

МАШИНЫ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

1. Понятие о процессе измельчения

Измельчением называют процесс разрушения кусков твердого материала при критических внутренних напряжениях, создаваемых в результате какого-либо нагружения и превышающих соответствующий предел прочности.

Процесс уменьшения размеров упруго-хрупкого тела от первоначальной (исходной) крупности до требуемой путём воздействия внешних сил называется *измельчением*.

Измельчение делят на *дробление* и *помол*, а машины, используемые для этих целей, *дробилками* и *мельницами*.

Использование раздробленных или размолотых материалов способствует ускорению процессов обжига, растворения, химического воздействия и т.п., в связи с тем, что поверхность обрабатываемого материала значительно увеличивается.

Интенсивность большинства технологических процессов напрямую зависит от размера поверхности обрабатываемых твердых материалов. Если увеличить их поверхность за счет уменьшения величины кусков, то можно значительно повысить скорость протекания самого процесса, а так же увеличить выход и улучшить качество конечных продуктов.

Измельчению, как правило, подвергают природное сырье (руды, горные породы), топливо (каменный уголь), полуфабрикаты и уже готовые продукты.

2. Степень измельчения

Основной характеристикой процесса измельчения является *степень измельчения*, которая определяется соотношением средневзвешанных размеров частиц материалов до (d_n) и после (d_K) измельчения:

$$i = d_n/d_K$$

Это отношение является важнейшим качественным показателем как самого процесса, так и каждой измельчительной машины в отдельности.

В зависимости от крупности исходного сырья и требований к конечному продукту измельчение производят в один или несколько приёмов.

В зависимости от размеров частиц продукта (конечного размера частиц d_K) различают следующие виды измельчения:

Класс измельчения	Размер кусков до измельчения d_n , мм	Размер кусков после измельчения d_K , мм	Степень измельчени я i
Дробление: • крупное • среднее • мелкое	1000 250 20	250 20 1...5	3...5 5...10 10...50
Помол: • грубый • средний • тонкий • коллоидный	1...5 0, 1...0,04 0,1...0,04 минус 0,1	0,01...0,10 0,005...0,015 0,001...0.005 минус 0,001	>100 >100 >100 >1000

3. Сыпучие материалы

Подвергают измельчению и получают в процессе измельчения так называемые *сыпучие материалы*.

Под сыпучим материалом (или сыпучим телом) подразумевают дисперсную систему, состоящую из твёрдых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. Пространство между частицами заполнено газом, а иногда частично, и жидкостью. В зависимости от диаметра d частиц сыпучий материал может быть в следующих состояниях:

- пылевидном ($d < 0,05 \text{ мм}$)
- порошкообразном ($0,05 \text{ мм} < d < 0,5 \text{ мм}$);
- мелкозернистом ($0,5 \text{ мм} < d < 2 \text{ мм}$);
- крупнозернистом ($2 \text{ мм} < d < 10 \text{ мм}$);
- кусковом ($d < 10 \text{ мм}$).

Для оценки полидисперсной смеси твердых частиц используются следующие характеристики:

- наибольший d_{max} и наименьший d_{min} диаметры частиц;
- размах варьирования $R = d_{max} / d_{min}$;
- средний диаметр частиц d ;
- гранулометрический состав;
- удельная поверхность частиц S_y

Частицы твердого материала имеют неправильную форму, поэтому под их размером понимают диаметр шара, эквивалентного по объему

$$d_V = \sqrt[3]{6V/\pi}$$

или по удельной поверхности

$$d_s = 6V/F,$$

где V - объем частицы, m^3 ; F - площадь ее поверхности, m .

Гранулометрический, или дисперсный состав смеси твердых частиц материала показывает, какую долю или процент массы, объема, поверхности или числа частиц во всей массе пробы составляют определенные частицы или группы частиц.

4. Физико-механические и физические свойства исходного материала

При выборе способа измельчения и оборудования для этого процесса учитывают физико-механические свойства исходного: *прочность, хрупкость, абразивность*, а также их физические свойства: *влажность, плотность, порозность, взрыво- и пожаробезопасность, воспламеняемость и температуры плавления*.

Прочность - свойство материала сопротивляться разрушению при возникновении внутренних напряжений, появляющихся в результате какого-либо нагружения (например, механическом сжатии). Качественными показателями этого свойства служат пределы прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и на растяжение σ_r :

$$\sigma_{сж(р)} = P/F,$$

где: $\sigma_{сж(р)}$ – предел прочности на сжатие (растяжение), МПа;
 P - разрушающее усилие, МН: F - площадь сечения образца в плоскости, перпендикулярной разрушающему усилию, м².

