

О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко /к.т.н./, В.Г. Чебан /к.т.н./
 ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ КОЛОТОЙ ДРОБИ

Выполнен анализ возможности применения существующих конструкций дробилок и мельниц для получения стальной колотой дроби. Обосновано применение разгонно-ударной мельницы, использующей принцип «свободного удара», который позволяет свести к минимуму все энергоемкие процессы, связанные со смятием и уплотнением исходного материала, а также модернизация способа ударного раскалывания в шаровой мельнице.

Ключевые слова: стальная дробь, дробилка, мельница, разрушение, твердость, крупность.

Постановка проблемы

Стальная дробь стала применяться для очистки металлических поверхностей еще в середине XX века. Ее используют для очистки металла от ржавчины, окалина после термообработки, пригаров в литейной металлургии, а также от других загрязнений и технологических дефектов, которые могут отрицательно сказаться на дальнейшей обработке изделий.

В настоящее время почти все производство стальной колотой дроби основано на использовании шаровых мельниц.

Шаровые мельницы просты по конструкции и обеспечивают высокую надежность получения готового продукта необходимой крупности. Однако при их использовании происходит переизмельчение готового продукта, вследствие его многократного соударения в рабочей камере. Это повышает энергозатраты на производство колотой дроби. Таким образом, при приготовлении колотой дроби, возникает потребность в усовершенствовании существующего процесса раскалывания с целью повышения эффективности способа обработки.

Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день производство колотой стальной дроби, в своем большинстве, основано на использовании шаровых мельниц, хорошо зарекомендовавших себя в условиях данного производства с точки зрения надежности, простоты и безопасности труда [1]. Научные публикации, в которых бы уделялось внимание повышению эффективности такого оборудования, практически отсутствуют, хотя, по отзывам специалистов-практиков, существенное усовершенствование процесса раскалывания является очень актуальным. Особенности измельчения в

шаровых мельницах характеризуются многократным ударным воздействием на сферическую дробь, пока она не претерпит разрушения с образованием частиц неправильной формы с острыми гранями. Обычно, в качестве измельчающих элементов используются шары диаметром 100 мм, в падающем режиме наносящие многократные удары по стальным сферическим частицам дроби диаметром от 1 до 6 мм. Однако такое взаимодействие существенно понижает долю раскалывания и увеличивает энергетические затраты из-за невозможности организации центрального удара в рабочем пространстве машины.

Некоторые направления изучения вопроса, изложенные в работах [2-4], касаются методов математического моделирования и экспериментальных исследований, однако в них не уделено внимания имеющемуся техническому многообразию различных способов и средств, используемых для разрушения частиц стальной дроби.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является анализ существующих дробилок и мельниц для реализации способов диспергирования материалов и на его основе оптимального варианта для производства стальной колотой дроби.

Основной материал исследования

Процессы разрушения различных материалов пристально изучаются учеными уже не одно столетие, но многие вопросы при этом до сих пор являются областью только эмпирических знаний и использования инженерных формул, т.к. математические модели этих процессов весьма сложны.

Под способом разрушения понимается вид воздействия разрушающей силы на материал.

Необходимые для разрушения усилия развиваются в измельчительных машинах, обеспечивающих преимущественное осуществление определенного способа.

Существует четкая зависимость между размером частицы и расходом энергии на ее разрушение, показывающая, что при процессе разрушения частиц затраты энергии увеличиваются с повышением требуемой степени измельчения, что является естественнонаучным пределом развития, преодолеваемым в эволюции дробильно-измельчительных машин.

В зависимости от назначения и принципа действия машин, предназначенных для измельчения материалов, используются следующие методы разрушения (рис. 1): раздавливание, истирание, изгиб, раскалывание, ударное воздействие («свободный удар») [5].

Машины для измельчения материалов должны иметь простую конструкцию, обеспечивающую удобство и безопасность обслуживания; минимальное число изнашивающихся, легко заменяемых деталей; предохранительные устройства, которые, при превышении допустимых нагрузок, должны разрушаться (распорные плиты, срезные болты и др.) или деформироваться (пружины), предотвращая поломки более сложных узлов. Их конструкции должны отвечать санитарно-гигиеническим нормам звукового давления, вибрации и запыленности воздуха [6].

Оценка результатов дробления (измельчения) производится по степени дробления (измельчения) и эффективности работы машин.

