

В статье приведен обзор современных способов измельчения и агрегатов, реализующих данные способы. Представлена принципиально новая ударно-центробежная шаровая мельница отечественного производства.

# НОВАЯ ТЕХНИКА МЕХАНИЧЕСКОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

А.Б. ЛИПИЛИН  
М.В. ВЕКСЛЕР  
Н.В. КОРЕНЮГИНА

генеральный директор МП «ТЕХПРИБОР»  
инженер, ведущий специалист  
главный технолог МП «ТЕХПРИБОР»

г. Тула



Эффективность - результативность процесса или операции по отношению результата к затратам, обеспечивавшим его получение

## ТОНКИЙ ПОМОЛ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

В настоящее время существуют различные способы получения высокодисперсных порошков твердых тел. При этом механический способ является наиболее простым и широко распространенным. Для диспергирования минерального сырья находят применение машины, отличающиеся способом воздействия на материал. В одном случае это может быть раздавливание, в другом – удар, истирание или их комбинация [1].

Сегодня основными агрегатами тонкого помола являются шаровые и аналогичные им мельницы. Их рабочие элементы - это броневые плиты барабана и загруженные в него мелющие тела - шары, стержни, диски, а в мельницах самоизмельчения - крупные куски материала. Вращение барабана вызывает подъем мелющих тел, которые, достигнув определенной высоты, падают и скатываются вниз (Рис.1).

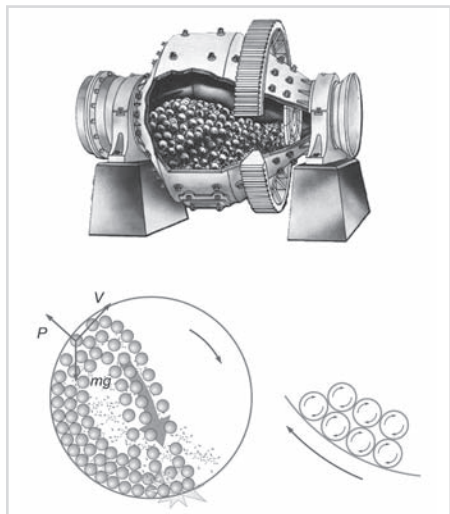


Рис. 1 Устройство шаровой мельницы и схема движения шаров в барабане

Разрушение материала в шаровых мельницах происходит как в результате медленного раздавливания - истирания при скатывании шаров, так и быстрого сжатия от ударов при их падении.

Несмотря на абсолютное лидерство среди агрегатов тонкого помола, используемых в многотоннажном производстве порошкообразных материалов, шаровым мельницам присущи и серьезные недостатки. Только от 2 до 20% всей потребляемой энергии расходуется непосредственно на измельчение [2], остальная ее часть идет на преодоление сил трения, образование тепла, звуковых колебаний, вибрации и т.д. В результате проведенных исследований было установлено, что только каждый тысячный удар шара производит работу непосредственно по измельчению [3]. И если грубый помол с получением частиц, размерами в сотые доли миллиметра, не вызывает серьезных затруднений, при более тонком помоле коэффициент полезного действия шаровой мельницы снижается настолько, что ее дальнейшее использование становится экономически не целесообразно. Ограниченность самого способа измельчения, как и реализующего его оборудования прекрасно отображают слова советского ученого, доктора технических наук Александра Васильевича Волженского: «...большое уменьшение затрат энергии могут дать лишь те способы, при которых материалы измельчались бы под влиянием прямых разрывающих воздействий на них, а не в результате первоначальных сжимающих сил» [4].

## УДАР И СЖАТИЕ

Все твердые материалы характеризуются присутствием им сопротивлением измельчению. Разрушение твердого тела происходит в том случае, если подведенной энергии достаточно для преодоления сил внутреннего сцепления. Обычно при механическом диспергировании обрабатываемый материал подвергается действию сжимающих сил с двух сторон (статическое раздавливание - истирание) или с одной стороны (свободный удар). Первый способ измельчения реализуется, например, в щековых, конусных и валковых дробилках, шаровых и вибрационных мельницах, второй способ характерен для дезинтеграторов, мельниц струйных и ударно-отражательных дробилок. Но в любом случае кинетической энергии действующих мелющих тел должно быть достаточно для создания таких напряжений, которые по достижению предельных значений приведут к разрыву целого куска с образованием более мелких фрагментов. При этом расход энергии, необходимой для создания критических напряжений, может

существенно различаться, в зависимости как от физико-механических свойств самого измельчаемого материала, так и способа приложения разрушающих сил.