Исходя из предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, измельчаемые материалы разделяют на категории:

особопрочные (очень прочные) более 250 МПа;

прочные 150...250 МПа;

средней прочности 80... 150 МПа;

малой прочности до 80 МПа.

Номер группы	Характеристика материала	Предел прочности $\sigma_{сж}$, МПа
1	Твёрдые (гранит, диабаз, базальт, медные и железные руды, мрамор, кварц)	более 50
2	Средней твёрдости (сланцы, известняк, песчаник, антрацит, каменная соль)	10...50
3	Мягкие (уголь, торф, глина, свинцовый блеск)	менее 10

Хрупкость - свойство материала разрушаться без заметных пластических деформаций.

Существуют различные методы количественной оценки хрупкости. При испытании строительных материалов часто используют методику, по которой хрупкость материала определяют по числу ударов гири массой 2 кг, падающей каждый раз с высоты, превышающей предыдущую на 0,01 м, до разрушения образца. Испытание проводят на нормальных образцах цилиндрической формы. По числу ударов, выдерживаемых образцами, материалы разделяют на следующие типы:

- очень хрупкие до 2;
- хрупкие 2...5;
- вязкие 5... 10;
- очень вязкие более 10.

Абразивность - способность перерабатываемого материала изнашивать рабочие органы машин. Ее оценивают в граммах износа эталонных бил, отнесенных к одной тонне измельченного материала.

Класс абразивности	Категория абразивности	Показатель абразивности, г/т	Материал
Неабразивные	0	1	Тальк, аргиллит, чистый каменный уголь
Малоабразивные	I	1...2	Известняк, мрамор, алевролит, аргиллит, каменный уголь, мелкозернистый песчаник
	II	2...4	
	III	4...8	
Средней абразивности	IV	8...16	Известняк средней абразивности, песчаник, кирпич, сидерит и другие руды
	V	16...32	
	VI	32...65	
Высокой абразивности	VII	65...130	Гранит, базальт, диорит, кварцит, прочный песчаник, гравий из изверженных пород, известняк высокой абразивности
	VIII	130...250	
	IX	250...500	
Очень высокой абразивности	X	Более 500	Конверторный шлак, электропечной шлак, роговики, некоторые железные руды

Гигроскопичностью называется свойство сыпучего материала сорбировать паробразную воду из воздуха, она определяется по формуле:

$$Wn = [(m_v - m_c) / (m_v - m_b)] \cdot 100\%,$$

где Wn – максимальная гигроскопичность, %; m_v, m_c, m_b – масса соответственно пробы сыпучего материала с бюксой, бюксы и бюксы с высушенной пробой сыпучего материала.

Плотностью ρ сыпучего материала называют массу единицы объёма вещества, из которого состоят частицы.

Насыпной плотностью ρ_n сыпучего материала называют массу единицы объёма, занимаемого материалом при свободном засыпании его в измерительный стакан. Насыпная плотность сыпучих материалов изменяется в широком диапазоне (*от 0,2 до 4 г/см³*) в зависимости от дисперсного состава частиц, их формы, плотности и способа засыпки в ёмкость.

Порозностью слоя сыпучего материала называют отношение

$$\epsilon' = V_{pr} / V_0$$

где V_{pr} - свободный объём пространства между частицами в слое сыпучего материала объёмом V_0 .

Величина ϵ' зависит от способа укладки частиц, их формы, размера, воздействия внешних факторов. Например, под действием вибрации ϵ' может изменяться для одного и того же сыпучего материала в $1,1...3,0$ раза. Значения ϵ' , ρ и ρ_n связаны простой зависимостью:

$$\epsilon' = 1 - \rho / \rho_n$$

Изменение структуры слоя под действием сжимающей нагрузки характеризируют **коэффициентом уплотнения**

$$K_u = \rho_{pr} / \rho_n$$

где ρ_{pr} - насыпная плотность порции сыпучего материала после прессования;

ρ_n - насыпная плотность порции сыпучего материала начальная.

Взрыво- и пожароопасность. Горючие и сыпучие материалы при определённых условиях могут самовозгораться, а в смеси с воздухом - взрываться. Взрыв аэрозвеси сыпучих горючих компонентов происходит только в том случае, если их концентрация в воздухе находится в диапазоне между нижним и верхним пределами воспламенения, что оговаривается специальными нормами.

Для исключения опасности взрыва пылевоздушной смеси и загорания сыпучего материала необходимо проводить технологический процесс в среде инертного газа, заземлять металлическое оборудование, использовать взрывозащищенное оборудование, контролировать с помощью датчиков температуру в зонах повышенного трения, не допускать попадания в сыпучий материал металлических предметов, исключать возможность саморазъедания деталей.

