

УДК 621.926.3

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ

*Сахаров Д.Ф., к.т.н., старший научный сотрудник организационно-научного
и редакционно-издательского отделения (sacharov_dima86@mail.ru)*

*Витушкин А.В., к.т.н., преподаватель кафедры боевой, тактико-специальной
и физической подготовки (mentisnoncorpus@gmail.com)*

Кузбасский институт ФСИН России
(654066, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, пр. Октябрьский, 49)

Аннотация. Литература, посвященная проектированию конусных дробильных машин и исследованию процесса дробления в них, в основном базируется на эмпирических наблюдениях, в результате чего общепринятым считается факт о том, что дробимый материал разрушается под действием исключительно сжимающих сил. В свою очередь, формируется теоретическая база, на основе которой создаются дробильные агрегаты. В результате наличия общих сведений существующее на сегодняшний день многообразие конструкций конусных дробильных машин характеризуется общностью их принципов работы. Большинство теоретических работ, посвященных конусным дробильным машинам, ориентированы на такие их характеристики, как производительность, степень дробления, увеличение процента годной фракции в готовом продукте либо на эксплуатационные параметры отдельных элементов конструкции, таких как стойкость футеровочной брони, повышение срока службы опорных и приводных узлов и т.п. Для повышения указанных характеристик разрабатываются конструкции камер дробления, имеющие сложную форму футеровочной брони, а конструкция рабочего органа совмещает в себе элементы рабочих органов других дробильных машин (валковых, щековых). Однако эффективность кинематики движения рабочего органа рассматривается лишь с точки зрения создания в дробимом материале сжимающих сил и минимизации его скольжения относительно дробимого материала. Наибольшее количество энергии, подводимое к любой дробильной машине, расходуется на создание нагрузки, разрушающей дробящийся материал. Авторы настоящей работы считают, что при определенных обстоятельствах в конусных дробильных машинах могут быть созданы такие условия их работы, при которых значительно возрастет энергоэффективность процесса разрушения материалов, подвергающихся дроблению. Одним из таких условий является создание в дробимом материале сложного напряженного состояния. Рассмотрены некоторые характерные конструкции конусных дробильных машин, область применения такого рода дробильных машин. Описан механизм создания в дробимом материале сложного напряженного состояния, способствующего снижению энергетических затрат на процесс дробления. Даны рекомендации по воссозданию условий работы дробильной машины, создающих в дробимом материале сложное напряженное состояние.

Ключевые слова: конусная дробилка, силовой анализ, дробление, энергоэффективность, сложное напряженное состояние, касательные напряжения, крутящий момент, конструкция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-980-986

ВВЕДЕНИЕ

Производство готовой продукции в результате дробления минералов и руд имеет решающее значение для непрерывного развития современного общества. С ростом населения в мире, растущей урбанизацией и повышением уровня жизни необходимо повышать производительность и эффективность существующих дробилок, чтобы удовлетворить растущий спрос на эти продукты [1].

Среди помольно-дробильных машин большую группу представляют конусные дробилки, характеризующиеся непрерывностью цикла измельчения и способностью к переработке высокопрочных и абразивных материалов, таких как гранит, доменный шлак, щебень, известняк высокой абразивности и т.д. Конусные дробилки нашли широкое применение в промышленности строительных материалов как одного из основного техноло-

гического вида оборудования, применяемого на всех стадиях переработки сырья и материалов [2 – 9].

Процесс дробления был и есть наиболее затратный с точки зрения потребления энергии. Лучшее понимание различных факторов, влияющих на процесс дробления, необходимо для снижения эксплуатационных затрат на измельчение материала [10]. Повышенные энергозатраты при дроблении горных пород конусными дробилками обуславливаются, с одной стороны, большим сопротивлением пород разрушающим сжимающим нагрузкам и, с другой, – резким возрастанием усилий дробления в режиме прессования горной массы [11].

Конусные дробилки обычно используются для ступеней вторичного и третичного измельчения в горнодобывающей промышленности [12], однако существуют и конусные дробилки для крупного дробления, способные принимать куски крупной породы разме-

ром 400 – 1200 мм и шириной разгрузочной щели до 300 мм [13]. Небольшие современные шахты на первичном этапе дробления материала обеспечивают получение продукта размером 4 – 6 дюймов (100 – 150 мм), который затем направляют для дробления на вторичные и третичные конусные дробилки для уменьшения размера материала до требуемого размера готового продукта [14].

