

Д.А. Власенко, О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко /к.т.н./
Донбасский государственный технический университет (Алчевск)

ЭНЕРГОЗАТРАТЫ УДАРНЫХ ДРОБИЛОК С ЖЕСТКИМ И ШАРНИРНЫМ КРЕПЛЕНИЕМ БИЛ К РОТОРУ

Приведены результаты исследований энергозатрат на дробление при сравнительном анализе ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору. Выявлена высокая эффективность работы роторных дробилок по сравнению с молотковыми.

Ключевые слова: роторная дробилка, молотковая дробилка, била, энергия удара.

Постановка проблемы

При подаче кусковых материалов в дробилку ударного типа с шарнирным подвесом бил, по аналогии с молотковой дробилкой, некоторое количество энергии расходуется на отклонение молотков от своего радиального положения, в результате чего происходит снижение эффективности процесса дробления и коэффициента полезного действия машины. Это обусловлено тем, что импульс от удара по материалу передается молотку и энергия, направленная на разрушение, частично расходуется на преодоление сил инерции молотков и трения в шарнирах в местах их креплений к ротору. В роторных дробилках с жестким креплением бил такое явление отсутствует, поэтому рациональным является рассмотрение процессов, влияющих на перераспределение энергии в этих двух типах машин и их сравнительном анализе.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросы подготовки сырья к агломерации, связанные с диспергированием многообразных компонентов в различных мельницах и дробилках, с точки зрения получения оптимальной крупности являются основополагающими вследствие своего прямого, существенного влияния, как на производительность процесса агломерации, так и товарных свойств готового агломерата, пригодного к доменной плавке [1].

В настоящее время при дроблении флюсов, в т.ч. и известняка, в агломерационном производстве используют молотковые дробилки ударного действия с шарнирно подвешенными молотками [2]. В таких конструкциях из-за нежесткого крепления бил (молотков) происходит потеря эффективности разрушения материала за счет отклонения молотка при соударении его с кусками. В результате этого электроприводом машины

расходуется лишняя энергия на устранение отклонения молотка от своего радиального положения, вызванного поворотом на некоторый угол в процессе дробления. Кроме того, существенно ухудшаются условия диспергирования разрушаемого сырья, вызываемого нежестким контактом молотков, и самого материала при взаимном ударе, когда не вся энергия, накопленная массой вращающегося ротора, переходит в энергию разрушения материала, что, в свою очередь, снижает коэффициент полезного действия дробильной машины в целом.

Для аналогичных целей существуют и успешно применяются машины с жестким креплением бил ротора – роторные дробилки [2], преимущество которых, по сравнению с молотковыми дробилками, является больший коэффициент полезного действия. В них контактный удар с разрушаемым материалом осуществляется гораздо большей массой вращающегося ротора за счет его значительного момента инерции при меньшем числе кинематических пар из-за отсутствия шарнирных подвесов бил, что существенно повышает эффективность процесса дробления.

Однако, наряду с достоинствами, роторным дробилкам присущи недостатки, главный из которых – низкая стойкость рабочих поверхностей бил. Причина этого кроется в невозможности их отклонения при контакте с недробимыми предметами из-за жесткого крепления с ротором, из-за чего концентрация воздействия разрушающих усилий на била ротора существенно возрастает и резко снижает ресурс их работоспособности.

Известно высокое влияние эффективности дробления кусковой извести перед вводом ее в аглошихту на показатели процесса спекания [2,3]. Добавка 3 % извести в шихту, состоящую из 100 % концентрата, приводит к повышению вертикальной скорости спекания на 37 % и уве-

личению выхода годного агломерата на 64 %. Кроме того, при добавке 2 % СаО в шихту, содержащую 30 % концентрата, производительность возрастает на 25 %, а при 20 % концентрата в шихте такой же расход извести увеличивает производительность процесса лишь на 15,7 % [4]. Отсюда следует, что оптимальный расход извести в шихту обеспечивается при большем содержании в ней тонких фракций. Количество извести, расходуемое в шихту, определяется и крупностью самой извести. Для достижения оптимальной производительности аглопроцесса при содержании 40 % мелкой железной руды и высокой дисперсности вводимой извести (90 % класса -0,074 мм) оказывается достаточным ее содержание в шихте не более 1 % [5].