Минеральное сырье, обычно используемое в производстве порошков твердых тел, характеризуется прочностью на сжатие, в 6-12 раз превосходящей прочность на растяжение, поэтому для его диспергирования целесообразно использовать быстрый удар, а не медленное сжатие. Одни и те же результаты измельчения могут быть достигнуты с разными показателями экономичности процесса, и существующий опыт использования самого распространенного инструмента тонкого помола подтверждает такую возможность.

Хотя шаровые мельницы лишь условно можно назвать агрегатом ударного действия, теория и практика их применения позволяет установить четкую зависимость между преобладающим способом разрушения и эффективностью тонкого помола.

Как говорилось выше, способ разрушения материала в шаровых мельницах комбинированный, то есть присутствует и раздавливание - истирание от качения шаров и удары от их падения. От того, какой способ будет преобладающим, зависит количество энергии расходуемой на образование единицы новой поверхности. Несмотря на простоту устройства и принципа действия шаровой мельницы, результаты ее технико-экономического использования зависят от множества факторов. Ключевыми из них являются: крупность питания, размер и распределение мелющих тел, объем загрузки, скорость вращения барабана. Последний в большей степени и определяет эффективность работы мельницы, так как ударная составляющая помола - это, прежде всего, масса и скорость «бросания» шаров.

Механизм «бросания» мелющих тел в шаровой мельнице достаточно хорошо изучен, и большинство вышеперечисленных факторов работают на интенсификацию именно ударного воздействия. Вращение корпуса мельницы увлекает шары, которые, поднявшись на некоторую высоту, отрываются от стенки и падают вниз. При этом шары падают не отвесно, а по параболе. После отрыва от стенки шар продолжает двигаться как тело, брошенное под углом к горизонту со скоростью равной скорости вращения барабана. Акт измельчения происходит в том случае, если кинетической энергии брошенного шара достаточно для преодоления внутренних связей в частицах материала. Чем больше энергия шара, тем выше и его размольная мощность.

Так как масса шара постоянная, увеличение его кинетической энергии возможно, только за счет повышения скорости ►

вращения барабана. Однако сам принцип работы шаровой мельницы исключает такую возможность, как только действующие центробежные силы начинают сильнее прижимать мелющие тела к стенкам барабана, падение шаров, а значит и помол, прекращаются. Поэтому главной задачей расчета параметров шаровой мельницы является определение критической скорости вращения барабана. Если она выбрана верно, достигается большая высота подъема и скорость «бросания» шаров, если нет - процесс измельчения резко замедляется, а энергозатраты мельницы возрастают. Но центробежная составляющая ставит предел максимально допустимой скорости вращения барабана, а значит, эффективность тонкого помола с использованием шаровых мельниц не может быть существенно увеличена, что в свою очередь вызывает необходимость в изыскании таких способов диспергирования, где ударная составляющая была бы реализована в максимально полном объеме.

#### РАЗНООБРАЗИЕ ВАРИАНТОВ И ОТСУТСТВИЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ

В настоящее время разработана большая номенклатура аппаратов измельчения свободным ударом. Однако в крупнотоннажном производстве нашли применение только ударно-отражательные дробилки, серьезно потеснив, а в некоторых областях и практически полностью заменив, «тихоходные» агрегаты дробления. Ударные мельницы же, несмотря на безупречность теоретических посылов для их создания, не могут похвастаться подобными успехами, сферой их применения является относительно грубый помол мягких материалов до размеров частиц в 100 мкм, с невысокой производительностью и относительно большими затратами энергии. Редкие исключения, когда рассматриваемые машины все же используются для помола мягких, малоабразивных материалов только лишь раз указывают на серьезные проблемы технической реализации принципов ударного диспергирования.

Даже спустя десятилетия научных исследований, экспериментов, масштабных испытаний, модернизаций и улучшений современных мельниц свободного удара, используемые в производстве высокодисперсных порошков ( $Sud \geq 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), не имеют существенных преимуществ перед шаровыми мельницами ни по одному из ключевых показателей. Напротив, попытки промышленного использования наиболее ярких представителей быстроходных машин ударного диспергирования: струйных и вихревых мельниц, дезинтеграторов и дисмембраторов выявили целый ряд их серьезнейших недостатков.