Процесс дробления характеризуется отношением размеров кусков исходного материала к размеру кусков готового продукта [13]. Для конусных дробилок это отношение составляет: от 3:1 до 10:1 – первичное дробление; от 6:1 до 8:1 – вторичное дробление; до 10:1 – третичное дробление [15]. В работах, посвященных их проектированию и изучению процесса дробления в них, преобладает мнение о том, что разрушение дробимого материала происходит за счет сжатия куса подвижным и неподвижным конусами. Движение материала при попадании в камеру дробления конусной дробилки описывается тремя различными механизмами: свободное падение, скольжение и сдавливание [16]. При этом известно, что вне зависимости от конструкции конусной дробильной машины она имеет такую особенность рабочего органа, как возможность вращаться. Т.е. подвижный конус в процессе дробления имеет возможность совершать вращательные движения относительно оси неподвижного конуса и своей собственной. Раздавливание материала происходит не сразу, а за счет кругового движения конуса [17].

Проведенные во ВНИИстройдормаше исследования показали, что технико-эксплуатационные характеристики конусных дробилок во многом зависят от траектории движения рабочего органа [18]. Траектория движения подвижного конуса во многом зависит от взаимного положения осей подвижного конуса и точки гирации относительно камеры дробления. Могут быть отмечены три характерные положения точки гирации относительно камеры дробления: вверху, внизу и когда оси дробилки и подвижного конуса параллельны [13].

На рис. 1 представлены основные схемы конусных дробилок в зависимости от их назначения (крупного, среднего и мелкого дробления), из которого видно, что у различных видов конусных дробилок различная геометрия камеры дробления.

По мнению группы исследователей геометрия камеры является одним из ключевых факторов, влияющих на работу конусной дробилки. Конструкция геометрии камеры должна учитывать качество продукции и эффективность дробления [19]. С повышением качества готовой продукции на выходе из дробилки повышается и ее производительность [20].

Повышение качества готового продукта и снижение нагрузки при дроблении материала может быть достигнуто за счет контроля износа рабочих поверхностей, а также оптимальных настроек дробилки. Использование нового поколения систем автоматического конт-

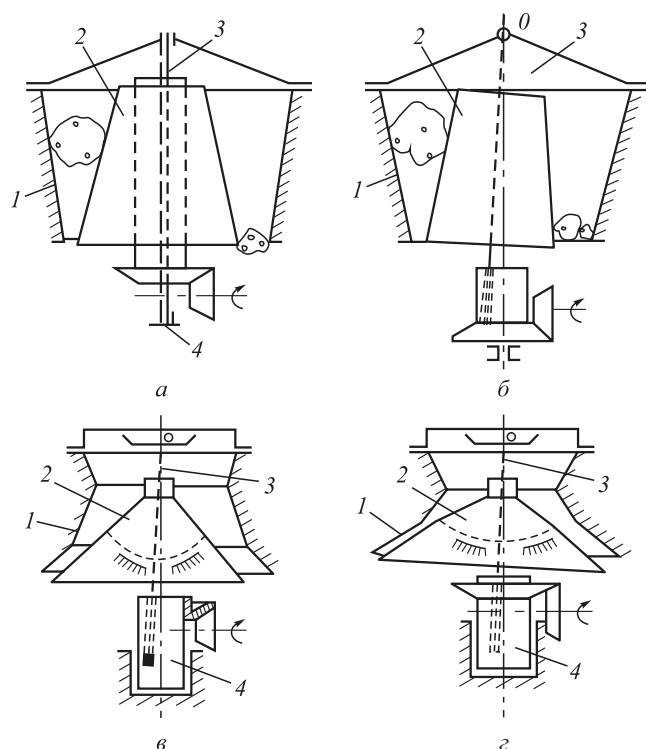


Рис. 1. Схемы основных конусных дробилок (а, б – крупного дробления; в – среднего дробления; г – мелкого дробления): 1 и 2 – неподвижный и подвижный конусы; 3 – ось; 4 – стакан

Fig. 1. Schemes of basic cone crushers (а, б – coarse crushing; в – medium crushing; г – fine crushing): 1 – stationary cone; 2 – movable cone; 3 – axis; 4 – cup

роля конусных дробилок позволит повысить их эффективность [21].