Для условий аглофабрики металлургического комбината ПАО «Запорожсталь» (60 % концентрата в железорудной части шихты и крупности извести 3-12 мм) наибольшая производительность агломашин достигается при 5,7 % извести в шихте [2]. Сопоставление полученных значений оптимального содержания извести в шихте с крупностью извести показывает, что, чем мельче известь, тем ниже уровень ее оптимального расхода в шихту.

Помимо показателей активности материала важнейшим фактором, определяющим технологическую ценность негашеной извести, является тонкость ее помола. Однако показатели удельной поверхности частиц, по которым принято оценивать качество продукта, дают далеко неполное представление о его реологическом потенциале при взаимодействии с другими веществами.

Ударное измельчение не имеет подобных недостатков. Быстрый удар на скоростях больше 50 м/с дает наивысший выход частиц требуемого размера – до 90 % при полном отсутствии остатка на сите №008. Это значит, что мельницы быстрого удара, в принципе, более эффективны для помола такого материала как негашеная известь. Расход энергии в динамических измельчителях, по сравнению с традиционно используемыми шаровыми мельницами, в несколько раз меньше, а, благодаря более равномерному зерновому составу, технологические характеристики получаемого продукта выше [6].

Таким образом, условия наложения ударной нагрузки при дроблении извести может привести к существенному экономическому эффекту, достигаемому как за счет улучшения качества готового агломерата, так и повышения производительности процесса агломерации, что является технически достижимым при более мелком гранулометрическом составе и определенных усло-

виях технологии дробления. Однако, существенного внимания для совершенствования конструкций дробилок для этого в настоящее время практически не уделяется.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является определение сравнительного влияния наложения ударных нагрузок на материал с жестким креплением бил к ротору, как это реализовано в роторных дробилках, и с шарнирным креплением в конструкциях молотковых дробилок. Для этого необходимо решить задачу определения затрат энергии на дробление, расходуемой при жесткой заделке бил в роторной дробилке и при шарнирном подвесе в молотковой дробилке.

Основной материал исследования

Сравнительный анализ энергозатрат ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору заключается в сопоставлении эффективности работы роторных и молотковых ударных дробилок на основе определения изменения кинетической энергии молотка до и после удара с дробимым материалом различной массы при жестком и шарнирном креплении молотка на валу ротора. В случае шарнирного крепления импульс от удара по материалу передается молотку, что вызывает его отклонение от первоначального положения. Это уменьшает количество энергии, направленной на разрушение материала. При жестком креплении энергия удара более целенаправленно идет на работу разрушения.

Кинетическая энергия механической системы дробилки претерпевает многочисленные трансформации, сопровождающиеся различными явлениями, большая часть которых является неизбежными и могут рассматриваться как полезные, бесполезные или вредные. Для процесса измельчения характерно, что в качестве полезной можно считать относительно малую, варьирующуюся величину, вероятно менее 1 % общего расхода энергии.

Некоторая часть полезно затраченной энергии непосредственно расходуется на приложение ударной нагрузки к измельчаемому материалу до предела его разрушения, остальная доля энергии, используемая для поддержания работы, аккумулируется различными способами и, с точки зрения измельчения, теряется. Механизм измельчения определяется физическими свойствами, размерами, геометрией столкновений и относительной скоростью соударяющихся элементов. Полезная энергия расходуется, главным образом, на образование новой поверхности, а также на теплоту, выделяющуюся при

трении между частицами и дробящими поверхностями.

При рассмотрении действия одиночных ударов молотков дробилки в момент взаимодействия рабочих органов с частицей известняка, когда противодействием молоткам является инерция кусков, делается допущение, что между сырьем и молотком возникает совершенно неупругий, прямой центральный удар. Кинематические схемы такого процесса представлены на рис. 1.