В зависимости от крупности исходного и дробленого материала различают следующие стадии дробления и измельчения, показатели которых приведены в табл. 1.

Способы разрушения материалов, реализуе-

мые в дробилках и мельницах, приведены на рис. 2. Наиболее часто для дробления применяют щековые, конусные, валковые и молотковые дробилки. Одними из наиболее универсальных типов дробилок являются щековые.

Принцип действия щековой дробилки основан на разрушении кусков исходного материала за счет сжатия (раздавливания, раскалывания) и частично истирания между двумя массивными металлическими плитами (щеками) при их периодическом сближении. Одна из плит закрепляется неподвижно, другая перемещается, сдвигая и дробя поступающие куски (рис. 3а) [7].

Основными достоинствами щековых дробилок являются простота и надежность конструкции, компактность и легкость обслуживания. Кроме того, щековые дробилки подходят для измельчения пород любой твердости. Однако, например, при работе с твердыми материалами, в процессе эксплуатации происходит быстрое изнашивание подвижной «щеки». В целях экономии, плиты периодически меняют местами, что обеспечивает их равномерный износ. А для увеличения срока службы дробящих элементов используют наплавку твердыми материалами.

Таким образом, основным недостатком использования щековой дробилки для раскалывания стальной дроби является необходимость применения очень твердых футеровочных плит и создания больших усилий, что приводит к частым профилактическим и ремонтным работам и возникновению простоев оборудования.

В валковой дробилке исходный материал сдавливается между двумя валками, выполненными из твердого материала и вращающихся навстречу друг другу (иногда валки вращаются с разной частотой и тогда раздавливание материала сочетается с истиранием), что исключает пе-

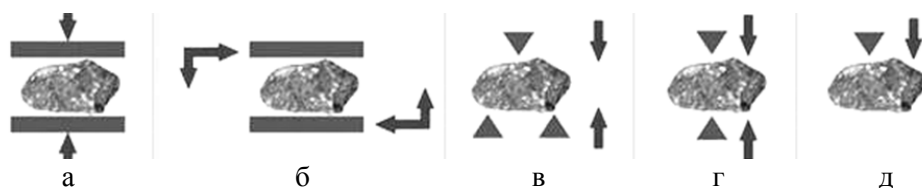


Рис. 1. Схема основных способов механического измельчения:

а – раздавливание; б – истирание; в – изгиб; г – раскалывание; д – свободный удар

Табл. 1. Стадии дробления и измельчения

Стадия		Крупность, мм		Степень дробления
		«питания»	продукта	
Дробление	крупное	1200-500	350-100	3-5
	среднее	350-100	100-40	3-8
	мелкое	100-40	40-10	3-8
Измельчение	грубое	30-10	5-2	–
	тонкое	5-2	1-0,5	–
	сверхтонкое	1-0,5	0,1-0,005	–

