

Следует отметить, что дальнейших теоретических исследований требует разработка расчета осевого усилия, действующего на оправку, величина которого зависит от геометрических параметров рабочей части оправки, валков и основных геометрических параметров контактного взаимодействия валков и заготовок. Требуется уточнения и расчет величины крутящего момента, который необходимо приложить к каждому рабочему валку для осуществления винтовой прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В. С. Поперечная прокатка. – М.: Машгиз, 1948. – 194 с.
2. Прокатные станы и технология прокатки / Под ред. А. И. Целикова. – М.: Металлургиздат, 1955. – 560 с.
3. Чекмарев А. П. и др. Прошивка в косовалковых станах. – М.: Металлургия, 1967. – 239 с.

УДК 621.762

Е. Б. ЛОЖЕЧНИКОВ, д-р техн. наук,
А. К. ГАВРИЛЕНЯ (БНТУ)

МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ИХ ДЕФОРМАЦИИ

Эффективность использования и переработки сырьевых материалов во многом зависит от их физико-химической активности, определяемой степенью их дисперсности. Высокая дисперсность материала обуславливает их относительно большую удельную поверхность и энергетическое насыщение. Это повышает их физико-химическую активность с окружающей средой, в качестве которой могут быть как другие компоненты производимого продукта, так и вводимые технологические присадки, обеспечивающие при определенных технологических условиях получение требуемого продукта, выделение энергии или разделение частиц на более мелкие, разнородные по составу частицы.

Из известных многочисленных способов и устройств механической активации-размола материала можно выделить те, которые обес-

печивают наиболее организованное и управляемое силовое разрушающее воздействие, обеспечивающее достижение требуемой цели.

Работа, затраченная на пластическую деформацию, может в $10-10^5$ раз превышать работу образования поверхности. Согласно современным представлениям, она расходуется на образование и развитие в твердом теле различных дефектов [1-3]. Применительно к переработке технических отходов именно пластическая деформация вызывает повышение их физико-химической активности за счет дефектообразования на контактных поверхностях частиц. Процесс усиливается при переходе от хрупкого разрушения к стадии пластического течения. При больших интенсивностях подвода энергии реализуется режим пластического течения для реагирующих компонентов, контакты из точечных превращаются в поверхностные. При этом процесс физико-химического взаимодействия резко активизируется.

Таким образом, скорость реакции на границе раздела определяется в значительной степени пластической деформацией твердых частиц, которая находится в прямой зависимости от энергии внешнего воздействия. Изменение энергетического состояния вещества при его измельчении принято называть активацией.

Диспергирование твердых тел вызывает ряд физических явлений: электромагнитное излучение, в широком диапазоне звуковые и световые волны, повышение температуры. При помолке твердых диэлектриков происходит эмиссия электронов с энергией до 10^5 эВ, которые могут играть существенную роль в химических реакциях, изменяющих свойства образующихся поверхностей.

Пластические деформации вызывают искажение кристаллических решеток и возникновение точечных дефектов и дислокаций, несущих соответствующий запас избыточной энергии. При измельчении кварца на его поверхности появляется аморфизированный слой, толщина которого изменяется от 2 нм при грубой дисперсности до 10 нм и более у высокодисперсных порошков. Через нарушение сплошности измельчаемого материала происходят разрыв химических связей вещества и возникновение свободных радикалов на вновь образуемых поверхностях. Причем этот процесс инициируется акустическими волнами в результате автовозбуждений вблизи дефектов кристаллической решетки.

Разрушение твердых тел – процесс сложный, требующий определенного уровня «накачки энергии» и ее релаксации за счет пластической деформации материала, образования и развития трещин. Коэффициент полезного действия процесса во многом определяется коэффициентом трансформации энергии искажений кристаллической решетки в акустическую энергию. Величина последней не превосходит отношения максимальной плотности акустического излучения $W_a = \rho c V_b$ к плотности энергии межатомного взаимодействия $W_o = \rho c^2$, где ρ – плотность материала, c – средняя скорость звука, V_b – предельная скорость перестройки кристаллической решетки. Из этого следует, что коэффициент полезного действия измельчения не превышает величину $\eta = V_b / c = 10^{-3} - 10^{-2}$.