При ударе шарнирно закрепленный молоток массой m о кусок материала массой μ отклоняется на некоторый угол α , при этом скорость снижается с V_0 до V_k [7], т.е. скорость молотка после удара составит:

$$V_k = \frac{m \cdot V_0}{\mu + m}.$$

С целью визуального сравнения энергозатрат при жесткой и шарнирной подвеске бил ротора, приведена графическая зависимость кинетической энергии молотка от размеров фракций кусков известня, подаваемых на дробление на рис. 2.

Из анализа полученной зависимости следует, что роторные дробильно-измельчительные машины ударного действия с жестким креплением бил ротора, с точки зрения энергосбережения, являются более предпочтительными, чем молотковые дробилки с шарнирным креплением молотков. Причем, с увеличением фракционного состава материала, подаваемого на дробление, кинетическая энергия молотка, передаваемая кускам сырья, резко падает. При наибольшей крупности известняка происходит максимальная потеря кинетической энергии молотка во время соударения, которая может достигать до 10,6 %.

Данные об исследовании важнейших показателей дробилки указывают на увеличение эффективности ее работы за счет более полного использования площади рабочих поверхностей отбойной плиты. Такой эффект достигается при работе вибрационного питателя с подачей около 368 т/ч при скорости транспортировки сырья около 0,33 м/с. Полученные данные рационально использовать на этапе задания геометрических параметров дробильно-измельчительной машины.

Т.к. крепление молотков осуществляется не жестко, из-за обеспечения им возможности предохранения от попадания недробимых тел, при ударе они отклоняются, вызывая некоторое снижение эффективности процесса диспергирования известня. В этом случае электроприводу машины приходится потреблять из сети большую

энергию, которая расходуется на восстановление положения молотков в радиальное положение под влиянием центробежных сил. При этом, суммарное действие импульса удара единой массы вращающихся молотков сильно теряется в шарнирах, а полезная работа разрушения преобразуется во вредные силы сопротивления, вызывающие нагрев элементов шарниров и иных частей дробилки.

В идеале, доля расхода энергии, идущая на создание напряжения в частице, является независимой переменной в соотношении системы «энергия-разрушение». С процессом, вызывающим разрушение и его последствиями неизбежно связаны такие факторы как: гибкая и пластическая деформация, кинетическая энергия частиц, получающихся в результате разрушения, нерациональная ориентация рабочих поверхностей ударных элементов машины и возможные смещения в кристаллической решетке дробимого материала.

Израсходованная таким образом энергия имеет такое же отношение к разрушению, как и численно меньшая энергия, затраченная на образование новой поверхности. Дополнительно к этому, частицы могут получать удары или в них могут создаваться напряжения, недостаточные для разрушения, в результате чего энергия рассеивается, часть ее может быть передана другим частицам в виде напряжений или аккумулирована как остаточная энергия напряжения. Кроме того, энергия различным образом частично поглощается дробящей средой, без чего процесс дробления не смог бы продолжаться, так что эта энергия способствует разрушению, хотя и опосредованно.

При правильном анализе расхода энергии в процессе измельчения из общего расхода должны быть вычтены трансмиссионные потери,

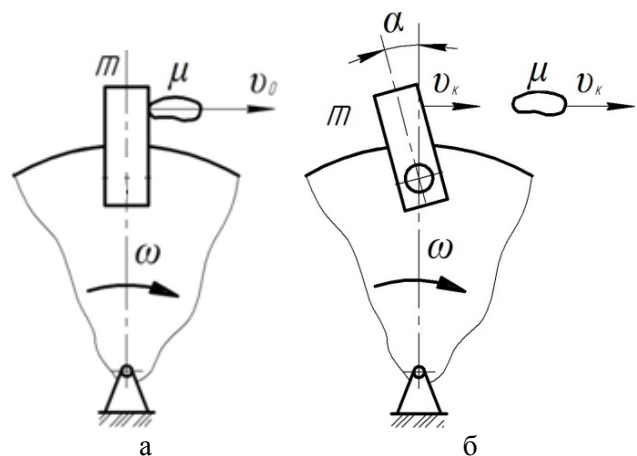


Рис. 1. Кинематические схемы для определения кинетической энергии: а – жесткая заделка; б – шарнирная подвеска