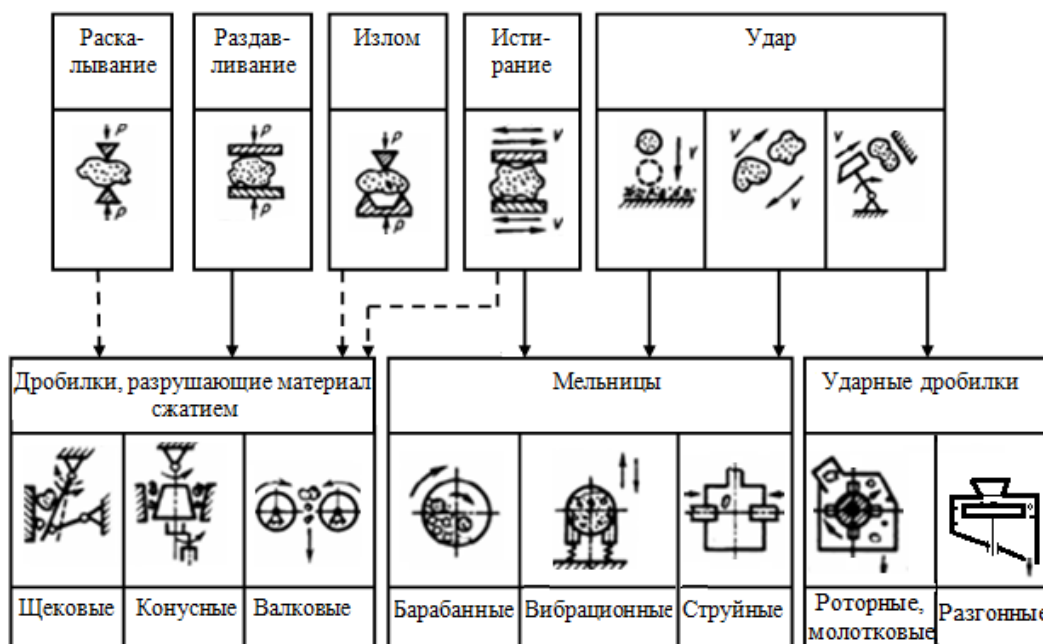


Рис. 2. Способы разрушения материалов, реализуемые в дробилках и мельницах:
 «←» – преобладающие; «←→» – сопутствующие

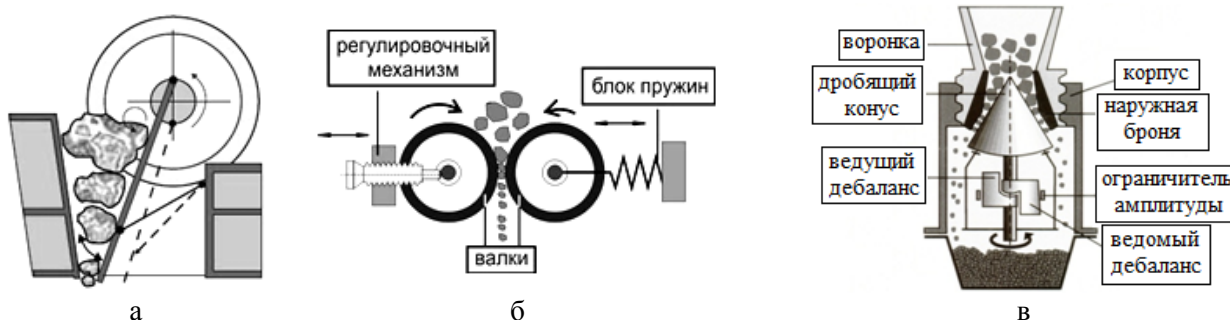


Рис. 3. Машины, разрушающие материал сжатием:
 а б и в – щековая, конусная и валковая дробилка

реизмельчение (рис. 3б). При попадании недробимых предметов пружины под действием возрастающей нагрузки сжимаются, в результате чего увеличивается зазор между валками и недробимый предмет выпадает из дробилки. Под действием пружин подшипники с валком возвращаются в исходное положение [7].

Для правильной эксплуатации валковых дробилок необходима непрерывная и равномерная подача дробимого материала по всей длине валка. Дробящие валки могут быть гладкими, рифлеными либо зубчатыми. Зубчатые валки обеспечивают лучший захват более крупных кусков руды или породы, а также более эффективное раскалывание кусков горной массы. Гладкие валки осуществляют дробление преимущественно раздавливанием.

К основным достоинствам этих дробилок следует отнести простоту конструкции, удобство ремонта и обслуживания, меньшее переизмельчение материала, более низкий удельный расход электроэнергии по сравнению с дробилками

других типов. Недостатком валковых дробилок является то, что при неравномерной загрузке возможен перекося валков, а также они могут пропускать недробимые предметы.

Валковые дробилки обычно используют при дроблении некрепких материалов, таких как известняк, мергель, мел, уголь, глинистый сланец, шлак, полевой шпат, а также для измельчения вязких и влажных материалов, например, глин. Исходным материалом в наших условиях является стальная дробь твердостью 473 HV (по Виккерсу) или 46.9 HRB (по Роквеллу) [2], поэтому использование валковой дробилки для раскалывания стальной дроби нецелесообразно, т.к. им свойственны недостатки качества футеровки, как и у щековых дробилок, когда закаленная стальная дробь впивается внутрь рабочих органов, приводя к их разрушению и сводя на нет сам процесс раскалывания. Поэтому для качественной их работы нужны очень твердые материалы рабочих органов, что тяжело осуществимо на практике и требует высокой культуры

производства от поставщиков запасных частей.

