

Г.А. Гурьянов, А.Е. Гульчеев

Восточно-Казахстанский государственный технический
университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Л.В. Янковский

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Россия

**АНАЛИЗ РАЗРУШАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ПРИ СВЕРХТОНКОМ УДАРНОМ
ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ**

С помощью анализа различных разрушающих воздействий обосновано применение удара для сверхтонкого измельчения твердых частиц в среде жидкости или газа. Проведена оценка эффективности основных разрушающих воздействий при измельчении частиц ударом. Сформулированы основные конструктивные принципы создания измельчителей ударного действия, позволяющие повысить эффективность процесса измельчения.

Ключевые слова: *измельчитель, ударное действие, эффективность, процесс измельчения, твердая частица.*

Процессы сверхтонкого измельчения, протекающие в среде жидкости или газа, являются важнейшей составляющей многих технологий, таких как производство различных материалов, топливоприготовление, измельчение частиц механических загрязнений в рабочих жидкостях гидроприводов машин и др. Однако существующие измельчители плохо справляются с задачей получения высокодисперсных частиц размером до 3 мкм и менее. Это требует совершенствования существующих и создания новых конструкций измельчителей, а также совершенствования теоретических моделей, на которых базируется конструирование измельчителей.

Рассмотрим преимущественно механическую основу процесса измельчения, поскольку в настоящее время она является главенствующей для процесса, практически единственной при измельчении частиц

в среде газа и причиной для возникновения различных дополнительных гидравлических явлений при измельчении механических частиц в жидкости.

Основная идея данной работы заключается в следующем. Считается, что при сверхтонком измельчении материала с ростом дисперсности частиц наиболее целесообразно применять истирающие и раздавливающие воздействия [1–4]. Однако, по нашему мнению, вне зависимости от дисперсности частиц может сохранять свою эффективность и ударное разрушение. Поэтому необходимо правильно определить целесообразные для сверхтонкого измельчения частиц механические воздействия.

Академик П.А. Ребиндер на основе открытого им явления динамического понижения прочности тел считает, что измельчение тонкодисперсных частиц необходимо осуществлять деформированием их высокочастотными знакопеременными воздействиями, например, истирающими и раздавливающими [5]. Однако простой анализ механических воздействий показывает, что мелкодисперсное измельчение частиц раздавливанием, истиранием, раскалыванием и изломом без контакта рабочих органов между собой осуществить очень трудно вследствие их малых размеров, а это приводит к интенсивному износу рабочих органов, повышению температуры в зоне контакта и к другим негативным эффектам. Кроме того, оказать названные виды воздействий на частицы, взвешенные в жидкости или газе, весьма затруднительно.

Ударное же воздействие может осуществляться как по частицам, находящимся на твердой поверхности, так и по взвешенным в жидкости или газе, и его эффективность не зависит от размеров частиц, причем эффективность и энергонасыщенность ударного разрушения не присуща больше ни одному виду разрушающего воздействия. Следуя идеям академика П.А. Ребиндера, при измельчении ударным воздействием также можно создать высокочастотные знакопеременные нагрузки, причем, гораздо большие по величине, чем при истирании, т.е. ударное разрушение частиц при определенной организации процесса, может сохранять свою эффективность и при росте их дисперсности.

Некоторое подтверждение правильности проведенного краткого анализа разрушающих воздействий дает и сравнение работы различных машин для измельчения, которое показывает, что на измельчение материала истиранием, например, в наиболее распространенных шаро-

вых мельницах расходуется всего до 10 % подводимой энергии, а 90 % тратится на деформации, нагрев и износ рабочих органов, и это при непропорционально высокой мощности и металлоемкости и малом количестве воздействий на частицу в единицу времени [6, 7]. Напротив, способ тонкого помола ударом обладает рядом преимуществ: очень большое число воздействий на частицу за время ее нахождения в помольной камере, малое время помола, гораздо меньший износ рабочих органов и футеровки мельницы, относительно большая степень измельчения, независимость воздействия на частицу от ее размера [6, 7]. Эти качества позволяют создавать условия для помола частиц даже размером в несколько микрон.