Эксперименты показали, что высокая эффективность измельчения достигается в том случае, если в мельницу подводится энергия плотностью V_v , достаточной для разрушения частиц исходной крупности согласно установленному динамическому размерному эффекту. Для кварцевых материалов с размером исходных зерен 1–5 мм $W_v = 10 - 12$ МДж/м³ (5–7 кДж/кг). При этом в локальных зонах возникает спонтанное саморазрушение с диспергированием на микроуровне и плотностью энергии $10^3 - 10^4$ МДж/м³, соответствующей условиям учета пластической деформации, потребляющей в $10 - 10^3$ раз больше энергии.

Системы подвода энергии к материалам можно разделить на два больших класса: в первом материал разрушается под действием на него мелющих тел или кусков того же материала, во втором материал разрушается под воздействием на него окружающей среды – жидкости или газа (см. таблицу). Для промышленных целей мельницы выбирают с учетом конкретных свойств материала и условий его применения.

Деформация связно-сыпучей дисперсной среды, происходящая в результате внешнего силового воздействия, заключается во взаимном перемещении и более плотной упаковке частиц (уплотнение среды) с их деформацией и разрушением.

Условие действия сил на отдельную частицу, распространение в ней упругой, а затем пластической деформации вызывают растягивающие разрушающие напряжения на свободных участках поверх-

Способы силового воздействия на измельчаемый материал

Класс измельчителя	Характер действия	Помольные агрегаты
Механические	Ударного действия	Дезинтеграторы, дисмембраторы, ударно-центробежные мельницы, струйные мельницы, импульсные пневмоизлучатели
	Ударно-истирающего действия	Шаровые мельницы, вибрационные мельницы, бисерные мельницы, атриторы, планетарные мельницы, аппараты вихревого слоя
	Сдвигового и истирающего действия	Роликовые мельницы, мельницы с упругодеформируемыми рабочими органами
	Сминающего действия	Валковые мельницы
Физические	Разрушение в жидкой среде, разрушение под действием поля	Электрогидравлические дробилки, кавитационные мельницы, ультразвуковые мельницы

ности. В отличие от условий подобных решений А. Гриффитса, Е. Орована и Ф. Мак Клинтонка в [4] определены поля линий скольжения с выделением областей, вырождающихся в новые, более дисперсные частицы. В зависимости от параметров упругих свойств материала распространение напряжений с пластическим формоизменением и образованием физических разрывов, зарождающихся и распространяющихся в дальнейшем по всей частице трещин, происходит лишь в приконтактных локальных объемах, а затем охватывает центральную часть с разрывами-разрушением кольцевой периферии (рис. 1) [4, 5].

В случае высокопластичных материалов, например резины или пластмасс, обрабатываемых в условиях всестороннего сжатия со сдвигом, органические материалы «охрупчиваются» и разрушаются на частицы, дисперсность которых определяется их диссипативным

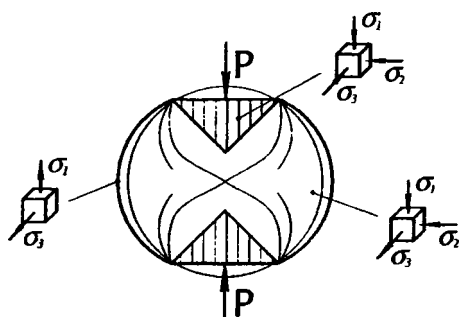


Рис. 1. Схема напряжений деформируемой частицы

энергонасыщением. При этом возможны разрывы молекулярных цепей с образованием исходных молекул сырьевого материала [6].