Валковые дробилки используются, в основном, для мелкого или среднего дробления, но исходя из данных табл. 1, для получения стальной колотой дробы крупностью 0,075...2,8 мм из стальной сферической (литой) дробы крупностью 0,125...4,75 мм предпочтительно применение тонкого и сверхтонкого измельчения [2].

В конусных дробилках материал разрушается в процессе раздавливания, излома и частично истирания между двумя коническими поверхностями (дробящим конусом и броней). Конструкция конусных дробилок представляет собой конусообразное загрузочное устройство, частично перекрытое дробящим конусом (рис. 3в). Исходное сырье поступает в питающий бункер дробилки, откуда через воронку перемещается в рабочую зону. Подвижный дробящий конус вращается вокруг продольной оси эксцентрично по отношению к броне, осуществляя непрерывное дробление материала.

Достоинствами конусной дробилки является ее высокая производительность и непрерывный цикл воздействия на дробимый материал, компактность, надежность и простота эксплуатации. Основным недостатком дробилок такого типа является повышенная энергоемкость технологии дробления. Кроме того, конструкция сама по себе довольно емкая и громоздкая, что в некоторых случаях затрудняет её эксплуатацию. Т.к. принцип работы основан на раздавливании, то требования к твердой и качественной броне футеровке здесь тоже сохраняется в полной мере.

В измельчающих машинах ударного действия разрушение дробимого материала происходит за счет кинетической энергии движущихся масс. К ним относятся мельницы и два типа дробилок: молотковые и роторные [8].

Дробилки роторного типа применяются для измельчения материалов низкой или средней твердости. Использование роторных дробилок ограничено невозможностью регулировки крупности частиц в получаемом продукте. Они могут

использоваться для производства мелких фракций.

При высокоскоростном вращении горизонтально расположенного вала куски измельчаемой породы многократно соударяются с прикрепленными к массивному ротору билами, прочными отбойными плитами, а также между собой. В результате удается достигнуть высокой степени измельчения (рис. 4а).

Достоинством роторной дробилки является то, что она отличается простотой конструкции, надежностью в эксплуатации, мобильностью за счет небольшого веса, относительно низкой ценой и высокой ремонтпригодностью. К недостаткам дробилки относятся низкая регулируемость размера фракций при дроблении рудных материалов и возникающие проблемы при дроблении твердых рудных пород. Била подвергаются большим нагрузкам и быстро изнашиваются. Также достаточно быстро изнашиваются отражательные плиты. Эти работы относятся к текущему ремонту дробилок. Замена ротора – сложная ремонтная операция, производимая на заводах-изготовителях. Она относится к капитальному ремонту, стоимость которого сопоставима со стоимостью новой роторной дробилки. Кроме того, при разрушении стальной дробы при низких скоростях вращения и мягких материалах рабочих поверхностях наблюдается эффект упругого отражения частиц дробы, приводящий к катастрофически быстрому их износу. Таким образом, единственная проблема дробилок роторного типа – это дороговизна ее эксплуатации.

В молотковых дробилках материал измельчается в основном ударом шарнирно подвешенных молотков, а также истиранием. Процесс работы заключается в следующем. Измельчаемый материал подается в дробилку через загрузочное отверстие и с помощью посредством питателя попадает на быстровращающийся ротор, где подвергается ударам молотков. Разрушение происходит за счёт многократных ударов по материалу молотков, а также осколков об отбойные элементы (деку и колосниковую решётку).

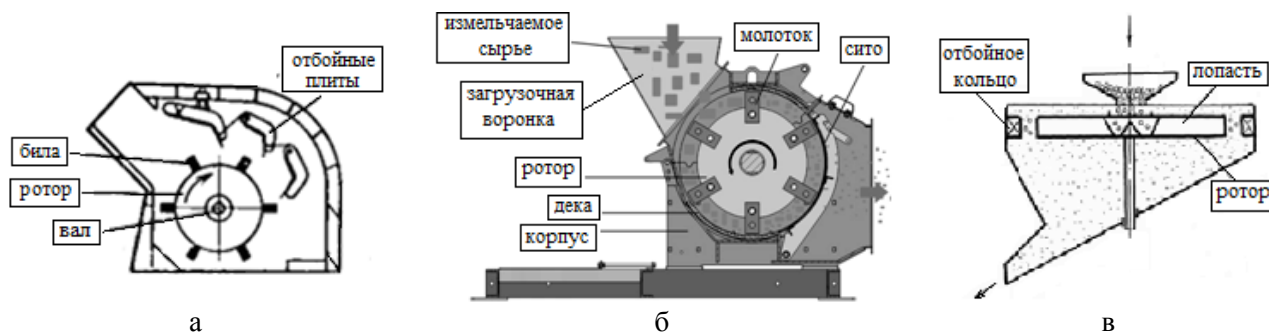


Рис. 4. Дробилки ударного действия:
а, б и в – роторного, молоткового и разгонного типа