Эти преимущества машин ударного действия перед истирающими можно объяснить тем, что в машинах ударного действия все воздействие рабочих органов направлено только на материал, что соответствует и результатам проведенного выше анализа разрушающих воздействий. При возрастании тонины помола это различие в характеристиках также будет возрастать, а значит, при увеличении степени измельчения и тонкости помола использование машин ударного действия может стать более предпочтительным. На основании вышеизложенного, способ тонкого помола методом истирания нельзя признать оптимальным, в то время как динамический удар может являться наиболее эффективным способом тонкого помола материалов, позволяющим снизить мощность оборудования, увеличить производительность, достигнуть высокого качества помола.

Таким образом, основным разрушающим воздействием для сверхтонкого измельчения частиц может быть принято высокочастотное знакопеременное ударное нагружение, сопровождаемое возникающими дополнительными воздействиями, которые также могут внести свой вклад в процесс разрушения частиц [8]. При анализе работы измельчителей ударного действия установлено, что основное ударное разрушение частиц может дополняться такими воздействиями, как раскалывание, срез и разрыв.

Рассмотрим механические модели основных разрушающих воздействий при измельчении частиц ударом для оценки их эффективности.

Введем некоторые допущения: частица имеет форму шара; при деформации смятия разрушенный материал полностью удаляется с частицы, не влияя на ход разрушения; частица взаимодействует с не-

деформируемым рабочим органом, который относительно массы частицы принимается бесконечно тяжелым; при гашении скорости во время удара ускорение замедления считаем постоянным.

Рассмотрим механическую модель разрушения частиц чистым ударом.

Удар является основным разрушающим воздействием. Причина эффективности процесса ударного разрушения заключается в том, что большие значения сил (F , Н), возникающих при ударе, есть следствие развиваемых телом чрезвычайно высоких ускорений замедления (a , м/с²), являющихся следствием малости времени (t , с), в течение которого длится взаимодействие:

$$m(v - v_0) = Ft,$$

откуда

$$F = m \frac{(v - v_0)}{t} = ma,$$

где v и v_0 – соответственно, начальная и конечная скорости ударного взаимодействия, м/с.

Из этих формул следует, что при $v_0 = 0$ и $t \rightarrow 0$, $F \rightarrow \infty$.

Теперь рассмотрим процесс деформации шарообразной частицы при ее ударе о плоскую поверхность бесконечной массы, который можно условно разделить на четыре стадии (рис. 1).