Обработка в режиме размола гетерогенных композиций приводит к разделению частиц по границам фаз с образованием более мелких частиц [2, 3]. Последнее предопределяет способы и режимы силовой обработки–размола производственных отходов сложного состава с последующим разделением или выделением компонентов композиций [7].

Различие физических и механических свойств твердых компактных и порошковых связно-сыпучих материалов предопределило существенные отличия условий и механизма их обработки давлением. Порошки по своему определению представляют массу частиц, каждая из которых находится с окружающими их частицами в контактном взаимодействии, определяемом критерием прочности Мора–Кулона – математическим описанием криволинейной огибающей кругов Мора:

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

где σ_n и τ_n – нормальное и касательное напряжения к поверхностям сдвига; φ и c – соответственно угол межчастичного трения и сцепление частиц; σ_c – напряжение разрыва контактов между частицами [4, 5].

Восприятие связно-сыпучим материалом внешней нагрузки сопровождается ростом контактных напряжений между частицами, деформацией и увеличением поверхностей контактов. Это приводит к уменьшению его объема и увеличению плотности, описываемому выражением [5] $\rho_\sigma = \rho_n + k p^m$, где ρ_n – насыпная плотность порошка; m и k – устанавливаемые экспериментально параметры, зависящие от свойств материала частиц порошка, способа нагружения (обработки) порошка и др. С увеличением давления p и плотности порошка ρ_σ параметры его прочности (c и φ) изменяются: угол межчастичного трения уменьшается, а сцепление увеличивается. Это предопределяет отличие условий деформации связно-сыпучей среды от поликристаллического твердого тела, условие пластичности которого в главных напряжениях описывается формулой Сен-Венана–Трески [7]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_S, \quad (2)$$

где σ_1 и σ_3 – большее и меньшее главные напряжения; σ_S – предел текучести материал; β – коэффициент, учитывающий условия деформации, равный 1–1,15.

Вытекающее из критерия прочности (1) соотношение компонент напряжений деформируемой связно-сыпучей среды описывается выражениями [4]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right\} &= \sigma (1 \pm \sin \varphi \cos 2\delta) - \sigma_c, \\ \tau_{xy} &= \sigma \sin \varphi \sin 2\delta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где σ – среднее напряжение, равное $0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$; δ – направление большего главного напряжения относительно базовой оси координат в двумерном пространстве.

Из огибающей кругов напряжения Мора–Кулона (рис. 2), математическое описание которой представляет (1), вытекает условие пластичности (предельное состояние) связно-сыпучей среды в главных напряжениях [4, 5]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + \cos \varphi. \quad (4)$$

Следовательно, в отличие от компактных тел условие пластичности связно-сыпучих определяется не только свойствами обрабатываемого материала (σ_S , φ и c), но и величиной возникающего в нем меньшего главного напряжения. Поскольку с увеличением давления и плотности обрабатываемого связно-сыпучего материала до компактного состояния угол его межчастичного трения уменьшается до нуля ($\varphi \rightarrow 0$), а $2c \rightarrow \sigma_S$, выражение (4) приобре-

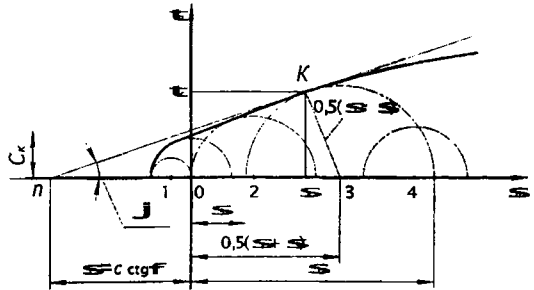


Рис. 2. Диаграмма кругов предельного состояния Мора: 0 – чистый сдвиг, $\tau_n = c$; 1 – одноосное растяжение, $\sigma_n = -\sigma_1$; 2 – одноосное сжатие, $\sigma_n = \sigma_1$; 3 – двухосное сжатие; 4 – двухосное сжатие без сдвига

тает физический смысл и значение (2), т. е. выражение (4) можно рассматривать как обобщенное условие пластичности для твердых компактных и порошковых материалов, состоящих из твердых частиц.