Аутогезия. Между частицами сыпучего материала существуют силы взаимодействия различной природы. Эти силы объединяют термином - «аутогезия», которая охватывает все виды и формы связи между частицами независимо от числа и свойств взаимодействующих частиц, природы сил, обуславливающих это взаимодействие, причин и условий их возникновения. Помимо этого основного термина в технической литературе применяют и другие термины: адгезия, когезия, агломерация, агрегация, слёживаемость.

Адгезия частиц – взаимодействие частиц и твердой поверхности стенок аппарата, рабочих органов аппарата и т.д.;

когезия - это связь между молекулами, приводящая к образованию единого твёрдого тела (возникает в месте контакта взаимодействующих тел);

агломерация - процесс укрупнения частиц в процессе спекания;

агрегация - самопроизвольное укрупнение частиц;

слёживаемость - возникновение сил взаимодействия между частицами в результате появления кристаллизационных мостиков между частицами и капиллярных сил.

Силу аутогезии можно представить в виде суммы нескольких составляющих: сил Ван-дер-Ваальса и сил когезионного взаимодействия, имеющих молекулярную природу, а также сил электрических, механического сцепления частиц и капиллярных (для влажных сыпучих материалов).

Для оценки поведения сыпучего материала под действием внешней нагрузки используют несколько характеристик: угол естественного откоса α , сопротивление сдвигу τ_0 , угол внутреннего трения φ , коэффициент внутреннего трения f коэффициент внешнего трения $f_{вн}$, коэффициент размалываемости K_p , коэффициент бокового давления ζ и коэффициент текучести K_m .

Углом естественного откоса называют угол α наклона образующего конуса, полученного при высыпании из воронки без динамического воздействия определённой порции сыпучего материала на горизонтальную подложку, к плоскости основания конуса. Значение α зависит от аутогезионных сил между частицами. Для используемых в промышленности сыпучих материалов $\alpha = 25..44^\circ$.

Любая деформация сыпучего материала сопровождается сдвигом, т.е. скольжением частиц одна относительно другой. В отличие от жидкостей сыпучие материалы в состоянии выдерживать определённые усилия сдвига. Деформация в них не наступает до тех пор, пока не преодолено некоторое напряжение сдвига τ_a , которое называют *предельным сопротивлением сдвигу* или *пределом текучести* сыпучего материала.

При наличии в сыпучих материалах аутогезионных сил взаимодействия между частицами связь между предельным сопротивлением τ_a и нормальным напряжением σ_a в плоскости скольжения слоев один относительно другого выражается законом Кулона:

