

УДК 666.3.022.41 : 621.926.3/9

А. К. Гавриленя, В. А. Дремук, И. А. Богданович

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи

МНОГОСТАДИЙНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОЛИКО-КОЛЬЦЕВЫХ МЕЛЬНИЦ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

Предложены математические модели оценки удельных энергозатрат и условий измельчения материалов, на базе которых обоснована эффективность многооперационного измельчения, последовательно выполняемого различными способами силового воздействия на материал.

Разработана многооперационная проходная мельница центробежного типа, обеспечивающая тонкое измельчение материалов при сравнительно низких удельных энергозатратах.

Ключевые слова: измельчение, твёрдые материалы, мельница, эффективность, энергоёмкость.

Введение. Процесс измельчения является основой для переработки вторичных ресурсов и отходов производства в целях получения из них качественных кондиционных продуктов и для создания практически безотходных технологий. С увеличением тонины помола повышается поверхность контакта веществ, возрастает скорость растворения материалов, сокращается продолжительность схватывания и увеличивается прочность вяжущих материалов [1], [2], [3].

Разнообразие способов измельчения обусловлено различием свойств обрабатываемого материала, исходными $d_{\text{н}}$ и конечными $d_{\text{к}}$ размерами его частиц и другими требованиями к качеству продукции. Сложность протекающих при измельчении физико-химических процессов предопределила использование различных подходов и моделей их теоретического исследования, обобщённые результаты которых позволяют принимать обоснованные решения при проектировании и выборе конструкции измельчающих устройств. Поэтому совершенствование помольного оборудования, применение более эффективных и экономичных способов измельчения являются актуальной задачей.

Основная часть. В результате силового взаимодействия с размольными телами и между собой частицы измельчаемого материала испытывают упругую, а затем пластическую деформацию до разрушения на более мелкие частицы. Многократность этого взаимодействия обуславливает наклёп, образование и развитие в материале частиц микро- и макродефектов, что приводит к их разрушению при контактных и внутренних напряжениях, превышающих предел прочности. Удельная энергоёмкость процесса измельчения определяется при этом материалом частиц, состоянием их поверхности, рациональностью способа и конструкции размольного устройства, степенью измельчения (отношения размеров частиц до и после измельчения) и многими другими факторами. При этом с уменьшением размеров частиц удельная энергоёмкость их измельчения возрастает, и по достижению размеров d_0 , минимальных для конкретных материалов, способов и условий процесса, измельчение прекращается. Вследствие насыщения избыточной энергией в высокодисперсных порошках с размерами частиц, близкими к d_0 , возможен обратный процесс — гранулирование частиц, а в случае смесей разных по составу порошков может происходить их химическое взаимодействие с образованием твёрдых растворов и соединений.

Для уменьшения энергозатрат и повышения дисперсности продуктов измельчения эффективно использование последовательно изменяющихся способов и средств размола (например, сначала ударного, а затем истирающе-раздавливающего действия). Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований даёт основание моделировать зависимость удельной энергоёмкости измельчения n_3 от размеров частиц порошка $d_{\text{к}}$ дробной рациональной функцией

$$n_3(d_{\text{к}} - d_0) = E_3 = 0,5C_3^2, \quad (1)$$

где E_9 — параметр, зависящий от свойств и состояния материала, способа, режима и условий процесса измельчения;

C_9 — наименьшее расстояние от центра координат до гипербол (рисунок 1), описываемых функцией (1).

Так, например, для измельчения порошка с начального размера частиц d_n до размера d_k следует учитывать, что по способу, описываемому кривой 1 (см. рисунок 1), невозможно измельчение материала до размера частиц d_k . Для достижения требуемой степени размола (d_n/d_k) и размера частиц d_k необходимо использовать измельчитель с другим механизмом и режимом силового воздействия на материал, например, описываемый кривой 2. При этом с точки зрения возможностей и удельных энергозатрат целесообразно проводить измельчение до размеров частиц $\sim d_{k1}$ по способу, описываемому кривой 1, а затем — по способу, описываемому кривой 2, обеспечивающему возможность получения порошка требуемой дисперсности d_k с общими удельными затратами энергии, равными сумме проекций дуг a_1b_1 и a_2b_2 на ось ординат. Очевидно (см. рисунок 1), что удельные энергозатраты можно уменьшить при использовании измельчителя, описываемого кривой 3. При этом во втором измельчителе целесообразно проводить измельчение до размеров частиц d_{k2} . Тогда общие удельные энергозатраты будут равны сумме проекций на ось ординат дуг a_1b_1 , a_2b_2 и a_3b_3 , меньшей предыдущего варианта, а следовательно, с меньшими затратами энергии.