Вследствие того что прочность сцепления обрабатываемых в холодную частиц порошка обычно меньше прочности материала частиц механизм деформации и уплотнения порошка условно разделяют на три следующих по мере уплотнения стадии. В начале нагружения преобладает структурная деформация – деформация за счет взаимного перемещения частиц порошка с уменьшением объема в результате их более плотной упаковки. Вторая стадия характеризуется сочетанием структурной деформации и возрастающей пластической деформацией частиц. При дальнейшем росте внешней нагрузки деформация и незначительное уплотнение порошкового тела происходят в основном за счет пластической деформации и разрушения составляющих его частиц.

Поскольку сцепление частиц уплотненного в холодную порошка меньше прочности его частиц ($2c \leq \sigma_s$), условие (4) свидетельствует о возможности деформации ранее уплотненного порошка внешним нагружением, меньшим предшествующей обработки при условии уменьшения меньшего главного напряжения σ_3 , следовательно, и среднего σ . В этом случае структурная деформация вызывает разрыв ранее образовавшихся и образование новых контактов между частицами, площадь и прочность сцепления которых определяются действующими между ними напряжениями. При малых величинах σ_3 , например, при одноосном действии сосредоточенной нагрузки ранее уплотненное из порошка тело разуплотняется с возможностью его разрушения в порошок, размер частиц которого меньше исходного. Последнее является следствием их предшествующей обработки давлением в условиях интенсивных сдвигов по пересекающимся поверхностям скольжения.

Поскольку частицы порошка представляют твердые тела, пластическая деформация с разрушением которых наступает при разности главных напряжений, описываемых условием (2), такая же разность главных напряжений должна быть в массе этих частиц, представляющих обрабатываемый давлением порошок, условия деформации которых зависят от величины среднего напряжения, что вытекает из

условия (4). Подстановкой значений разности главных напряжений из (2) в (4) определена величина среднего напряжения, вызывающего деформацию и разрушение частиц ($\beta = 1$):

$$\sigma = (\sigma_s - 2c \cos \varphi) v_\sigma / 2 \sin \varphi. \quad (5)$$

Введенная в числитель (5) величина относительной плотности порошка $v_\sigma = \rho_\sigma / \rho$, где ρ – плотность (удельный вес) материала частиц, учитывает реальную площадь сечения порошка. При этом большее главное напряжение, вызывающее уплотнение порошка до ρ_σ (внешнее давление p принято равным большему главному напряжению):

$$\sigma_1 = \sigma(1 + \sin \varphi) - \sigma_c. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) позволяют определить величину давления и по конфигурации и размерам размалывающего инструмента – технологические усилия, обеспечивающие разрушение и дробление частиц в массе, представляющей порошок. В случае гетерогенной смеси обработка в определенном энергосиловом режиме обеспечит размол лишь менее прочных компонентов смеси с сохранением более прочных металлосодержащих, например в шлаке [7]. Это обуславливает упрощение способа выделения с последующей металлургической переработкой более крупных и тяжелых металлосодержащих компонентов смеси [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика прочности и пластичности / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 304 с.
2. Дзигутов М. Я. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1974. – 280 с.
3. Пранч А. С. Сдвиг в неоднородных средах. – Рига: Знание, 1982. – 109 с.
4. Соколовский В. В. Теория пластичности. – М.: Высш. шк., 1960. – 608 с.
5. Ложечников Е. Б. Прокатка в порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1987. – 184 с.
6. Макаров В. М., Дроздовский В. Ф. Использование амортизированных шин и отходов производства резиновых изделий. – Л.: Химия, 1986. – 249 с.
7. Ложечников Е. Б., Гавриленя А. К., Ласанкин С. В. Технологический комплекс для размола шлаков и компактирования извлекаемых из них металлов. – Металлургия. – 2005. – Вып. 29. – С. 67–72.