В частности, расход энергии центробежной мельницы при помоле цементного клинкера до удельной поверхности  $2500 \text{ см}^2/\text{г}$  превышает 200 кВт на тонну, что почти в десять раз больше, чем затрачивают многокамерные шаровые мельницы, используемые в производстве цемента [5]. Не приходится удивляться и весьма низкой технической надежности вихревых, центробежных, а также подобных им быстроходных мельниц, учитывая высокую скорость движения помольных элементов, находящихся в постоянном контакте с материалами различной степени абразивности.

Струйные мельницы характеризуются также большим расходом энергии, который дополняется и относительно быстрым износом деталей, контактирующих с измельчаемым материалом, высокой сложностью самого агрегата, а также его периферии. Так как размольная мощность струйных мельниц не велика, получение высокодисперсных порошков возможно только в замкнутой схеме помола при интенсивной циркуляции материала. В некоторых случаях эта циркуляция в десятки раз превосходит производительность самой мельницы. Дополнительные сложности применения струйных мельниц создает необходимость очистки больших объемов отходящего воздуха и неизбежный унос наиболее высокодисперсной фракции материала с отработанным носителем.

Из перечисленных агрегатов дезинтегратор является примером, пожалуй, наиболее успешной реализации ударного измельчения твердых материалов. Существует обширный опыт промышленного использования дезинтеграторных мельниц-активаторов в производстве оригинального строительного материала — силикальцита, получаемого путем совместного помола извести и кварцевого песка [6]. Однако применение быстроходных дезинтеграторов ограничено относительно грубым помолом. Получение порошков с удельной поверхностью до  $2000 \text{ см}^2/\text{г}$  включительно можно считать естественным пределом для данного вида оборудования. Предпринимаемые попытки увеличения размольной мощности дезинтеграторов за счет большей частоты вращения помольных органов вызывают ускоренный износ последних, уменьшая и без того небольшие сроки безремонтной эксплуатации (Рис.2).

Для того, чтобы понять, почему применение измельчителей ударного действия сегодня ограничено только грубым помолом мягких материалов, необходимо пересмотреть способы реализации ударного разрушения твердого тела с позиции основных законов Ньютоновской механики: инерции, действия и противодействия. Именно здесь и скрывается ответ на вопрос: почему ударные

дробилки успешно используются во всем мире, а мельницы свободного удара, так и не реализовав и малой части своих потенциальных возможностей, нашли очень ограниченное применение.

#### СКОРОСТЬ, МАССА, РАЗМЕР

В мельницах ударного действия разрушение частиц материала происходит вследствие ударных нагрузок. Эти нагрузки могут возникнуть в самых разнообразных условиях и обстоятельствах. Например, при падении мелющих тел, при столкновении летящей частицы с неподвижной преградой или, напротив, столкновения мелющих тел с неподвижной или движущейся частицей, также возможны и взаимные соударения частиц в полете. Но в любом случае кусок материала или само мелющее тело должно обладать таким количеством кинетической энергии, которой хватило бы для преодоления внутренних связей между частицами.

При ударном измельчении разрушающий эффект зависит от массы тела и его скорости. Кинетическая энергия тела в момент удара определяется по известной формуле:  $E = m \cdot V^2 / 2$ , где  $m$  - масса тела, а  $V$  - его скорость. Чем больше вес куска материала и выше его скорость, тем эффективней работа ударного диспергирования. Если уменьшить массу тела, для достижения тех же результатов измельчения нужно увеличить его скорость и наоборот, но в любом случае недостаток одного должен компенсироваться избытком другого - это основа способа измельчения ударом.

Несмотря на все разнообразие конструкций измельчительных машин ударного действия, механика разрушения твердого тела различается лишь некоторыми нюансами, что хорошо прослеживается на примере центробежной мельницы и ударно-отражательной