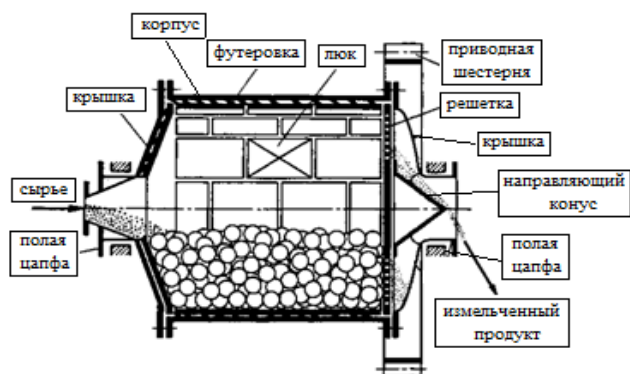


Рис. 5. Шаровая мельница

В случае попадания недробимого предмета в машину молотки отклоняются при контакте с ним от своего радиального положения относительно центра вращения, а затем снова занимают исходное состояние под действием центробежной силы. Готовый продукт выводится через выгрузочное приспособление. Наличие калибровочного сита позволяет получить готовый продукт гарантированной крупности, что является необходимым условием его качества (рис. 4б).

По своему назначению, конструктивным особенностям и принципу действия дробилки этого типа бывают:

- молотковые обычные, предназначенные для дробления всех видов хрупких материалов небольшой влажности;
- молотковые самоочищающиеся, предназначенные для дробления пластичных и сильнопылящих материалов, образующих с повышением влажности пластичную, липкую массу.

Недостатком молотковых машин является то, что в связи с многократным воздействием ударной нагрузки на измельчаемый материал, ими потребляется лишняя энергия, затрачиваемая на переизмельчение, а при раскалывании стальной дробы они, так же как и роторные, требуют увеличения частоты вращения ротора и высокой твердости рабочих органов.

Роторные машины не нашли такого широкого применения как молотковые дробилки.

В молотковых дробилках имеет место нецентральный удар, разрушение материала происходит за счёт большого количества ударов, а поэтому энергия расходуется непроизводительно. Целесообразно добиться измельчения частицы одним сильным центральным ударом, «свободным ударом» до требуемой степени измельчения. Для этого возможно осуществить процесс, обратный процессу в молотковой дробилке, т.е. оставить измельчающие органы неподвижными, а скорость сообщить частицам дробы.

Отличительной особенностью «свободного удара» является максимальная простота реали-

зации при сравнительно низких энергозатратах. Термин «свободный удар» определяется как «удар на лету». В соответствии с этим, разрушение материалов представляет собой диспергирование материала в результате соударения с движущимся ударником (биллом) или неподвижной преградой [3].

Изложенные обстоятельства позволяют считать вполне закономерным одно из преимуществ способа разрушения свободным ударом – его низкую удельную энергоёмкость. Измельчительные установки, реализующие этот способ, имеют (при равной производительности) меньшую установленную мощность. Это объясняется в первую очередь тем, что при свободном ударе сводятся к минимуму все контактные (более энергоёмкие) явления, связанные со смятием и уплотнением материала в приконтактной зоне. Для реализации этого принципа хорошо подходит центробежная дробилка, содержащая корпус, в котором на вертикальном валу с возможностью вращения установлен горизонтальный ротор. Наибольшее распространение получила конструкция центробежно-ударной дробилки (рис. 4в).

Основными недостатками центробежно-ударной дробилки являются: большое количество пыли в готовом продукте и сравнительно быстрый износ ударных тел при дроблении или измельчении материалов средней твердости или наличии твердых частиц в мягких материалах. При разрушении стальной дробы сохраняются требования к высокому качеству рабочих органов машины и большой скорости выброса частиц.