ДРОБЛЕНИЕ ЕДИНИЧНОГО КУСКА ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Для повышения эффективности конусных дробилок необходимо понимание условий, в которых находится кусок материала в камере дробления, т.е. определить, каким силовым воздействиям подвергается кусок, и какие напряжения в результате этого в нем возникают. Для лучшего понимания проведем силовой анализ на примере конусной дробилки крупного дробления (рис. 2). В работе [22] показано, что при описании процесса дробления куски неправильной формы целесообразно аппроксимировать на плоскости в форме квадрата для удобства математических выкладок. Для упрощения расчетов будем принимать, что в камере дробления будет находиться единственный кусок, т.е. дробление будет осуществляться конус – кусок – конус.

Дробление отдельного куса хрупкой породы в дробилках сжимающего двухстороннего воздействия происходит вне зависимости от нахождения в камере дробилки других кусков. Такие процессы принято называть аддитивными, применительно к дробилкам это положение доказано И.Б. Шлаином [23].

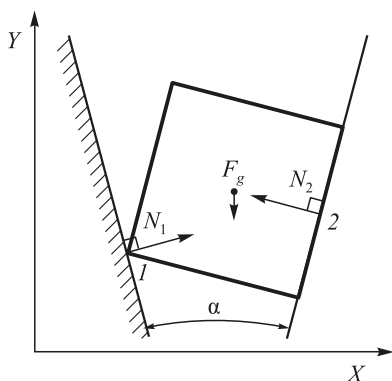


Рис. 2. Положение куска в камере дробления

Fig. 2. Position of the piece in crushing chamber

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Вне зависимости от конструкции конусной дробильной машины в вертикальном сечении камера дробления будет представлять собой усеченный конус. Дробимый материал, попадая в камеру дробления, опирается на подвижный и неподвижный конусы на том уровне, на котором расстояние между конусами соответствует размеру куска. На рис. 2 величина α (угол между неподвижным и подвижным конусом) представляет собой угол захвата.

При соприкосновении дробимого куска с дробильными элементами под действием силы F_g тяжести куска на него со стороны подвижного и неподвижного конусов действуют силы N_1 и N_2 , направленные перпендикулярно поверхностям дробящих элементов. Под действием системы сил (рис. 3) дробимый кусок находится в равновесном состоянии.

СТАДИИ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Рассмотрим процесс дробления. Разложим этот процесс на стадии в зависимости от положения подвижного конуса. Для этого разложим траекторию движения нижней точки конуса на квадранты (рис. 4): видно, что процесс сжатия куска в камере дробления начинается при переходе конуса из второго в третий квадрант. Наибольшее сжатие куска произойдет при завершении движения конуса в четвертом квадранте (когда точки на неподвижном и подвижном конусах сблизятся максимально).

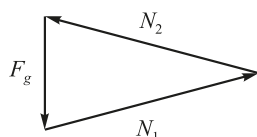


Рис. 3. План сил, действующих на кусок дробимого материала

Fig. 3. Scheme of forces acting on piece of crushing material

Сила нормального давления, возникающая при движении подвижного конуса, многократно превышает силу нормального давления, возникшую под действием силы тяжести. Поэтому последняя в дальнейшем не учитывается ввиду ее незначительности по сравнению с силами, возникающими в процессе дробления материала. Куски, полученные после разрушения, в случае, если их размер меньше разгрузочной щели дробилки, под действием силы тяжести удаляются из камеры дробления.

В процессе движения конуса дробилки под действием сжимающих сил (нормальные силы), которые стремятся вытолкнуть дробимый кусок, возникают силы $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$ трения куска соответственно о неподвижный и подвижный конусы, направленные в сторону, противоположную действию выталкивающей силы (рис. 5). Совокупность нормальных сил и сил трения, а также образуемый ими силовой многоугольник определяют условия захвата дробимого куска. Условия захвата определяются по методике, аналогичной представленной в работе [13], для конусных и щековых дробилок:

$$2\varphi \geq \alpha,$$

где φ – угол трения между дробильным элементом и куском.

Таким образом, захват куска будет происходить, если угол захвата равен или меньше двойного угла трения.