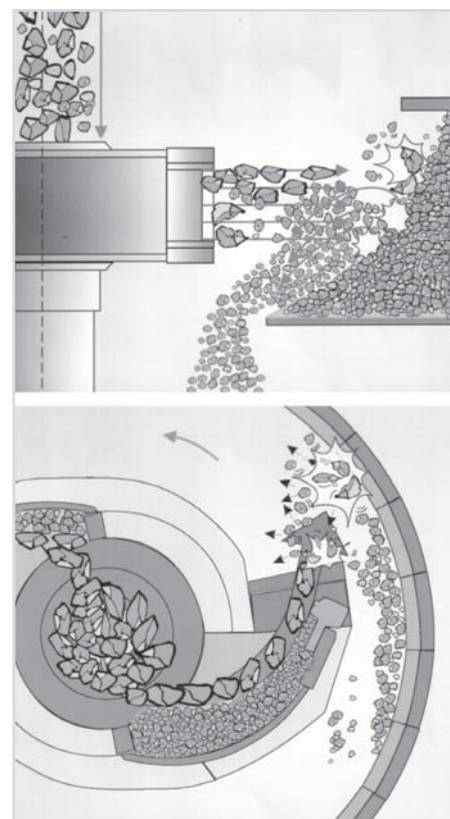


Рис. 3 Движение материала в ударно-отражательной дробилке

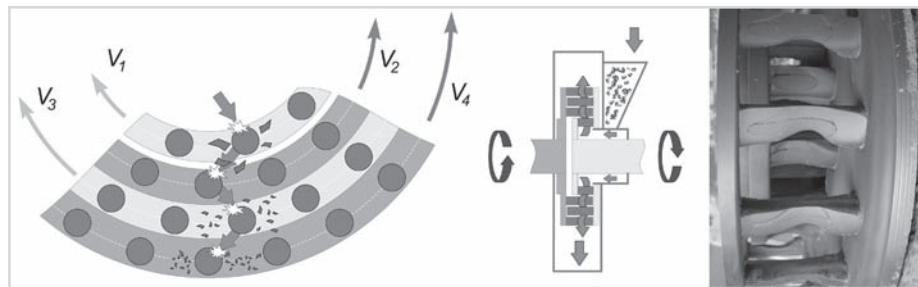


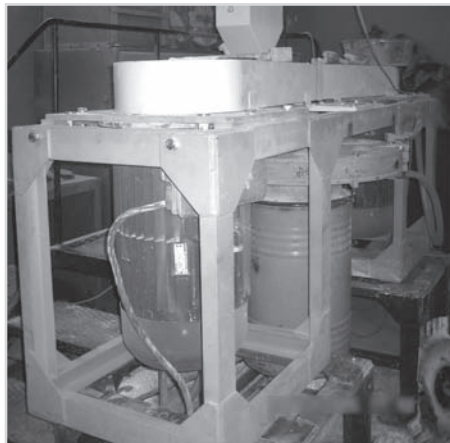
Рис. 2 Схема движения материала в дезинтеграторе и последствия абразивного износа стержней

дробилки. В последней материал, подлежащий измельчению, подается на быстро вращающийся ротор-ускоритель, частицы приобретают скорость, равную скорости ротора, и выбрасываются в пространство помольной камеры, их разрушение происходит при ударе об отражательные плиты и столкновении друг с другом в полете (Рис.3).

В ударно-отражательных дробилках материал после столкновения с преградой практически сразу выводится из агрегата, а в центробежных мельницах часть материала отправляется на дополнительное измельчение. Частицы, ударившись о препятствие, отскакивают от него, возвращаются к ротору-ускорителю, снова отбрасываются им. Таким образом, цикл может повторяться до тех пор, пока частицы не достигнут требуемых размеров и не будут выведены из мельницы.

Ударно-отражательные дробилки, выпуск которых налажен такими известными производителями измельчительного оборудования как: «BHS sonthofen», «Barmak Associates», «Sandvic», «Krupp», позволяют получать продукт высокого качества с меньшими затратами. Однако по мере изменения массы частиц, характер их взаимодействия с рабочими органами измельчительной машины кардинально меняется.

Одной из особенностей измельчения свободным ударом является тот факт, что разрушение материала происходит по наиболее слабым связям, дефектам структуры в местах соединения кристаллов, зерен, слоев и т.д. В производстве фракционированного щебня или искусственного песка это несомненное преимущество, так как продукт ударного дробления представлен зернами изометрической формы без внутренних дефектов с небольшим содержанием переизмельченного продукта. В тоже время для



**Рис.4** Вихревая мельница и ее ротор.  
Преобладающий способ измельчения в таком агрегате - истирание

получения большей тонины помола, упрочнение частиц которое происходит вместе с уменьшением их размеров, создает дополнительные трудности.