Преимуществами ударно-центробежных машин являются: компактность – высокая производительность на единицу объема машины, простота конструкции, надежность работы и малая затрата энергии на холостом ходу. Кроме того, благодаря тому, что практически вся подводимая к дробилке энергия используется для сообщения кинетической энергии измельчаемому материалу, центробежно-ударные дробилки имеют большой коэффициент полезного действия и высокий коэффициент измельчения.

Что касается струйных мельниц, то их основная сложность состоит в выделении готового продукта из газа. Фактически обвязка мельницы (конструкции по выделению материала из газа – воздуховоды, циклоны, классификаторы, бункера, фильтры и т.д.) на порядок по объему превосходит саму мельницу, значительно увеличивая стоимость всего решения. Кроме того, производительность разработанных конструкций достаточно невысокая.

Основным недостатком вибрационных мельниц является зависимость крупности кусков питания от размера шаров и амплитуды колебаний мельницы. Обычно размер куска не должен быть больше 0,1 диаметра шара. Приходится делать многостадийный помол, уменьшая размеры шаров на каждой стадии по мере снижения крупности продукта, что значительно усложняет процесс обработки. Кроме того, конструкция мельницы имеет особые требования в отношении надежности, определяемые ее работой в быстром энергонагруженном вибрационном режиме. Таким образом, при создании вибромельниц существует необходимость решения ряда технических задач, что значительно затрудняет ее применение для производства колотой дробы.

Барабанные мельницы позволяют производить грубый, средний и тонкий помол твердых, сыпучих материалов. Барабанные мельницы – машины измельчения истирающего и ударного действия.

Существуют две разновидности этого типа мельниц: шаровые и стержневые (трубные). Они различаются отношением длины к диаметру. У трубных барабанных мельниц отношение длины к диаметру составляет от 3:1 до 6:1, а у шаровых 2:1. Расход энергии на одну тонну продукта составляет 35-50 кВт·ч, а расход легированной стали в виде продуктов износа мелющих тел и футерующих элементов – до 1 кг и более [4].

Частицы подвергаются ударным нагрузкам находясь между движущимися мелющими телами, причем взаимодействие мелющих тел определяется как центральным ударом, так и взаимодействием, близким к касательному. Имеет место также истирание материала между слоями мелющей загрузки.

Принципиальной особенностью шаровых мельниц является использование в качестве рабочих органов свободных мелющих тел – шаров (рис. 5). Достоинством шаровых мельниц, как упоминалось выше, является их высокий уровень мощности и надежности, простота устройства и условий эксплуатации.

Несмотря на существенные достоинства, эти мельницы имеют и ряд недостатков, к которым относятся низкий выход готовой продукции и необходимость многократного пропуска через дробилку исходного материала, что приводит к его переизмельчению. Таким образом, стальная дробь в первоначальный момент диспергирования раскалывается очень не эффективно из-за преимущественно касательных ударов с шарами, пока она имеет круглую форму, а затем резко возрастает количество переизмельченного металлического порошка.

Для компенсации относительно слабого ударного и истирающего воздействия мелющих тел на обрабатываемый материал и соответственного повышения практической производительности шаровых барабанных мельниц приходится увеличивать объем их барабана, что приводит к значительному увеличению материалоемкости и энергонагруженности оборудования.

Большая часть энергии при работе шаровых мельниц теряется бесполезно, коэффициент полезного действия низок – по разным оценкам от 2 до 20 %.

Также необходимо учитывать, что даже при значительном увеличении объема барабана и соответственно габаритных размеров мельницы коэффициент заполнения мелющими телами обычно не превышает 0,35-0,4. Еще одним недостатком работы шаровых мельниц является сильный шум, который негативно влияет на состояние здоровья рабочего персонала.

Для повышения вероятности реализации центрального удара целесообразно вместо шаровой мелющей загрузки использовать стержни длиной примерно равной длине барабана или короткие цилиндры (цельпесы). В таком случае, в продольном направлении создание рикошета исключается. Еще более эффективным представляется применение вместо шаров многогранников, имеющих плоские грани, что значительно улучшит контактные взаимодействия. Однако в данном случае возникает техническая задача налаживания производства мелющих тел такой формы, что пока является проблематичным.