Следует отметить, что для дробилок среднего (мелкого) дробления условия захвата будут такими же, как

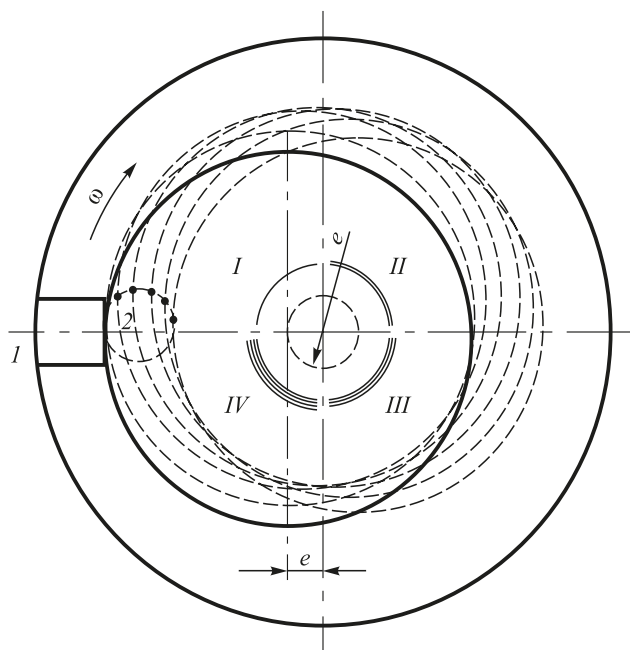


Рис. 4. Движение подвижного конуса и стадии процесса дробления: e – эксцентриситет; ω – угловая скорость вращения подвижного конуса относительно оси неподвижного; I – IV – квадранты

Fig. 4. Movement of movable cone and stages of crushing process: e – magnitude of eccentricity, ω – angular velocity of rotation of movable cone relative to axis of stationary cone; I – IV – quadrants

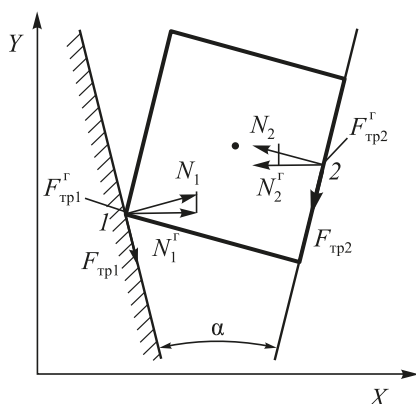


Рис. 5. Силы, действующие на кусок дробимого материала в конусной дробилке

Fig. 5. Forces acting on piece of crushed material in cone crusher

и для дробилок крупного дробления (рис. 6), поскольку проекция всех сил на ось, совпадающая с направлением равнодействующей R нормальных сил, для дробилок крупного и среднего (мелкого) дробления будет одинаковой.

СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Теперь рассмотрим горизонтальную плоскость. Для этого спроецируем действующие на кусок силы на горизонтальную плоскость (рис. 7).

При движении подвижного конуса между куском и дробильными элементами в горизонтальной плоскости будут возникать силы трения $F_{тр2}^{г.в}$ и $F_{тр1}^{г.в}$. Поскольку кусок дробимого материала опирается на неподвижный конус в двух точках (I' и I''), то результирующие силы в условной точке I могут быть получены алгебраическим сложением сил, действующих в точках I' и I'' :

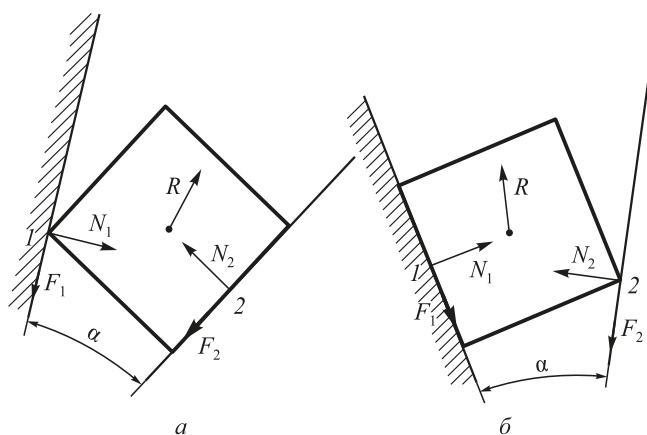


Рис. 6. Сравнительный анализ сил, действующих на кусок дробимого материала в конусной дробилке среднего (мелкого) (а) и крупного (б) дробления