По характеру воздействия на измельчаемый материал ролико-кольцевые мельницы [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], вследствие однонаправленной кривизны размольных тел (кольца и расположенных в нём роликов), обеспечивают захват материала — кусков или слоя порошка, не допустимых по условию их обжатия и предельного уплотнения в валковых мельницах. Во избежание заклинивания прижим роликов к кольцу и измельчаемому материалу осуществляют через упругие элементы (пружинный механизм) или центробежными силами выполненными в виде втулок размольных тел, свободно насаженных на оси вращающегося в кольце ротора. Сравнительно невысокие технологические усилия при этом компенсируются многократным воздействием размольных тел на материал, позволяя получать высокодисперсные порошки из твёрдых и сверхтвёрдых материалов.

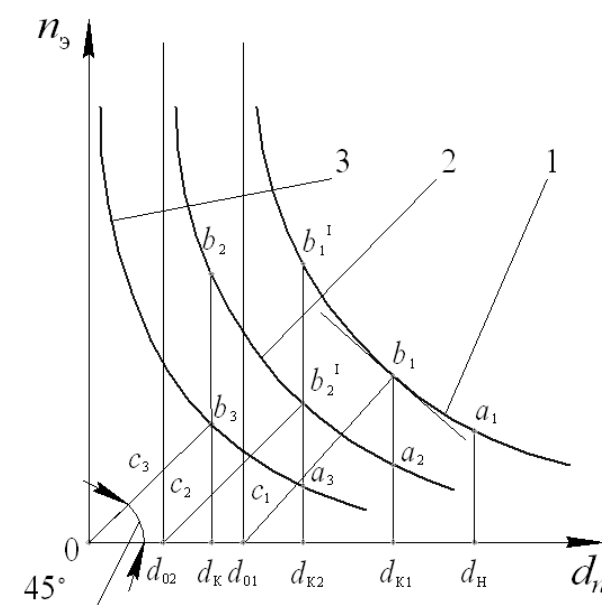


Рисунок 1 — Зависимость удельной энергии измельчения от размера частиц материала

Очевидно, что повышения интенсивности измельчения в роliko-кольцевых мельницах можно достигнуть предварительной обработкой материала, вызывающей не только его измельчение и уменьшение поля рассеяния размеров его частиц, но и снижение их прочности и деформационной способности за счёт наклёпа и образования в них микро- и макродефектов, облегчающих измельчение частиц при их дальнейшей обработке. Контрастным раздавливающему механизму разрушения и измельчения представляется ударное воздействие размольных тел, реализуемое в дезинтеграторах и дисмембраторах [1], [8].

Для реализации сначала ударного воздействия, а затем раздавливающего с элементами ударно-истирающего в одном устройстве, разработана конструкция многооперационной роliko-кольцевой мельницы (рисунок 2).

Рассмотрим чертёж роторной головки (рисунок 3), состоящей из корпуса 1, закрытого сверху фланцем 2 с дозирующей материал воронкой 3, снизу — фланцем 4 со ступицей и подшипниками 5. В корпусе соосно с ним установлен ротор, на консольных шейках вала 6 которого закреплены шкив 7 и два диска 8 и 9 со шпильками 10 между ними. На шпильках свободно насажены размольные тела, выполненные в виде спиральных пружин и втулок 11. На верхних фланце 2 и диске 8 по концентрическим окружностям установлены пальцы 12 и 13. К нижнему диску прикреплены лопатки 14, на уровне которых в корпусе 1 выполнено отверстие с патрубком. В верхнем фланце 2 находятся предназначенные для поступления в корпус воздуха и подачи технологической жидкости отверстия, заглушенные болтом 15. Выполненная на корпусе проточка закрыта кожухом 16 со штуцерами для подачи и удаления охлаждающей корпус воды.

Мельница работает следующим образом. При включённом электродвигателе и вращающемся роторе через дозирующую воронку 3 непрерывно подаётся подлежащий размолу материал, который верхним диском 8 отбрасывается к внутренней поверхности корпуса, при этом попадает под ударное воздействие пальцев 12 и 13, вызывающее разрушение и дробление частиц. Создаваемый лопатками 14 поток воздуха вовлекает обрабатываемый материал в зону действия размольных тел — пружин и втулок. При этом материал перемещается по винтовой спирали вниз к выходному отверстию с патрубком, подвергаясь многократному ударно-истирающему воздействию со стороны пружин и втулок, которые центробежными и действующими со стороны шпильки силами прижимаются к рабочей поверхности корпуса. Поток воздуха, создаваемый лопатками, продукты размолу удаляются через отверстие и патрубок в систему их улавливания.



