

упругому телу.

Как видно из рисунка, учет упругости сказывается весьма существенно при расчете режима пуска.

Рассмотренный подход к решению задачи может быть использован для анализа процессов страгивания протяженных упругих стержней, канатов, транспортерных лент, а также для исследования ударных взаимодействий в стержневых системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. -М.: Наука, 1985. -357 с.
2. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Блохин Е.П., Манашкин Л.А., Стамблер Е.Л. и др. -М.: Транспорт, 1986. -363 с.

УДК 620.178

Е.Ф. Чижик

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В РУДОРАЗМОЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

Розглядаються деякі важливі аспекти граничного розміру часток при тонкому подрібненні в млинах; показано вплив температури і вологи матеріалу на продуктивність рудоподрібнювальних млинів.

Бондам на основе теории разрушения Гриффитса дал теоретическую оценку предельной крупности частиц, образующихся при измельчении материала в рудоизмельчительных мельницах. Он показал, что наиболее тонкой дефектной структурой поверхности является структура, обусловленная разрывами кристаллической решетки, расположенными на расстоянии 0,1 мкм друг от друга. Последняя величина представляет собой оценку предельной крупности частиц продукта измельчения. Однако эта оценка слишком далека от фактически наблюдающихся величин и, чтобы получить более реалистическую оценку, необходимо учесть некоторые характерные черты физической природы рассматриваемых процессов.

В первую очередь необходимо отметить, что при многостадийном процессе измельчения в рудоизмельчительной мельнице многочисленные случайные контакты и столкновения твердых кусков между собой в среднем не приводят к напряжениям, достаточным для полного разрушения кусков вплоть до частиц конечной крупности. Поэтому образование в продукте измельчения частиц мельчайших

фракций приходится считать результатом действия механизма усталостного разрушения поверхностей кусков, в которых накапливаются образующиеся микродефекты и развиваются усталостные трещины.

Экспериментальные данные показывают, что форма частиц в процессе измельчения изменяется по-разному для фракций различной крупности материала. Наблюдающаяся закономерность выглядит следующим образом: более крупные из частиц исходного материала приобретают в результате измельчения сглаженную поверхность, становятся окатанными, округлыми, причем тем в большей степени, чем больше размер рассматриваемых частиц продукта. С уменьшением размера частиц продукта их форма оказывается все более неправильной, и для мельчайших частиц характерна весьма неправильная форма. Так, например, при измельчении железистого кварцита среди частиц с размерами около 0,074 мм еще не встречаются частицы со сглаженными контурами, а в диапазоне 0,5-1,5 мм форма частиц приближается к сферической. При этом куски крупных фракций исходного продукта могут иметь любую неправильную форму.

Отмеченный факт закономерного изменения степени сглаженности измельчаемых частиц в сочетании с обломочным характером самых мелких частиц позволяет сделать вывод о том, что частицы обеих фракций продукта кинетически связаны друг с другом как результат единого процесса усталостного износа. Действительно, поскольку в обычных процессах трения и износа усталостное разрушение и адгезионное взаимодействие поверхностей, по современным представлениям, сопутствуют друг другу, то тем более это должно иметь место при множественных контактах и соударениях кусков, перерабатываемых в барабане мельницы. Кроме того, не наблюдается непрерывной функциональной зависимости между размерами мельчайших частиц продукта и интенсивностью потока энергии, поступающей в мельницу от двигателя. Это находит свое выражение в том факте, что, хотя увеличение скорости вращения барабана может сказываться на увеличении процентного содержания мельчайших фракций, но оно почти не влияет на средние индивидуальные размеры частиц этих фракций.

Следует отметить, что для условий абразивного износа поверхностей предлагалось наименьшие из абразивных частиц отождествлять с адгезионными частицами износа. Поскольку, как указано выше, процесс образования частиц мельчайших фракций можно рассматривать как вариант абразивного износа поверхностей крупных

частиц, то указанная точка зрения может быть распространена и на условия измельчения в барабане рудоизмельчительной мельницы. А именно: мельчайшие частицы продукта измельчения могут рассматриваться как адгезионные частицы износа поверхности частиц более крупных фракций. Это дает возможность воспользоваться формулой Рабиновича для оценки диаметра предельно малых частиц d_{lim} в продукте измельчения

$$d_{\text{lim}} = 24000 \frac{\gamma_1}{\sigma_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где γ_1 – удельная поверхностная энергия материала; $\sigma_{\text{п}}$ – его предел прочности.

Целесообразно представить γ_1 в (1) с помощью формулы Орована

$$\gamma_1 = 0,1 E \alpha,$$

то есть,

$$d_{\text{lim}} = 2400 \frac{E \cdot \alpha}{\sigma_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга; α – средний линейный размер молекул материала.

Пользуясь приближенным представлением

$$\alpha \cong \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}},$$

можно записать оценку величины предельно малого диаметра частиц в виде

$$d_{\text{lim}} = 2,6 \cdot 10^{-5} \frac{E}{\sigma_{\text{п}}} \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала; M – молекулярный вес.

Формулы (1)-(3) могут быть использованы для прогнозирования минимально возможной величины частиц измельченного продукта на выходе мельницы.

Например, для измельчаемой чугуновой крошки ($\sigma_{\text{п}} = 200 \text{ МН/м}^2$, $E = 21000 \text{ МН/м}^2$) по формуле (3) получаем: $d_{\text{lim}} = 0,052 \text{ мм}$; для измельченного медного порошка $0,04 \text{ мм}$, а для кремниевого песка $0,09 \text{ мм}$. Эти оценки согласуются с экспериментально наблюдаемыми величинами. Следует иметь в виду, что они характеризуют среднюю величину частиц мельчайших фракций, тогда как в продукте измель-

чения в результате случайных дроблений могут присутствовать отдельные частицы еще более мелких размеров.

