage and the taper angle of roll profile. The grab angle increases together with rise of both values. The comparison of forces during the flat lump crushing by smooth and wave rolls is fulfilled. The cases of the cuboid lump destruction by the compression and the flexural loadings are considered. The comparison of crushing forces for the case of monoaxial compression of lump along its shortest side, corresponding to the conditions of loading between smooth rolls, with the case of bend during three-point clamping of material lump along the longest side, being typical for the wave profile, is fulfilled. It is showed, that the mechanical force advantage for the rolls with periodic wave profile may be several tens of times more compared to the smooth rolls. The results can be used to enhance the efficiency of fine-grained hard materials treatment with usage of roll crushers.

Keywords: roll crusher, mining rock, roll profile, energy efficiency, way of destruction.

Стаття надійшла до редакції 10.09. 2018

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук В.П. Надутим