Рисунок 2 — Фотоснимок мельницы RTM4

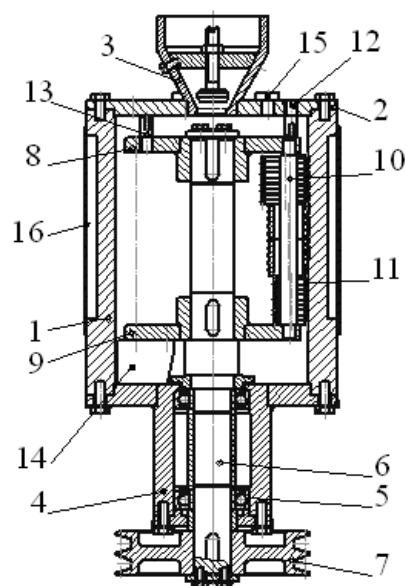


Рисунок 3 — Роторная головка мельницы RTM4

Интенсивность и степень размола регулируются подбором количества, размеров и массы размольных тел (пружин и втулок).

Для определения технических возможностей разработанной мельницы проведены эксперименты измельчения в ней разных материалов. Измельчение проводили при загрузке ротора размольными телами — пружинами (15 шт.) и втулками (12 шт.) общим весом 2,5 кг и без них (измельчение только пальцами верхних диска и фланца). Подачу материала осуществляли непрерывно через дозирующую воронку, обеспечивающую производительность около 30 кг / ч.

Приведены результаты измельчения за один проход бутылочного стекла и кварцевого песка (таблица 1). Установлено (см. таблицу 1), что на первом этапе измельчения пальцами (по схеме дисмембратора) происходит дробление преимущественно крупных частиц стекла и, в меньшей степени, более прочного кварцевого песка. При полной загрузке размольными телами почти 50% порошка стекла после первого прохода имеют размер частиц менее 0,05 мм, а песка — 0,10 мм. Визуальный, с помощью инструментального микроскопа, анализ показал, что фракции с размерами частиц менее 0,05 мм в значительной части состоят из частиц размером от 20 до 4...6 мкм. Второй и третий проходы измельчения приводят к увеличению за один проход высокодисперсных составляющих (менее 0,05 мм) на 10...15%. О высокой поверхностной активности продуктов измельчения свидетельствует значительное (на 70...80%) уменьшение их насыпной плотности и увеличение угла естественного откоса при полной потере текучести.

Мощность привода мельницы на холостом ходу составляет ~1,2 кВт, под нагрузкой — 1,7...1,8 кВт (1 проход). Расчёты показали удельную энергоёмкость размола, составляющую 36...40 кВт · ч / т.

При вращении ротора без размольных пружин и втулок мощность привода составляла ~0,3 кВт. При подаче в мельницу кварцевого песка мощность увеличилась до 0,4 кВт, а при подаче бутылочного стекла составила 0,5 кВт.

Продукты измельчения успешно апробированы в качестве присадок в производстве износостойких красителей и полимеров, в частности, при модификации их в кремнеорганические соединения.

Также определены возможности повышения эффективности измельчения материалов путём подбора оптимальной производительности и угла наклона ротора ролико-кольцевой мельницы центробежного типа (таблицы 2 и 3).

Установлено, что при производительности более 36 кг / ч энергоёмкость процесса значительно повышается, что снижает эффективность измельчения материала. Так, при повышении производительности с 36 до 38 кг / ч наблюдалось снижение содержания фракции менее 0,1 мм на 2,5%.

Т а б л и ц а 1 — Результаты экспериментов по размолу в мельнице RTM4

В процентах

Содержание	Размер фракции, мм									
	–0,050	–0,100...+0,050	–0,160...+0,100	–0,200...+0,160	–0,315...+0,200	–0,630...+0,315	–1,000...+0,630	–1,600...+1,000	–2,500...+1,600	+2,500
Бутылочное стекло *										
После размола	48,8	31,4	12,3	3,0	2,6	0,3	0,2	0,2	0,2	1
Без размольных колец	10,1	10,7	6,2	3,9	13,3	22,0	17,7	11,7	2,4	2,0
Кварцевый песок										
Исходный материал	0,3	1,3	5,1	6,3	30,1	44,0	9,8	2,5	0,3	0,3
После размола	29,2	25,1	17,3	9,5	16,2	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Без размольных колец	2,5	5,3	8,9	9,5	33,9	29,4	8,1	2,1	0,2	0,1

Примечание. * Размер фракции составляет –10,0...+2,5 мм.