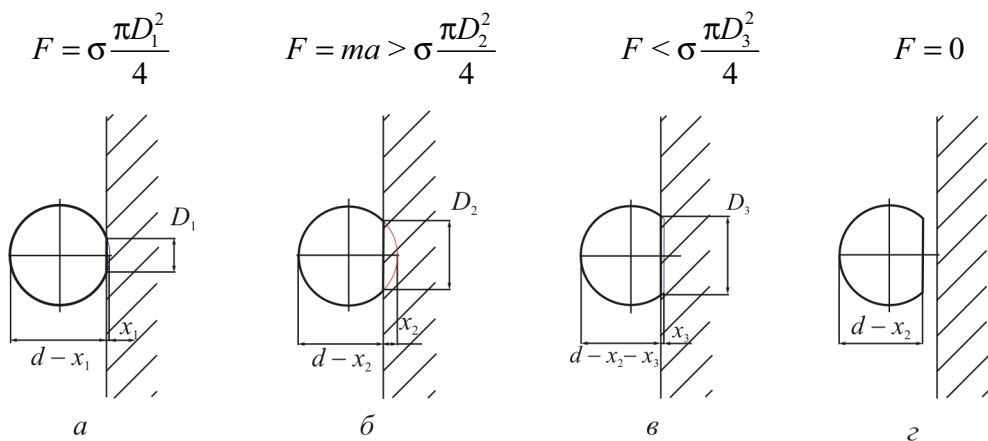


Рис. 1. Этапы деформации частицы при ударе

На первой стадии (рис. 1, *a*) частица со скоростью v соприкасается с поверхностью рабочего органа, начинается торможение частицы и она начинает упруго сжиматься. В точке контакта возникает нормальная к поверхности контакта сила, которая будет расти, пока не будет превышен предел прочности при смятии для материала частицы. После этого начинается вторая стадия (рис. 1, *б*) – разрушение материала. По мере разрушения частицы площадь поверхности контакта становится больше, а давление на нее падает. Разрушение длится, пока удельная нагрузка вновь не станет меньше предела прочности при смятии. Третья стадия (рис. 1, *в*) начинается, когда усилие, действующее на площадь контакта, снова станет меньше предельного, частица вновь начнет деформироваться упруго. На четвертой стадии (рис. 1, *г*) скорость частицы падает до нуля, происходит отскок частицы от поверхности удара за счет восстановления упругой деформации от остаточного усилия.

Согласно вышеприведенной механической модели разрушение частицы происходит путем последовательного откалывания от нее при каждом ударе рабочего органа малых объемов материала [8]. Поэтому, если знать объем материала, теряемого частицей при одном ударе, то можно математическим путем ориентировочно определить необходимое для измельчения частицы до требуемого размера количество воздействий на нее рабочего органа, которое сейчас определяется только экспериментально.

Разрушение частиц раскалыванием и срезом хотя и возможно, но их возникновение маловероятно вследствие малости размеров частиц, препятствующих появлению условий, необходимых для разрушения (например, достаточных плеч действия сил и т.п.). Поэтому можно считать, что эти воздействия на результат измельчения существенного влияния не оказывают, а потому в данной работе не рассматриваются.

Зато особый интерес представляет механическая модель разрушения частиц разрывом, который можно создать, приложив к ним центробежные силы. При этом получаются очень интересные результаты. Разрушение от действия центробежных сил (рис. 2) возникает в моменты, когда частица при взаимодействии с рабочим органом измельчителя получает касательный удар, приобретая при этом тангенциальное ускорение. При касательном ударе частицы о рабочий орган (рис. 2, *a*) момент от силы F проворачивает частицу относительно точки O (рис. 2, *б*), и она начинает вращаться относительно собственного

центра с весьма высокой скоростью, что вызывает в ее теле возникновение значительных центробежных сил, которые, будучи отнесенными к малому сечению частицы, формируют напряжения, превосходящие предел прочности материала на разрыв (растяжение), который, как правило, для хрупких материалов значительно ниже, чем предел прочности при сжатии, что и приводит к разрушению частицы (рис. 2, в) по условно принятому наиболее слабому сечению $h - h_1$, так, что площадь разрыва является площадью поперечного сечения частицы.