Выводы

1. Несмотря на широкое распространение, надежность и неприхотливость, шаровые барабанные мельницы не в полной мере отвечают концепции развития современного технологического оборудования и требуют доработки способа измельчения, например, за счет применения в качестве мелющей загрузки многогранников вместо шаров.

2. Наиболее эффективным и перспективным техническим средством для получения стальной колотой дробы является центробежно-ударная разгонная дробилка, использующая принцип «свободного удара», который позволяет свести к минимуму все энергоемкие процессы, связанные со смятием и уплотнением исходного материала.

3. Центробежно-ударная дробилка имеет высокую производительность, большой коэффициент полезного действия, высокий коэффициент измельчения, и, самое главное, малую затрату энергии на холостой ход машины.

Список литературы

1. Производство стальной литой термообработанной дроби в условиях машиностроительных предприятий: монография / П.С. Гурченко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 113 с.
2. Павлиненко О.И., Кучеренко Д.В., Левченко Э.П. Основные направления экономии электроэнергии в производстве стальной колотой дроби / Сб. науч. тр. 6-й науч.-практ. конф. асп. и студ. ДонГТУ и школьников «Экологические проблемы региона», Алчевск, 30 января 2016 г. – Алчевск: ВУО МАНЭБ, 2016. – С. 9-13.
3. Построение экспериментальных моделей физических процессов в дробильно-измельчительных устройствах / Э.П. Левченко [и др.] // Сб. мат. межд. заоч. науч.-практ. конф., Биробиджан, 15 декабря 2015 г. В 2-х ч. Ч.2. – Биробиджан: ИЦ им. Шолом-Алейхема, 2016. – С. 90-94.
4. Особенности математического моделирования механических процессов металлургических машин / Э.П. Левченко [и др.] // Современные проблемы теории машин. НОЦ «МС». – Норт-Чарлстон: CreateSpace. – 2016. – №4(1). – С. 14-16.
5. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. – СПб: [б.и.], 2007. – 439 с.
6. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко В.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учеб. пос. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 2007. – 301 с.
7. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учеб. пос. – Тамбов: Изд-во Тамбовского техн. унив., 2004. – 75 с.
8. Мартынов В.Д., Алешин Н.И., Морозов Б.П. Строительные машины и монтажное оборудование. – М.: Машиностроение, 2004. – 351 с.

O.I. Pavlinenko, E.P. Levchenko /Cand. Sci. (Eng.), V.G. Cheban /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbas State Technical University (Alchevsk)

**THE ANALYSIS OF POSSIBILITY OF USING THE EXISTING TECHNICAL MEANS
 TO OBTAIN THE STEEL CHIPPED FRACTION**

Background. *The analysis of machines for materials crushing and grinding and the ways of destruction implemented in them showed that high-speed centrifugal impact grinders of accelerating action type and the ball mills are the most preferable to obtain the steel chipped fraction if the central impact is the priority in them.*

Materials and/or methods. *Comparative analysis of various types of crushing machines is carried out regarding the possibility of crushing steel chipped fraction. Evaluation of the effectiveness of considered options of use of crushing and grinding machines was performed via analytical comparison of the ways of applying loads on the material combined with the advantages and disadvantages of the types of machines which showed a preferred use of centrifugal impact grinders and ball mills for the formation of the chipped fraction.*

Results. *Along with the use of free direct strike, which is implemented in centrifugal impact mills of the accelerating action type, the new concept of increasing efficiency of drum mills used for the preparation of chipped fractions, with grinding bodies in the form of polyhedra with flat sides having correct or incorrect form. This will increase the probability of a direct collision of the grinding bodies with round fractions in the working space of these machines and eliminate harmful, from the point of view of the irrational use of energy, ricochets leading to the dispersion of energy in the form of useless heat release.*

Conclusion. *Based on the analysis of various types of machinery for crushing and grinding of materials identified the most efficient designs for efficient crushing of steel fraction in the form of centrifugal impact mills and drum mills with grinding bodies in the form of polyhedra with flat sides, which allows to achieve the implementation of direct impact in the working space of these machines.*

Keywords: *steel fraction, grinder, mill, fracture, hardness, particle size.*

Статья поступила 23.08.2016 г.

*© О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко, В.Г. Чебан, 2016
 Рецензент д.т.н., проф. С.П. Ерньоко*