Т а б л и ц а 2 — Зависимость удельных энергозатрат измельчения от производительности мельницы

Производительность процесса, кг / ч	Удельная энергоёмкость измельчения, кВт · ч / т
30	36,7
32	36,9
34	37,1
36	37,2
38	38,7
40	45,0

Энергоёмкость измельчения при угле β , равном 90, 70, 50°, составила 36,7; 38,2 и 43,5 кВт · ч / т соответственно. При угле наклона $\beta < 70^\circ$ наблюдается значительный рост удельных энергозатрат при незначительном увеличении количества фракции (менее 0,1 мм). Рост энергозатрат обусловлен тем, что при уменьшении угла наклона ротора к горизонту увеличивается время нахождения измельчаемого материала в рабочей камере и загрузка мельницы.

Т а б л и ц а 3 — Изменение гранулометрического состава в зависимости от угла наклона к горизонту ротора мельницы

Размеры ячеек сит, мм									
Остаток, %	2,500	1,600	1,000	0,630	0,315	0,200	0,160	0,100	0,050
Исходный материал									
На ситах	0,3	0,3	2,5	9,8	44,0	30,1	6,3	5,1	1,3
Суммарный	100,0	99,7	97,2	87,4	43,4	13,3	7,0	1,9	0,6
Измельчение в РКМ4 (угол β , равный 90°)									
На ситах	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	4,5	3,3	19,6	24,3
Суммарный	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,8	94,3	91,0	71,4
Измельчение в РКМ4 (угол β , равный 70°)									
На ситах	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,3	2,5	7,4	30,2
Суммарный	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,3	98	95,5	88,1
Измельчение в РКМ4 (угол β , равный 50°)									
На ситах	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,2	2,2	7,1	31,4
Суммарный	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	98,3	96,1	89,0

Закключение. Данные, полученные в ходе проведённого исследования, позволяют предложить математическую модель оценки удельных энергозатрат измельчения твёрдых материалов, на базе которой обоснована эффективность многооперационного измельчения, последовательно выполняемого разными способами силового воздействия размольных тел на материал; разработана многооперационная роликоткольцевая мельница центробежного типа, обеспечивающая тонкое измельчение материалов при сравнительно низких удельных энергозатратах; экспериментально определена возможность повышения эффективности измельчения твёрдых материалов в роликоткольцевых мельницах центробежного типа.

Список цитируемых источников

1. Сиденко, П. Л. Измельчение в химической промышленности / П. Л. Сиденко. — М. : Химия, 1968. — 382 с.
2. Серго, Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Е. Е. Серго. — М. : Недра, 1985. — 322 с.
3. Авакумов, Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Авакумов. — Новосибирск : Наука, 1986. — 208 с.
4. Ложечников, Е. Б. Прокатка в порошковой металлургии / Е. Б. Ложечников. — М. : Металлургия, 1987. — 185 с.

5. *Ложечников, Е. Б.* Переработка промышленных отходов в валковых мельницах / Е. Б. Ложечников, А. В. Бусел // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии. — Гродно : [б. и.], 1995. — Т. 1. — С. 165—170.
6. *Ложечников, Е. Б.* Механика измельчения прокатываемых в толстом слое материалов / Е. Б. Ложечников, А. К. Гавриленя // Вестн. БНТУ. — 2006. — № 6. — С. 16—21.
7. *Ложечников, Е. Б.* Технология размола материалов в ролико-кольцевой мельнице центробежного типа / Е. Б. Ложечников, Е. М. Дубовская // Материалы, технологии, инструменты. — 1999. — № 1. — С. 79—81.
8. *Гарабажиу, А. А.* Физическое моделирование процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице / А. А. Гарабажиу, В. Ю. Мурог // Хим. пром-сть. — 2004. — № 2. — С. 36—45.

Материал поступил в редакцию 30.05.2014 г.

There have been put forward the mathematical models of specific energy conditions and materials grinding evaluation proving the effectiveness of multistage grinding sequentially performed in various ways of impacts on the material. There have been developed the multistage centrifugal mill providing fine grinding materials at relatively low specific energy consumption.

Key words: grinding, solids, mill, efficiency, energy consumption.