Fig. 6. Comparative analysis of forces acting on a piece of crushing material in cone crusher of medium (fine) (a) and coarse crushing (b)

$$N_1^r = N_{1'}^r + N_{1''}^r;$$

$$F_{тр1}^r = F_{тр1'}^r + F_{тр1''}^r;$$

$$F_{тр1}^{г.в} = F_{тр1'}^{г.в} + F_{тр1''}^{г.в},$$

где N_1^r – результирующая сила от действия величин $N_{1'}^r$ и $N_{1''}^r$; $N_{1'}^r$ и $N_{1''}^r$ – силы нормального давления, возникающие в точках касания куска и неподвижного конуса (точки I' и I''); $F_{тр1}^r$ – результирующая сила от действия $F_{тр1'}^r$ и $F_{тр1''}^r$; $F_{тр1'}^r$ и $F_{тр1''}^r$ – горизонтальные составляющие сил трения, возникающих в точках касания куска и неподвижного конуса (точки I' и I'') и препятствующих выталкиванию куска из дробилки; $F_{тр1}^{г.в}$ – результирующая сила от действия сил трения $F_{тр1'}^{г.в}$ и $F_{тр1''}^{г.в}$; $F_{тр1'}^{г.в}$ и $F_{тр1''}^{г.в}$ – силы трения в горизонтальной плоскости, возникающие между неподвижным конусом и дробимым куском (точки I' и I'') в процессе движения подвижного конуса.

Как известно, подвижный конус дробилки имеет две степени свободы и при дроблении может совершать сложное движение, состоящее из собственного вращения ω_2 вокруг собственной оси и переносного вращения ω_1 оси подвижного конуса относительно оси дробилки. Вектор переносной угловой скорости подвижного конуса ω_1 равен вектору угловой скорости эксцентрика. Вектор угловой скорости ω_2 собственного вращения подвижного конуса зависит от соотношения силы трения в опорах подвижного конуса и сил трения, которые возникают в камере дробления на рабочей поверхности подвижного конуса от взаимодействия с дробимым материалом [13].

В случае, если подвижный конус имеет возможность свободного вращения вокруг своей оси, то из-за возникающих сил трения $F_{тр2}^{г.в}$ и $F_{тр1}^{г.в}$ подвижный конус будет вращаться в сторону, обратную переносному вращению

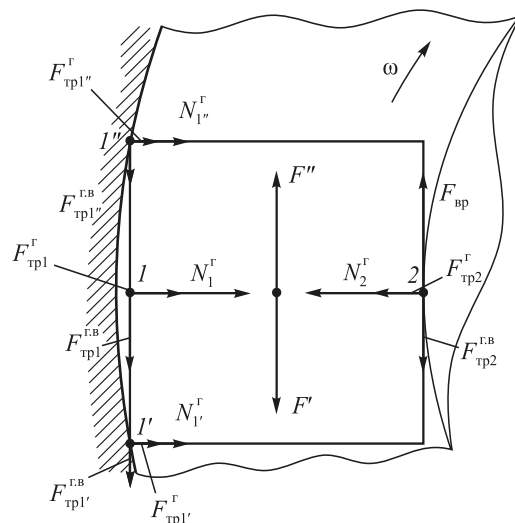


Рис. 7. Анализ сил, действующих на дробимый кусок в горизонтальной плоскости

Fig. 7. Analysis of forces acting on crushed piece in horizontal plane

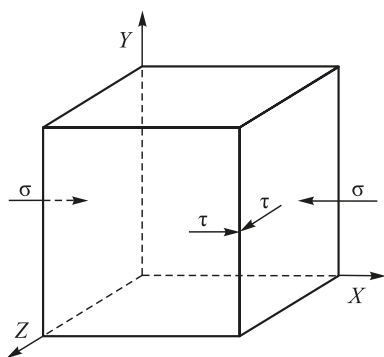


Рис. 8. Напряжения, действующие на точку, расположенную на дробимом куске

Fig. 8. Stresses acting on the point, located at crushing piece

подвижного конуса (силы трения в опорах подвижного конуса меньше сил трения между куском и рабочей поверхностью дробильного элемента).

При отсутствии собственного вращения подвижного конуса при его движении (или в случае, когда подвижному конусу передается вращение в сторону движения подвижного конуса) на дробимый кусок будет действовать сила $F_{вр}$ (рис. 7).