На практике оказывается, что параметры, входящие в формулу (3), часто изменяются в зависимости друг от друга. Так, молекулярный вес обычно возрастает вместе с плотностью, а предел прочности вместе с модулем. В первом приближении эти зависимости можно считать линейными. Это приводит к относительной независимости предельного размера частиц не только от интенсивности поступающего потока энергии, но и, до некоторой степени, от природы измельчаемого материала, что можно рассматривать как проявление недавно выдвинутого М.А. Садовским принципа существования характерных размеров отдельностей, присущих процессам измельчения различного масштаба.

На интенсивность процесса измельчения влияет также температура и влажность материала. Это влияние удобно рассмотреть используя известную кинетическую теорию С.Н. Журкова, согласно которой

$$u = u_0 \exp\left(\frac{\sigma\gamma - u_0}{kT}\right), \quad (4)$$

где σ – напряжение; T – температура; u – энергия активации; γ – коэффициент.

Согласно (4) для средней величины напряжения, достигающей в измельчаемых кусках, должно выполняться неравенство $\sigma < u_0/\gamma$, поскольку в противном случае время до разрушения было бы меньше времени одного атомного колебания. По порядку величины это среднее значение можно полагать равным пределу прочности материала. Кроме того, естественно считать величину u , рассматриваемую как меру интенсивности процесса разрыва молекулярных связей материала, пропорциональной производительности Q мельницы по готовому продукту. Следовательно, отношение сравниваемых производительностей P_1 и P_0 , соответствующих различным значениям температуры T_1 и T_0 , может быть записано в виде

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{\exp(\sigma\gamma - u_0)/kT_1}{\exp(\sigma\gamma - u_0)/kT_0} \quad (5)$$

и задача сводится к оценке величины (5) как функции от разности температур $\Delta T = T_1 - T_0$.

Для того чтобы получить искомую оценку, применим к (5) пре-

образование Д.А. Франка-Каменецкого. Тогда

$$P_1 = P_0 \exp\left(\frac{\Delta T}{\theta}\right), \quad (6)$$

где

$$\theta = \frac{kT_0^2}{u_0 - \gamma\sigma}.$$

Оценим с помощью выражения (6) возможное увеличение скорости измельчения твердого материала наподобие рудоносной скальной породы, характеризующейся следующими значениями параметров: $u_0 = 220$ Дж/моль; $\gamma = 20$ Дж/моль·мм²/кг; $\sigma = 4$ кг/мм² при $\Delta T = 100$ К. Подстановка указанных данных в (6) приводит к оценке роста производительности только в 1,03 раза. Хотя соответствующие расчеты для $\Delta T = 200$ К дают для величины прироста ΔP уже около восьми процентов, но для рудоизмельчительных мельниц такой предварительный подогрев материала фактически недостижим. Однако следует иметь в виду, что выше рассматривались условия сухого измельчения, тогда как обычно измельчаемый материал подается в мельницу в смеси с водой, что открывает дополнительные возможности для управления процессом измельчения. В самом деле, поскольку в качестве поверхностно-активного вещества вода приблизительно в три раза уменьшает значение удельной поверхности энергии измельчаемой породы, то для оценки прироста производительности в этом случае снова можно использовать уравнение (5), полагая в нем температуру постоянной, а энергию активации пропорциональной поверхностной энергии

$$P_1 = P_0 \exp\left(\frac{\Delta u_0}{kT_0}\right). \quad (7)$$

Используя данные для кальцита ($\Delta u_0 = 60$ Дж/моль), получаем $P_1/P_0 = 1,02$, т.е. рост производительности измельчения на два процента вследствие одной только увлажнения материала независимо от изменения температуры. Сама по себе полученная величина представляется слишком незначительной и не заслуживает учета. Однако совместное влияние обоих факторов – температуры и увлажнения – может оказаться достаточно существенным, тем более, что оно не является просто суммарным, а усиливается вследствие зависимости величины поверхностной энергии от температуры.

В самом деле, из известной формулы Гиббса-Гельмгольца

$$E_s = E_{s0} - T \frac{\partial E_s}{\partial t} \quad (8)$$

следует, что величина поверхностной энергии падает при возрастании температуры по нелинейному закону. Поэтому, совмещая влияние температуры с влиянием увлажнения материала, можно получить заметное возрастание выхода измельченного продукта даже в умеренном диапазоне изменения температуры. Например, если бы можно было воспользоваться предварительным подогревом воды, поступающей в мельницу вместе с твердым материалом, до температуры, приближающейся к точке кипения, то в этом случае росту интенсивности процесса измельчения в мельнице способствовали бы три фактора: уменьшение долговечности твердых частиц вследствие основного закона термофлуктуационной теории; влияние жидкостной пленки, снижающей значение удельной поверхностной энергии материала; дополнительное ее уменьшение вследствие повышенной температуры воды. Комплексное влияние этих трех факторов может уже не являться пренебрежимо малым, так как оно может обеспечить почти десятипроцентный рост производительности процесса измельчения.

Еще одним способом снижения величины энергии активации разрушения является применение растворимых добавок поверхностно-активных веществ, например, мыла. Так, раствор олеата натрия весьма низкой концентрации (молярность 0,002) обладает поверхностным натяжением $E_s = 25$ дн/см по сравнению с $E_s = 73$ дн/см для чистой воды. Возможность практического использования таких добавок должна оцениваться с учетом экономической стороны вопроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда В.И., Чижик Е.Ф. Резиновые детали в машиностроении. –Днепропетровск: Полиграфист, 2000. –582 с.