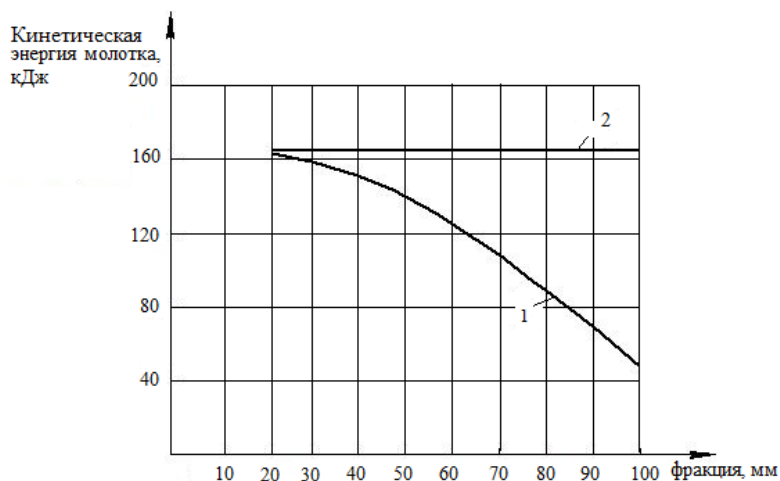


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии молотка при соударении с материалом: 1 – шарнирно подвешенный молоток; 2 – жесткая заделка

а остаток будет представлять полезно затраченную энергию.

На данном этапе пока не представляется возможным указать относительные значения различных уровней перераспределения энергии, однако возможно утверждать, что преобладающее ее количество рассеивается в виде теплоты.

Учитывая имеющийся такой класс машин с жестким подвесом бил к ротору, как роторные дробилки, проблему повышения эффективности измельчения извести можно решить путем набора отдельных молотков между собой в массивный пакет, где будет реализован принцип наилучшего использования кинетической энергии за счет более жесткого удара. Такой подход хорошо согласуется с общепринятыми направлениями совершенствования оборудования аглодоменного производства [8].

Главным позитивным свойством, в сравнении с молотковыми дробилками, в данном случае, достигается повышение коэффициента полезного действия именно передачей ударного воздействия бил на подаваемые куски извести суммарной кинетической энергией вращающегося ротора, вследствие гораздо большего по значению момента инерции, снижения количества кинема-

тических пар в шарнирных подвесах бил или даже полного их отсутствия. Тогда эффективность процесса дробления значительно увеличивается.

Сравнительные затраты энергии на дробление извести при жесткой, комбинированной (при количестве молотков в ряду – 12) и шарнирной подвеске молотков от размеров кусков известняка показаны в табл. 1.

Основным преимуществом реализации такого технического решения является существенная простота, что в условиях действующего производства является одним из основных ведущих принципов совершенствования существующих технологий и конструкций как самих машин, так и оборудования в целом.

Удельное потребление энергии на дробление за счет увеличения концентрации динамического (силового) воздействия значительно меньше. При этом достигается более равномерный зерновой состав извести по фракциям в готовом продукте.

Типовая конструкция молотковой дробилки известняка показана на рис. 3. Внутри рабочей камеры дробильно-измельчительной машины известняк подвергается многократному воздей-

Табл. 1. Кинетическая энергия молотков при ударе

Фракция известняка, мм	При креплении молотка, 10 ⁶ Дж		
	жестком	шарнирном	комбинированном
20	6,637	0,552	6,6364
30		0,551	6,6349
40		0,548	6,6318
50		0,543	6,6267
60		0,536	6,6191
70		0,526	6,6087
80		0,513	6,5947
90		0,497	6,5769
100		0,478	6,5547