Для определения закона движения куска под действием возникающей при вращении подвижного конуса силы $F_{вр}$ необходимо в центре тяжести сечения этого куска приложить две равные по величине и противоположные по направления силы F' и F'' ; $F_{вр}$ при этом равновесие тела не изменится. Тогда сила F'' будет стремиться переместить (скольжение куска в камере дробления) кусок дробимого материала, а пара сил $F_{вр}$ и F' создает крутящий момент, под действием которого кусок будет стремиться провернуться. Поскольку в реальных условиях в камере дробления разрушаются куски неправильной формы, то произойдет заклинивание дробимого куска по рабочей поверхности неподвижного конуса (в приведенном случае при рассмотрении дробимого куска квадратного сечения также происходит заклинивание). Тогда в точках контакта куска и неподвижного конуса возникнет реактивная сила и, соответственно, момент M , который будет уравновешивать кусок и не даст ему провернуться. Под действием внешнего момента, образованного парой сил трения, в дробимом куске возникает внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений. При этом силы трения $F_{тр2}^{г.в}$ и $F_{тр1}^{г.в}$ будут направлены в сторону, обратную движению куска, т.е. в противоположную действию силы F'' .

Из проведенного силового анализа в горизонтальной и вертикальной плоскостях следует, что на кусок дробимого материала действуют как сжимающие силы (равнодействующая горизонтальной составляющей силы нормального давления N_2^r и горизонтальной составляющей силы трения $F_{тр2}^r$ со стороны неподвижного конуса и равная ей по величине сила со стороны

неподвижного конуса) (рис. 5, 7), вызывающие в куске действие нормальных напряжений, так и крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений. Таким образом, в дробимом куске создается сложное напряженное состояние с одновременным действием нормальных и касательных напряжений.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

КУСКА ДРОБИМОГО МАТЕРИАЛА В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Для анализа напряженного состояния выбрана произвольная точка, взятая на куске дробимого материала (рис. 8). Главные напряжения в этой точке дробимого куска выражаются через напряжения на площадке его поперечного сечения, проходящей через эту точку [24, 25].

Разрушение дробимого куска определяется касательными напряжениями, максимальная величина которых достигается в площадках, ориентированных под углом 45° к главным площадкам [26]. Максимальное касательное напряжение в дробимом куске может быть рассчитано по уравнению:

$$\tau = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2},$$

где σ – нормальные напряжения; τ – касательные напряжения.

В конусной дробилке с параллельными осями дробилки и подвижного конуса (рис. 1, а) может быть реализовано движение подвижного конуса, когда ему передается вращение в сторону своего движения при условии жесткой фиксации конуса на оси. В таком случае величина $F_{вр}$ будет большей, чем при прочих условиях, а значит, будет больше и крутящий момент, в результате потребуется меньшее усилие для разрушения дробимого материала.

Выводы

Проведенный силовой анализ в конусной дробилке показал, что при определенных условиях в процессе дробления материала на него помимо сжимающих усилий действует и крутящий момент, в результате чего в дробимом куске возникает сложное напряженное состояние, а значит в куске появляются нормальные и касательные напряжения. Наибольшая эффективность конусных дробилок будет достигнута, если подвижный конус будет вращаться в сторону своего движения. Тогда на кусок будет действовать сила $F_{вр}$, в результате в куске возникнет внутренний крутящий момент. Такое движение может быть реализовано в конусных дробилках с параллельными осями дробилки и подвижного конуса в случае жесткой фиксации подвижного конуса на оси. Разрушение куска будет происходить по плоскостям