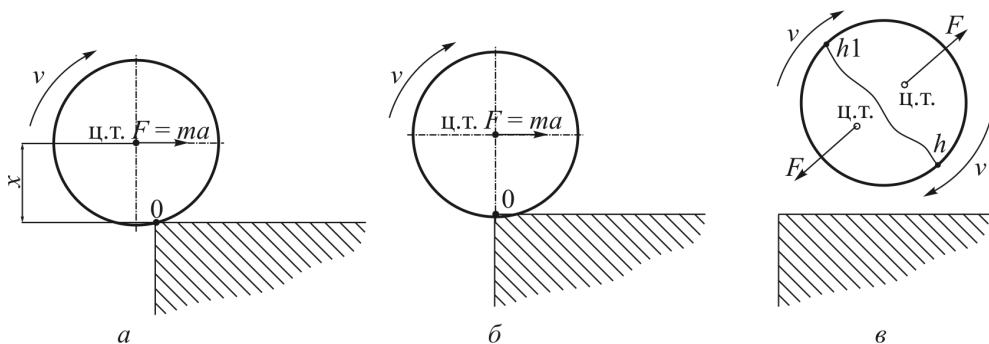


Рис. 2. Разрушение частицы от действия центробежных сил

Для случая разрушения разрывом от действия центробежных сил по известным формулам механики были рассчитаны скорости, необходимые для разрушения частиц материала со следующими параметрами: предел прочности на растяжение – 40 МПа, удельный вес – 2000 кг/м³, диаметр – от 0,1 до 1 мм. Результаты расчета представлены в таблице.

Как видно из таблицы, скорость рабочего органа, необходимая для разрушения частиц разрывом от действия центробежных сил, является постоянной для материала определенной прочности и удельного веса и не зависит от крупности частиц, а это значит, что, во-первых, при достижении рабочим органом этой скорости на нем, теоретически, могут разрушаться частицы любого размера, вплоть до долей микрона, а, во-вторых, регулировать степень измельчения можно простым изменением скорости рабочего органа, причем зависимость между степенью измельчения и скоростью известна (см. таблицу).

Ввиду вышеизложенного, разрушение частиц центробежным разрывом весьма перспективно и имеет большой потенциал для применения, хотя и является в настоящее время трудно осуществимым и в большей степени случайным процессом.

Результаты расчета разрушения разрывом от действия центробежных сил

σ , МПа	$d_{\text{част.}}$, мм	ρ кг/м ³	m , кг	$S_{\text{сеч. част.}}$, м ²	$F_{\text{разр.}}$, Н	Радиус центра тяжести r_1 , мм	Скорость вращения частицы на радиусе r_1 v_1 , м/с	Частота враще- ния частицы n , об/мин	Скорость вращения на поверхности частицы v , м/с
40	0,1	2000	$1,04667 \cdot 10^{-9}$	$7,85 \cdot 10^{-9}$	0,314	0,01875	173,21	88257365,99	461,88
	0,2		$8,37333 \cdot 10^{-9}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$	1,256	0,0375	173,21	44128683	461,88
	0,3		$2,826 \cdot 10^{-8}$	$7,065 \cdot 10^{-8}$	2,826	0,05625	173,21	29419122	461,88
	0,4		$6,69867 \cdot 10^{-8}$	$1,256 \cdot 10^{-7}$	5,024	0,075	173,21	22064341,5	461,88
	0,5		$1,30833 \cdot 10^{-7}$	$1,9625 \cdot 10^{-7}$	7,85	0,09375	173,21	17651473,2	461,88
	0,6		$2,2608 \cdot 10^{-7}$	$2,826 \cdot 10^{-7}$	11,304	0,1125	173,21	14709561	461,88
	0,7		$3,59007 \cdot 10^{-7}$	$3,8465 \cdot 10^{-7}$	15,386	0,13125	173,21	12608195,14	461,88
	0,8		$5,35893 \cdot 10^{-7}$	$5,024 \cdot 10^{-7}$	20,096	0,15	173,21	11032170,75	461,88
	0,9		$7,6302 \cdot 10^{-7}$	$6,3585 \cdot 10^{-7}$	25,434	0,16875	173,21	9806373,999	461,88
	1		$1,04667 \cdot 10^{-6}$	0,000000785	31,4	0,1875	173,21	8825736,599	461,88

Еще одним важным моментом для повышения эффективности процесса измельчения является соблюдение при создании измельчителей определенных конструктивных принципов. Так, можно рекомендовать разделение зоны измельчения на контуры, обладающие разной энергией измельчения, в каждом из которых измельчаются частицы наиболее подходящей для него крупности.

Непредсказуемым процессом до сих пор является достижение частицей требуемой крупности за время пребывания в измельчителе. Поэтому, если нельзя гарантированно измельчить частицу до нужной крупности на одной ступени измельчителя, а держать ее в зоне измельчения дольше некоторого времени нельзя, например, по условиям производительности, тогда можно создать на пути частицы столько воздействий (ступеней), сколько необходимо для ее гарантированного измельчения, что можно примерно рассчитать на основании вышеприведенных теоретических положений.