В определенный момент, когда структурная прочность каждой отдельной частицы достигает своего максимума, а ее масса ничтожно мала, свободный удар практически полностью замещается истиранием. Ротор центробежной мельницы перестает выполнять функцию ускорителя и работает скорее как завихритель материаловоздушных потоков (Рис. 4). Увлекаемые к стенкам помольной камеры крупные частицы вытесняют более мелкие, которые, перемещаясь от периферии к центру, измельчаются исключительно за счет взаимного истирания в турбулентных потоках.

Если судить по расходу энергии на образование единицы новой поверхности твердых материалов - это один из самых неэффективных способов измельчения.

#### РАЦИОНАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ, СПОСОБ

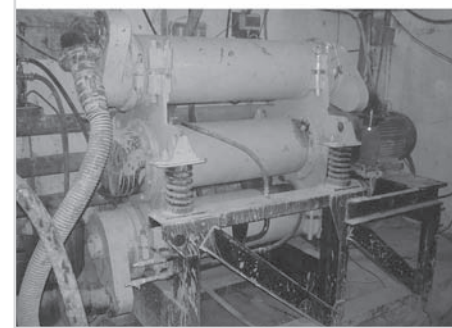
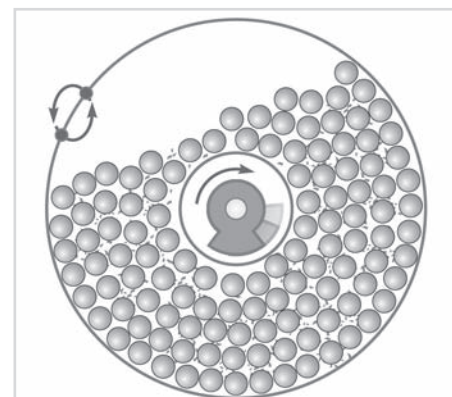
Совершенно очевидно, что для поддержания высокого уровня эффективности ударного диспергирования кинетическая энергия мелющих тел, кусков, зерен, частиц и т.д. не должна уменьшаться. Данное условие ставит под сомнение саму возможность промышленного использования эффекта самоистирания твердых материалов ( $\geq 3$  по шкале Мооса) в производстве высокодисперсных порошков ( $S_{уд} \geq 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), так как расход энергии в этом случае в десятки раз превышает общепринятые нормы. Естественно, это вовсе не означает, что ударное измельчение ограничено диспергированием только мягких, непрочных, малоабразивных веществ, напротив, приведенные факты только указывают на необходимость создания других типов мельниц, способных реализовать все преимущества разрушающего удара.

Интенсификация механического диспергирования возможна только за счет увеличения работы мелющих тел, масса которых серьезно не меняется в течение всего процесса. Данное условие отчасти реализуется в вибрационных, планетарных и центробежно-эллиптических шаровых мельницах, используемых в настоящее время для тонкого помола минерального сырья. Принцип действия этих машин основан на интенсивном побуждении мелющих тел, когда взамен сил гравитации, вызывающей падение шаров, используется инерция, центробежные силы и т.д.

Вращение вала вибратора, а за ним и самого корпуса мельницы заставляет мелющие тела совершать движения в соответствии с величиной эксцентриситета или радиуса водила. Передача энергии мелющей загрузки осуществляется через корпус мельницы. Под действием инерции, центробежных сил, знакопеременных нагрузок шары внутри корпуса движутся по сложной траектории, прижимаются к стенкам барабана, ударяются друг об друга, а также о частицы измельчаемого материала, разбивая, раздавливая и перетирая их (Рис.5).

Минусом данного способа является техническая сложность его реализации. Целый ряд конструктивных и технологических недостатков вибрационных и аналогичных им

мельниц препятствует созданию машин, в которых высокая эффективность помола сочеталась бы с технической надежностью оборудования. Трудности уравнивания массивных движущихся частей, разрушающее воздействие вибрации и большие ударные нагрузки, сложная кинематика привода барабана - все эти факторы самым негативным образом сказываются на надежности и безотказности агрегатов. В настоящее время вибрационные и подобные им мельницы в основном используются в качестве лабораторного и полупромышленного оборудования, позволяющего осуществлять тонкий и особо тонкий помол минерального сырья с производительностью до 500 кг/ч. В крупнотоннажном производстве данные мельницы широкого применения не нашли.



