

Математическое моделирование энергосиловых условий измельчения связно-сыпучих материалов

Ложечников Е.Б., Гавриленя А.К.

Белорусский национальный технический университет

Измельчение представляет одну из самых распространенных в природе вообще, и в производстве в частности, операций воздействия на материалы, в результате которой они приобретают более высокие потребительские свойства. Деформация и разрушение частиц порошка увеличивают его удельную поверхность и химическую активность с окружающей средой. Образующийся в результате измельчения кусковых материалов порошок приобретает отличные от жидкостей и твердых тел механические свойства, математическое моделирование которых базируется на критерии прочности Мора-Кулона [1-3]

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c \quad (1)$$

и вытекающего из него условия предельного состояния (пластичности), которое в главных напряжениях описывается выражением

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi, \quad (2)$$

где σ_n и τ_n – нормальное и касательное напряжения к поверхностям сдвига, образующие с направлением большего главного напряжения (σ_1) углы $\mu = 0,25\pi - 0,5\varphi$;

φ и c – соответственно угол межчастичного трения и сцепление (сопротивление сдвигу) частиц порошка.

Поскольку сцепление частиц порошка значительно меньше прочности материала составляющих его частиц, то есть $2c \leq \sigma_s$ (σ_s – предел текучести материала), структурная деформация порошка за счет взаимного перемещения частиц может происходить при весьма малых контактных между частицами напряжениях, не вызывающих их деформацию и разрушение. Вместе с тем, как видно из (2), связно-сыпучая среда в условиях всестороннего сжатия может воспринимать высокие внешние нагрузки, которые приводят к ее уплотнению с деформацией и разрушением составляющих ее частиц. Очевидно, что это может быть достигнуто при равенстве разности главных напряжений в связно-сыпучей среде и в материале частиц [4]

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1^I - \sigma_3^I, \quad (3)$$

где условие пластичности поликристаллического твердого тела

$$\sigma_1^1 - \sigma_3^1 = \beta \sigma_S; \quad (4)$$

$\beta = 1 \dots 1,15$ – коэффициент напряженного состояния, принимаемый равным 1.

Подставив в (3) значения этих разностей из (2) и (4) получим среднее в деформируемой среде напряжение, вызывающее деформацию и разрушение частиц

$$\sigma = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3) = (\sigma_S - 2c \cos\varphi) / 2\sin\varphi \quad (5)$$

При этом большее главное напряжение [2]

$$\sigma_1 = \sigma(1 + \sin\varphi) - c \operatorname{ctg}\varphi, \quad (6)$$

а плотность порошка [3]

$$\rho_\sigma = \rho_n + k\sigma_1^m, \quad (7)$$

где ρ_n – насыпная плотность порошка;

k и m – параметры, зависящие от свойств порошка и условий его обработки давлением.

Поскольку деформации и разрушению частиц порошка предшествует и сопутствует его структурная деформация (межчастичный сдвиг) значительная часть энергии измельчения расходуется на трение между частицами, доля которой с уменьшением размера частиц возрастает, что приводит к росту удельной энергии измельчения.

Анализ энергозатрат измельчения в различных условиях разных порошков дает основание описать зависимость удельной энергии измельчения от размеров частиц равнобокой гиперболой относительно асимптот, совпадающих или параллельных осям координат (Рис.1),

$$n_d(d_i - d_k) = E_d, \quad (8)$$

где d_i – размер частиц порошка;

d_k – предельно малый для определенных материала и способа измельчения размер частиц, при котором начинается процесс их сцепления и гранулирования;

n_d – удельная энергия размола.

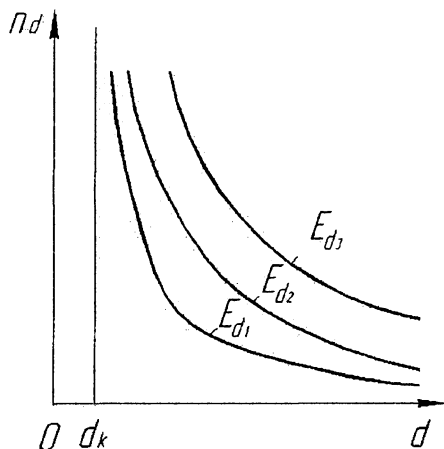


Рисунок 1 – Гиперболическая зависимость удельной энергии измельчения P_d от размера частиц d измельчаемого порошка ($E_{d1} < E_{d2} < E_{d3}$)

Величина параметра E_d в (8) представляется комплексным показателем обрабатываемого материала и вводимых в него активирующих измельчение и прочих присадок, способа и режима размола и др., влияющих на процесс факторов. Величина параметра E_d позволяет оценить возможности различных способов измельчения и их энергоёмкость.

Литература

1. Сиденко, П.Л. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1968. – 382 с.
2. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Физматгиз, 1966. – 243 с.
3. Ложечников, Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1987. – 185 с.
4. Целиков, А.И., Никитин, Г.С., Рокотян, С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.