В общем случае создание современных измельчителей ударного действия должно опираться на следующие общие принципы: высокая скорость рабочих органов (бил); высокое энергонасыщение всего объема измельчителя и многократное воздействие на частицы в единицу времени; измельчающее воздействие, гарантирующее измельчение частиц до необходимой крупности; возможность раздельного измельчения частиц разной крупности; обеспечение интенсивного движения измельченных частиц в объеме измельчителя; обеспечение дополнительных сдвиговых и разрывающих воздействий на измельчаемые частицы.

Изложенные принципы создания и совершенствования измельчителей реализованы в конструкции измельчителя (рис. 3), разработанного на кафедре «Технологические машины и оборудование» Восточно-Казахстанского государственного технического университета (Инновационный патент РК №24530).

По итогам работы можно сделать следующие основные **выводы**:

1. Существующие измельчители плохо справляются с задачей получения высокодисперсных частиц, что требует выработки новых принципов их создания и совершенствования.

2. Основными разрушающими воздействиями при сверхтонком измельчении твердых частиц являются высокочастотные знакопеременные воздействия, которые могут быть получены в результате определенным образом организованного ударного воздействия, сопровождающегося раскалыванием, срезом и разрывом от действия центробежных сил.

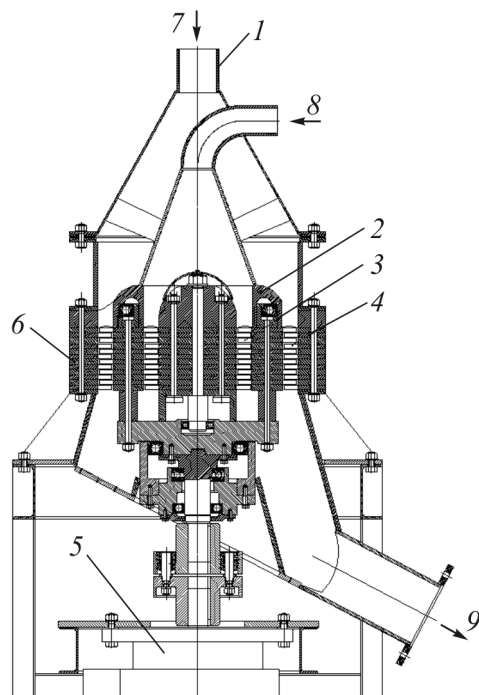


Рис. 3. Двухконтурный измельчитель ударно-сдвигового действия: 1 – сепарационный колпак; 2 – статор; 3 – внутренний контур измельчения; 4 – внешний контур измельчения; 5 – электродвигатель; 6 – корпус; 7, 8 – патрубки для подвода материала; 9 – отвод измельченного материала

3. Выработаны универсальные базовые принципы создания измельчителей ударного действия: высокое энергонасыщение объема измельчителя; многократность воздействия на измельчаемую частицу в единицу времени; многоступенчатое измельчение; раздельное измельчение частиц разной крупности и др., которые могут быть использованы при создании измельчителей различного назначения.

Список литературы

1. Лозовая С.Ю. Исследование рабочего процесса мельницы с деформируемой помольной камерой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 1997. – 24 с.
2. Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике. – М.: Наука, 1990. – 240 с.
3. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1972. – 239 с.

4. Ходаков Г.С. Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 307 с.
5. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика: Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
6. Строительные машины и монтажное оборудование: учеб. для студ. вузов / Мартынов В.Д. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
7. Бауман В.А., Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: учеб. для строит. вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1981. – 324 с.
8. Сергеев К.Ф. Хрупкое разрушение твердых тел. – Владивосток, 1989. – 241 с.

Получено 28.02.2012