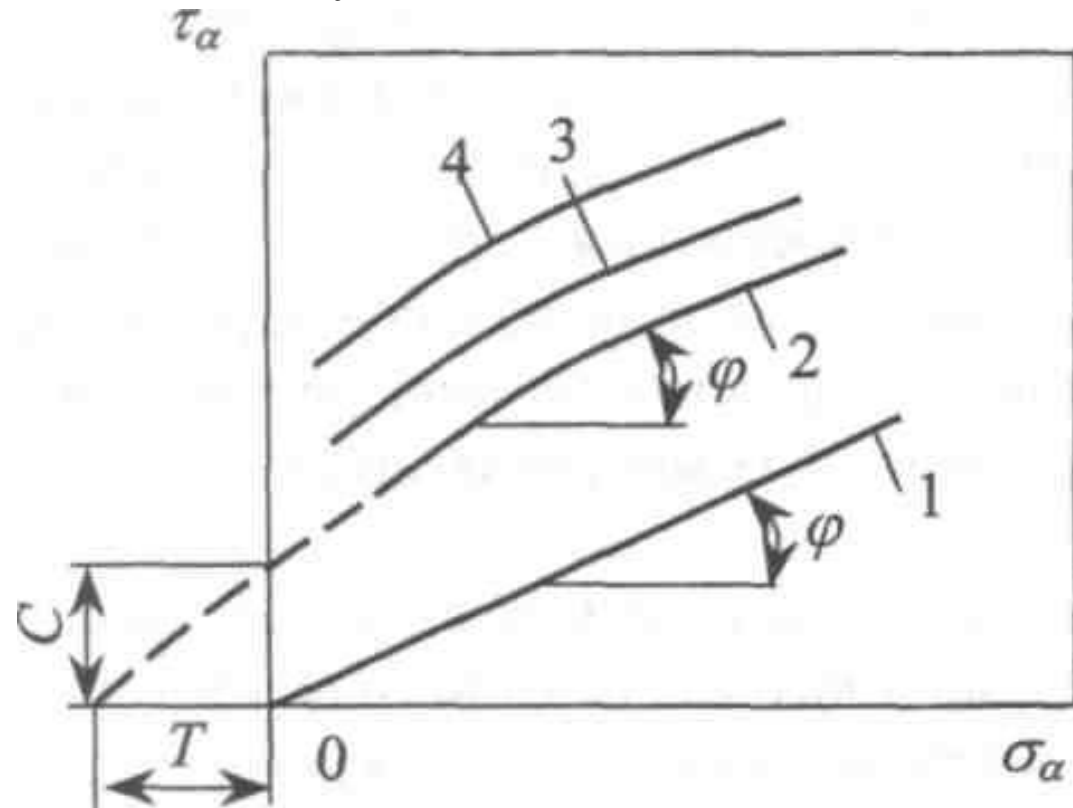
$$\tau_a = C + f \sigma_a,$$

где C - удельное сцепление частиц в сыпучем материале, Па (при τ_a и σ_a Па); f - коэффициент внутреннего трения (физически его можно представить как среднестатистическое значение коэффициентов трения между отдельными частицами).

Нормальные напряжения возникают в результате давления выше лежащих частиц и действия внешних нагрузок. Каждому значению σ_a соответствует определённое значение τ_a . Для идеально сыпучих материалов $\tau_a = 0$ при $\sigma_a = 0$; для связных сыпучих материалов $\tau_a \neq 0$ при $\sigma_a = 0$ (рисунок 1.3). Значение $\tau_a = C$, соответствующее $\sigma_a = 0$, называют *начальным сопротивлением сдвигу* и обозначают τ_0 .

Зависимость сопротивления сдвигу τ_a от нормальных напряжений в плоскости сдвига σ_a

- 1 — для несвязных сыпучих материалов;
- 2, 3 и 4 — для связных сыпучих материалов при различных уплотняющих нагрузках до испытания на сдвиговых приборе



Угол φ наклона таких прямых к оси абсцисс называют углом внутреннего трения, который связан с коэффициентом внутреннего трения f простой зависимостью

$$\operatorname{tg} \varphi = f.$$

Коэффициент внутреннего трения f является среднестатистическим значением коэффициентов трения частиц одна о другую и зависит от размера частиц, их формы, твёрдости, шероховатости поверхности, порозности слоя. Угол трения для различных случаев нагружения материалов и видов сопряжения изменяется в интервалах $\varphi = 11..40^\circ$. При расчётах сил трения сыпучего материала о рабочие органы машин, стенки бункеров используют коэффициент внешнего трения $f_{\text{вн}}$ сыпучего материала, который тоже является среднестатистическим значением коэффициентов трения частиц сыпучего материала о стенку. Значения f , τ_a и $f_{\text{вн}}$ для конкретных сыпучих материалов определяют на специальных сдвиговых приборах.

Модуль деформации E рассчитывают по результатам испытаний сыпучего материала на приборах одноосного сжатия по формуле:

$$E = kP/\Delta l$$

где k – постоянный для данного прибора коэффициент, зависящий от формы, размеров, жёсткости штампа и коэффициента Пуассона ν , м^{-1} ; P - нагрузка на подошву штампа, Н; Δl - изменение высоты слоя сыпучего материала, м.

Коэффициент Пуассона приближённо можно рассчитать по коэффициенту бокового давления ζ :

$$\nu = \zeta / (1 + \zeta)$$

Коэффициент бокового давления при условии одноосного сжатия без возможности бокового расширения равен отношению

$$\zeta = \sigma_x / \sigma_z$$

где σ_x - боковое давление в слое сыпучего материала; σ_z - нормальное давление на сыпучий материал.

При относительно малых давлениях сжатия (0,2...4,2 МПа) коэффициент бокового давления для большей части порошков имеет постоянное значение, практически не зависящее от размеров частиц и равное 0,3...0,4.

Способность сыпучего материала вытекать из отверстий в стенках машин и аппаратов оценивают *коэффициент текучести* K_m , который определяют по времени истечения τ порошка из калиброванной воронки:

$$K_m = \tau r^{2,58} / m,$$

где r - радиус воронки в цилиндрической части, мм

m - масса порошка засыпаемого в воронку, г.

В расчётах процессов измельчения используют *коэффициент размалываемости*

$$K_p = 2,59 \cdot 10^{-7} U / S_H,$$

где U - энергия, затрачиваемая на измельчение, Дж; S - вновь образованная удельная поверхность сыпучего материала, см²/г; K_p - коэффициент размалываемости, Дж см²/г.