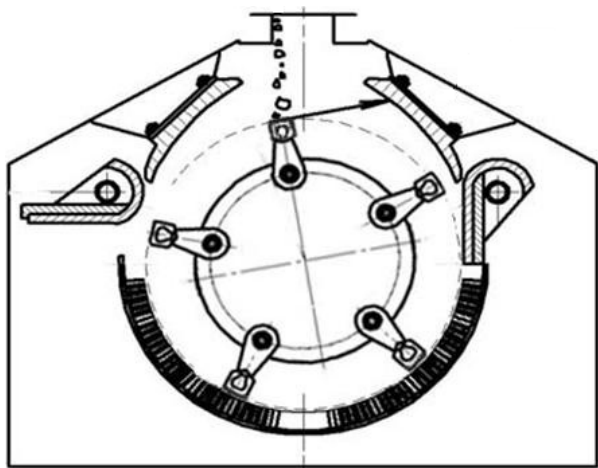


Рис. 3. Типовая конструкция молотковой дробилки извести

ствию молотков ротора и отбойных плит, в результате чего достигается необходимая крупность. Один из простых путей повышения эффективности работы дробилки состоит в увеличении оборотов вращения ротора, однако при этом сильно возрастают вибрационные нагрузки из-за невозможности в полной мере выполнить уравнивание ротора. Поэтому такой метод практически не нашел применения в производстве вследствие существенной сложности балансировки ротора и низкой степени устойчивого воздействия такого процесса.

Основополагающую роль для эффективного процесса диспергирования материала играет процесс трещинообразования. Резкое развитие трещины способно вызывать значительное увеличение напряжения при последовательных актах разрушения. Такое прогрессивное распространение трещины требует незначительного расхода энергии; трещина развивается медленно до тех пор, пока приток энергии в трещину от освободившегося силового поля не превысит работы, необходимой для образования новой поверхности, тогда трещина становится неустойчивой и скорость процесса увеличивается. Таким образом, для идеально твердого тела баланс энергии, относящийся к разрушению, заключается в равенстве уменьшения энергии упругости и повышения поверхностной энергии в сумме с кинетической энергией.

Скорость распространения трещины в хрупком теле возрастает с ростом напряжения и приближается к предельному значению, составляющему от 1/3 до 1/2 скорости волны. С повышением температуры и давления спектр свойств смещается от хрупкого разрушения через срезающие нагрузки до пластической деформации.

Медленное приложение усилий ведет к меньшей пластической деформации перед раз-

рушением и требует меньшего усилия для разрушения, чем быстрое приложение. С увеличением ударной скорости резко возрастает площадь поверхности на единицу затраченной энергии, вплоть до максимума, затем постепенно снижается. Оптимальная скорость находится в пределах 40-120 м/с в зависимости от направления удара и от исходных размеров кусков материалов, подвергающихся диспергированию.

Для дальнейших исследований перспективным направлением является метод комбинационного синтеза дробильно-измельчительных машин ударного действия, направленный на реализацию сочетания достоинств в одном устройстве машин роторного и молоткового типов на основе математического моделирования [9]. В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к агломерационному производству ПАО «Алчевский металлургический комбинат». При этом планируются и проводятся экспериментальные исследования как на физической модели молотковой дробилки, так и на промышленном образце.

Выводы

1. Энергия удара шарнирно подвешенного молотка в молотковой дробильно-измельчительной машине значительно снижается при возрастании крупности исходного материала, а при жесткой заделке остается постоянной.

2. Эффективность дробления извести при относительно большом числе жестко зафиксированных молотков практически соответствует эффективности роторной дробилки.

3. При разрушении приложенные силы должны быть равны или превышать некоторый порог, увеличивающийся с размером частиц, причем, по мере уменьшения размера частиц, среднее напряжение, требуемое для разрушения, увеличивается. Таким образом, с уменьшением размера частиц их прочность возрастает, что объясняется теорией «наиболее слабого звена», в которой при случайном распределении дефектов сокращение их количества на частицу резко снижается.

4. Одним из направлений совершенствования технологии дробления извести и рационализации конструкций молотковых дробилок является комбинирование жесткого крепления нескольких молотков в наборе, в количестве, определяемым опытным путем с учетом требований к фракционному составу готового продукта.