тям максимальных касательных напряжений, ориентированных под углом 45° к главным площадкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lee E., Evertsson C.M. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences. // *Minerals Engineering*. 2011. P. 188 – 194.
2. Демченко С.Е. Совершенствование процесса измельчения в конусной инерционной дробилке: Автореф. дис. к.т.н. – Белгород, 2007. – 21 с.
3. Алехин А.Г., Водопьянов И.Л. Деформации элементов щековых дробилок со сложным движением щеки при попадании в них металлических предметов // *Строительные и дорожные машины*. 1976. № 2. С. 30 – 32.
4. Афанасьев М.М., Зарогатский Л.П., Нагаев Р.Ф. Динамика рабочего органа конусной дробилки // *Машиноведение*. 1976. № 6. С. 8 – 14.
5. Баранов В.Ф. Применение технологии мокрого дробления за рубежом // *Обогащение руд*. 2000. № 1. С. 43 – 48.
6. Емелин М.А. Новые методы разрушения горных пород. – М.: Недра, 1990. – 240 с.
7. Котельников Б.Д., Червяков С.А. Новые машины и оборудование для горной промышленности // *Изв. вуз. Горный журнал*. 1997. № 3. С. 17 – 20.
8. Ушаков В.С. Определение зоны подпрессовки в конусных дробилках мелкого дробления // *Строительные и дорожные машины*. 1975. № 2. С. 24 – 26.
9. Siemens T. Ore dressing. Principles and practice. – New-York, London, 1924. – 330 p.
10. Terva J., Kuokkala V.-T., Valtonen K., Siitonen P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing // *Wear*. 2018. Vol. 398-399. P. 116 – 126.
11. Червяков С.А. Обоснование конструктивных и режимных параметров энергосберегающих конструкций конусных дробилок: Автореф. дис. к.т.н. – Екатеринбург, 2004. – 19 с.
12. Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthén E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 103-104. P. 93 – 101.
13. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
14. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
15. Gupta A., Yan D.S. Mineral Processing Design and Operation. An Introduction. Elsevier Science, 2006. – 718 p.
16. Evertsson C. M. Output prediction of cone crushers // *Minerals Engineering*. 1998. Vol. 11. Issue 3. P. 215 – 231.
17. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 127. P. 15 – 21.
18. Клушанцев Б.В. Валковые дробилки. Их параметры и метод расчета мощности // *Строительные и дорожные машины*. 1982. № 8. С. 23, 24.
19. Dong Gang, Huang Dongming, Fan Xiumin Cone crusher chamber optimization using multiple constraints // *International Journal of Mineral Processing*. 2009. Vol. 93. Issue 2. 1 October. P. 204 – 208.
20. Lee E., Evertsson M. Implementation of optimized compressive crushing in full scale experiments // *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 43-44. P. 135 – 147.
21. Moshgbar M., Bearman R.A., Parkin R. Optimum control of cone crushers utilizing an adaptive strategy for wear compensation // *Minerals Engineering*. 1995. Vol. 8. Issue 4-5. P. 367 – 376.
22. Витушкин А.В. Разработка кинематической схемы и методов расчета параметров дробильной машины с поступательным движением щеки: Автореф. дис. к.т.н. – Новокузнецк, 2013. – 18 с.
23. Шлаин И.Б. Разработка месторождений карбонатных пород. – М.: Недра, 1968. – 293 с.
24. Никитин А.Г., Лактионов С.А., Сахаров Д.Ф. Математическая модель процесса разрушения хрупкого материала в одновалковой дробилке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 8. С. 36 – 38.
25. Сахаров Д.Ф. Анализ процесса дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке с целью повышения энергоэффективности: Автореф. дис. к.т.н. – Новокузнецк, 2011. – 19 с.
26. Никитин А.Г., Лактионов С.А., Кузнецов М.А. Положение плоскости максимальных касательных напряжений при разрушении хрупкого куска в одновалковой дробилке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 7. С. 42 – 44.

Поступила 22 августа 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 980–986.

POWER ANALYSIS OF THE CRUSHING PROCESS IN A CONE CRUSHER

D.F. Sakharov, A.V. Vitushkin

Kuzbass Institute of the FPS of Russia, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The literature devoted to cone crushers design and research of its crushing process is generally based on empirical observations, therefore it is commonly considered that material is crushed under the influence of squeezing forces exclusively. Above mentioned literature, in turn, theoretical base forms for crushing units design. Based on common understanding, variety of designs of cone crushing machines existing today is characterized by integrity of principles of their work. Majority of theoretical works devoted to cone crushers are focused on such characteristics as efficiency, extent of crushing, increase in percent of useful fraction in ultimate product, or on operational parameters of separate structural elements such as lining armor resistance, increase in endurance of supporting and power nodes, etc. To increase those characteristics crushing cameras with irregular shape of lining armor are designed, design of an active crushing member combines elements of active members of

other crushing machines (roll, cheek crushers). However effectiveness of kinematics of active member movement is considered only from the point of view of squeezing forces generation in crushed material and minimization of its slide against it. The uppermost energy brought to any crushing machines is spent on loading destroying crushed material. Authors of this article consider that under particular circumstances such work conditions can be provided in cone crushers under which energy efficiency of materials crushing process will increase considerably. One of such conditions is creation of multi-axial stress in crushed material. Some reference designs of cone crushers are considered in the article as well as range of their application. Mechanism of multi-axial stress generation in crushed material promoting decrease in energy consumption of crushing process is described. Recommendations on development of operating conditions of crushing machine creating multi-axial stress in crushed material are provided.

Keywords: cone crusher, power analysis, crushing, energy efficiency, multi-axial stress, tangent stress, torque, design.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-980-986

REFERENCES

1. Lee E., Evertsson C.M. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences. *Minerals Engineering*. 2011, vol. 24, Issue 3–4, February–March, pp. 188–194.
2. Demchenko S.E. *Sovershenstvovanie protsessa izmel'cheniya v konusnoi inertsiionnoi drobilke: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Improving grinding process in a cone inertial crusher: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Belgorod, 2007, 21 p. (In Russ.).
3. Alekhin A.G., Vodop'yanov I.L. Deformations of elements of jaw crushers with complex movement of jaws at ingress of metal objects in them. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1976, no. 2, pp. 30–32. (In Russ.).
4. Afanas'ev M.M., Zarogatskii L.P., Nagaev R.F. Dynamics of working body of cone crusher. *Mashinovedenie*. 1976, no. 6, pp. 8–14. (In Russ.).
5. Baranov B.F. Application of wet crushing technology abroad. *Obo-gashchenie rud*. 2000, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.).
6. Emelin M.A. *Novye metody razrusheniya gornykh porod* [New methods of rock destruction]. Moscow: Nedra, 1990, 240 p. (In Russ.).
7. Kotelnikov B.D., Chervyakov S.A. New machines and equipment for mining industry. *Izv. vuz. Gornyi zhurnal*. 1997, no. 3, pp. 17–20. (In Russ.).
8. Ushakov B.C. Determination of the pre-press zone in cone crushers of fine crushing. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1975, no. 2, pp. 24–26. (In Russ.).
9. Siemens T. *Ore dressing. Principles and practice*. New-York, London, 1924, 330 p.
10. Terva J., Kuokkala V.-T., Valtonen K., Siitonen P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing. *Wear*. 2018, vol. 398-399, March, pp. 116–126.
11. Chervyakov S.A. *Obosnovanie konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov energosberegayushchikh konstruktivnykh konusnykh drobilok: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of constructive and regime parameters of energy-saving constructions of cone crushers: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2004, 19 p. (In Russ.).
12. Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthén E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 103-104, April, pp. 93–101.
13. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Droilki* [Crushers]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
14. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
15. Gupta A., Yan D.S. *Mineral Processing Design and Operation. An Introduction*. Elsevier Science, 2006, 718 p.
16. Evertsson C.M. Output prediction of cone crushers. *Minerals Engineering*. 1998, vol. 11, Issue 3, March, pp. 215–231.
17. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 127, October, pp. 15–21.
18. Klushantsev B.V. Roller crushers. Parameters and method of power design. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1982, no. 8, pp. 23–24. (In Russ.).
19. Dong Gang, Huang Dongming, Fan Xiumin. Cone crusher chamber optimization using multiple constraints. *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 93, Issue 2, 1 October, pp. 204–208.
20. Lee E., Evertsson M. Implementation of optimized compressive crushing in full scale experiments. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 43-44, April, pp. 135–147.
21. Moshghbar M., Bearman R.A., Parkin R. Optimum control of cone crushers utilizing an adaptive strategy for wear compensation. *Minerals Engineering*. 1995, vol. 8, Issue 4-5, April–May, pp. 367–376.
22. Vitushkin A.V. *Razrabotka kinematicheskoi skhemy i metodov rascheta parametrov drobil'noi mashiny s postupatel'nyim dvizheniem shcheki: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Development of kinematic scheme and methods for calculating parameters of crushing machine with translational motion of jaws: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2013, 18 p. (In Russ.).
23. Shlain I.B. *Razrabotka mestorozhdenii karbonatnykh porod* [Development of carbonate rocks deposits]. Moscow: Nedra, 1968, 293 p. (In Russ.).
24. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Sakharov D.F. Mathematical model of process of deterioration of a brittle material in a single-roll crusher. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 8, pp. 36–38. (In Russ.).
25. Sakharov D.F. *Analiz protsessa drobleniya khrupkikh materialov v odnovalkovoi drobilke s tsel'yu povysheniya energoeffektivnosti: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Analysis of the process of fragile materials crushing in single-roll crusher in order to increase energy efficiency: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2011, 19 p. (In Russ.).
26. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Kuznetsov M.A. Position of plane of maximum shear stress at fracture of brittle pieces in roll crushers. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 7, pp. 42–44. (In Russ.).

Information about the authors:

Sakharov D.F., Cand. Sci. Eng., Senior Researcher of the Organizational, Scientific and Publishing Department
(sacharov_dima86@mail.ru)

Vitushkin A.V., Cand. Sci. Eng., Lecturer of Chair of Military, Special Tactic and Physical Training (mentisoncorpus@gmail.com)

Received August 22, 2018