**Рис. 5** Вибрационная мельница и схема ее работы

Однако в данном случае проблему масштабирования процесса следует отнести не к реализуемому способу измельчения, а скорее к его аппаратному обеспечению. Уже тот факт, что более интенсивное побуждение шаров позволило выйти на новый уровень механического диспергирования указывает на перспективность данного направления. Основной вопрос заключается только в выборе наиболее рационального способа сообщить мелющим телам достаточно высокую скорость.

Но увеличить работу мелющей загрузки возможно и не приводя в движение весь корпус мельницы, а, например, разогнав только относительно легкий ротор-ускоритель, который и будет разбрасывать или «выстреливать» шары вместе с измельчаемым материалом. Ведь сообщить большую кинетическую энергию мелющим телам возможно как минимум двумя способами: или напрямую, разогнав в ускорителе шары вместе с измельчаемым материалом, или опосредовано, через корпус мельницы. При этом первый способ является более эффективным, так как энергия передается непосредственно действующему телу и объекту ►

разрушения, исключая передаточные звенья, а значит и дополнительные затраты.

### КИНЕТИКОС - ПРИВОДЯЩИЙ В ДВИЖЕНИЕ

Если в центр ротора-ускорителя вместе с материалом подать также и мелющие тела, преобладающим способом измельчения будет не раздавливание-истирание, а именно удар (Рис.6). Такую мельницу можно назвать ударно-шаровой, так как именно шар является действующим мелющим телом. Новая мельница, как и реализуемый ею способ измельчения, открывает совершенно новые возможности диспергирования твердых тел, позволяя серьезно пересмотреть существующую практику получения порошкообразных материалов.

Удачно сочетая преимущества «классических» шаровых и быстроходных центробежных мельниц, ударная шаровая мельница демонстрирует наибольшую в классе степень измельчения, техническую надежность, возможность проведения полного спектра механохимических реакций и превращений. Ее основным отличием от рассмотренного выше оборудования является высокая эффективность на всех стадиях измельчения, от мелко-го дробления до сверхтонкого помола.

Большая размольная мощность ударно-шаровой мельницы обеспечивает и це-

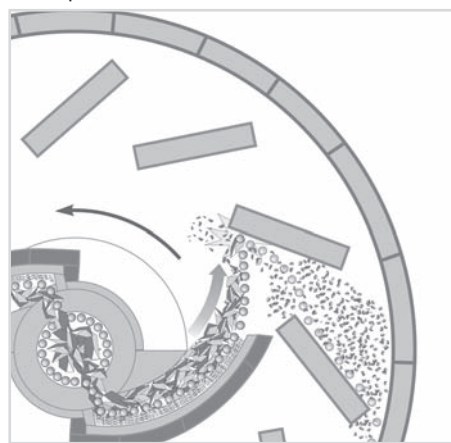


Рис. 6 Принцип действия и вид помольной камеры ударной шаровой мельницы «Трибокинетика»

лый ряд дополнительных преимуществ в создании участков дробления-помола за счет сокращения единиц оборудования, задействованного в процессе. Если крупность питания вибрационных мельниц обычно не превышает 3-5 мм, «Трибокинетика» загружается кусками материала размерами до 70 мм включительно. Так как их масса достаточно высока, покидая ротор-ускоритель со скоростью порядка 40-60 м/с, крупные куски разрушаются при ударе об отражательные плиты статора мельницы. С уменьшением размеров частиц их дальнейшее измельчение происходит в результате ударов шаров, кинетическая энергия которых составляет от 6 до 40 Дж (в зависимости от массы шара и скорости ротора), что вполне достаточно для разрушения самых прочных материалов, используемых в производстве порошков. Таким образом, на всех стадиях помола ударная составляющая не замещается истиранием, а значит и не теряет своей эффективности, изменяются только виды удара.

Так, при грубом помоле преобладающим

является свободный удар, когда материал разрушается по слабым слям и дефектам. По мере уменьшения размеров частиц их дальнейшее разрушение происходит в местах сосредоточения наибольших нагрузок, то есть в результате стесненного удара. С учетом наибольшей крупности питания степень измельчения в ударно-шаровой мельнице достигает 1000 и выше, что превосходит возможности практически всех существующих в настоящее время агрегатов тонкого помола. И эти впечатляющие результаты достигаются при относительно невысоких скоростях вращения ротора-ускорителя (от 1000 до 3000 об/мин), что положительно сказывается на ресурсе изнашивающихся частей, приводной части и общей надежности оборудования.

Но ударная шаровая мельница - это не только большая размольная мощность, но и прежде всего высокая экономичность измельчения. Ведь создание предельной концентрации энергии в ограниченном объеме помольной камеры не является самоцелью, эффективность тонкого помола определяется тем, на что расходуется большая часть подведенной энергии. При истирающем помоле это, прежде всего, нагрев, вибрация, создание паразитных воздушных и циркуляционных потоков, непродуктивное нагружение тонких фракций продукта помола и т.д. Ударная шаровая мельница практически полностью лишена перечисленных недостатков, даже воздушные потоки, образованные вращающимся ротором-ускорителем, используются максимально продуктивно.

Хорошо известно, что эффективность механического диспергирования, оцениваемая по оптимальному гранулометрическому составу порошка и минимальному удельному расходу электроэнергии, тем выше, чем быстрее и полнее выделяются из материала наиболее тонкие фракции, тормозящие процесс измельчения. В существующих мельницах процессы помола и классификации, как правило, разделены. То есть мельница состоит из отдельного измельчителя и устройства, где происходит разделение продукта помола на товарную фракцию и крупку, отправляемую на домол.

В новой ударно-шаровой мельнице процессы измельчения и разделения совмещены в одном устройстве - мельнице-классификаторе. Воздушные потоки захватывают частицы нужных размеров и выводят их из помольной камеры, улучшая тем самым условия работы мельницы. Таким образом, большая часть подведенной энергии расходуется именно на разрушение относительно крупных частиц, а не на повторное нагружение мелких.

Встроенный классификатор также позволяет изменять границу разделения, переключать систему на возврат крупки в замкнутых схемах измельчения или выдачу до трех фракций продукта помола в открытых схемах.

### ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Измельчение является основой большинства современных технологий и широко используется в самых различных областях материального производства. Знаковые достижения человеческой

цивилизации от хлебной муки до извести неразрывно связаны с процессами дробления и помола.

В век информационных технологий механическое диспергирование не только не утратило своего значения, но приобрело статус базового передела, результаты которого в конечном итоге и определяют основные свойства коммерческого продукта. Проблема рационализации процесса измельчения, как и создания новых типов мельниц, никогда еще не стояла так остро как в настоящее время. Сегодня реальная потребность в высокодисперсных порошках значительно превышает возможности «классических» мельниц тонкого помола, как в части себестоимости, так и качества продукта. При этом некоторые типы измельчительного оборудования практически полностью исчерпали резервы для серьезной модернизации.

Рост потребления порошкообразных материалов, в том числе субмикронной размерности, предъявляет все более жесткие требования не только к гранулометрическим характеристикам порошков, но также к форме отдельных частиц, структуре пограничных слоев, реакционной способности новообразованной поверхности, себестоимости помола и т.д. В этой связи показатели эффективности измельчения приобретают совершенно новое значение. И если при относительно грубом помоле расход или точнее перерасход энергии не превышает общепринятых норм, а ее доля в себестоимости конечного продукта незначительна, то производство высокодисперсных порошков, которое всегда связано с более высокими энергетическими затратами, попросту не может позволить себе использование недостаточно эффективных способов диспергирования. В противном случае самые прогрессивные технологии становятся пленниками устаревших взглядов, традиций и технических решений «времен Очаковских и покоренья Крыма...».

Конструкторские решения, использованные при создании ударно-шаровой мельницы, защищены патентами РФ. ■

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- П. М. Сиденко Измельчение в химической промышленности. – Москва: 1977, 365 с.
- В. И. Акунов О выборе оптимальных типов измельчителей. //Строительные материалы. 1962. №11, с. 21-22.
- А. Рулли, Х. Тедер Форма и характер поверхности зерен кварцевого песка в зависимости от способа помола и их влияние на фракционный способ при воздушной сепарации: В сб.тр. НИПИ силикатобетона. – Таллин: №6, 1971. с.103-118.
- А.В. Волженский Минеральные вяжущие вещества. – Стройиздат, 1986. с. 216-217.
- П. М. Сиденко Измельчение в химической промышленности. – Москва: 1977, 158 с.
- И. А. Хинт Основы производства силикальцитных изделий. – Госстройиздат, 1962.