Список литературы

1. Еронько С.П., Удинцов Р.А., Левченко О.А.

- Моделирование процесса измельчения материала на одновалковой зубчатой дробилке / *Металлургические процессы и оборудование*. – 2012. – №1. – С. 17-23.
2. Власенко Л.А., Левченко Э.П. Структурный анализ процесса диспергирования известняка в агломерационном производстве / *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. – Алчевск: ДонГТУ, 2015. – Вып.44. – С. 82-86.
 3. Miller K.I. SIDOR's experience with direct reduction / *Iron and Steel Engineering*. – 1982. – No.9. – P. 25-32.
 4. Didier A., Gerbe J.L., Temoin F. Addition de chaux a l'agglomeration sur grille / *Revue de Metallurgie*. – 1980. – No.8-9. – P. 665-674.
 5. Масауси О. Спекание мелкой руды с добавлением негашеной извести / *Тэцу то хаханэ*. – 1980. – Т.66, №11. – С. 673.
 6. Липилин А.Б., Векслер М.В., Коренюгина Н.В. Ударный помол как действенное средство снижения себестоимости производства негашеной извести / *Сухие строительные смеси*. – 2010. – №6. – С. 32-33.
 7. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учебн. для вузов – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 416 с.
 8. Tonomura S. Outline of Course 50 / *Energy Procedia*. – 2013. – Vol.37. – P. 7160-7167.
 9. Features of mathematical modelling of mechanical processes of metallurgical machines / E.P. Levchenko, D.A. Vishnevsky, D.A. Vlasenko et al. // *Modern problems of theory of machines. SEC "MS"*. – North Charleston: CreateSpace, 2016. – No.4(1). – 210 p.

D.A. Vlasenko, O.I. Pavlinenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbass State Technical University (Alchevsk)

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF SHOCK CRUSHERS WITH HARD AND HINGED FASTENING OF BEATS TO THE ROTOR

Background. *The analysis of the process of lime crushing in hammer mills and the development of improved processes of crushing, allowing maximum use of the crash pulse of a rotating system of hammers for more effective destruction, is an urgent scientific task aimed at increasing the efficiency of crushing and grinding machines. The objective of this paper is to determine the comparative effect of imposing shock loads on the material with hard fastening of beats to the rotor, as implemented in rotary crushers, and with hinged fastening as it is in hammer mills.*

Materials and/or methods. *A significant effect of the fractional composition of lime supplied to the charge for sinter production with the best consumer properties is revealed through analytical review. Based on the definition of kinetic energy the research results of energy consumption for crushing are presented at a comparative analysis of shock crushers with the hard and hinged fastening of beats to the rotor. The high efficiency of rotary crushers is revealed as compared with hammer crushers. The effectiveness evaluation of the considered variants of the suspension through the method of comparative analysis of the kinetic energy consumption for lime crushing have shown high efficiency of use of a hard anchorage.*

Results. *A new concept of increasing the rigidity of the system of shock elements of the hammer mill suspension is proposed, which has a number of advantages. First, the shock energy of a hinged hammer decreases substantially with increasing the chunk size of the crushed material, while with the hard fastening it remains constant. Efficiency in the initial stage of crushing, using a rotary crusher, with the hard fastening of beats will be unchanged. Secondly, shock crushers with hard anchorage are more efficient than hammer mills, but their drawback is the rapid wear of the working bodies. Third, a promising way of crushing to improve the quality of limestone is the synthesis of new crushers designs, which combines hard fastening of beats with the possibility of their protection from destruction, as in hammer mills, due to the loss of beats rigidity during their contact with non-crushable bodies.*

Conclusion. *Based on the definition of kinetic energy the research results of energy consumption for crushing are presented at a comparative analysis of shock crushers with the hard and hinged fastening of beats to the rotor.*

Keywords: *rotary crusher, hammer mill, beat, shock energy.*

Статья поступила 06.03.2015 г.

*© Д.А. Власенко, О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, 2016
 Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронецко*