$$ {}^{\circ}{}_{0}L_{0} = \int_{0}^{L} \sim \left[\pm_{0} \frac{1-0{,}5kf\,\dfrac{П}{S}\,L\cos\left(\dfrac{\circledR}{L}x\right)}{1-0{,}5kf\,\dfrac{П}{S}\,L} \right] dx\,. \qquad (15) $$

Расчет силовых нагрузок с использованием формулы (4) и интегрального уравнения (15) проводится методом последовательного приближения в следующей последовательности:

1. При заданном значении напряжения подпора $-\pm_{0}$ определяется величина комплексного коэффициента *kf*.

2. Проводится решение численными методами интегрального уравнения (15) и определяется длина перемещаемой массы материала – *L*.

3. По формуле (4) определяется величина среднего нормального напряжения, действующего на поверхности контакта проталкивающего устройства и материала.

4. Определяется среднелогарифмическая величина нормального напряжения, действующего вдоль оси перемещаемого материала.

5. Уточняется величина комплексного коэффициента *kf* и т.д. Расчет продолжается до тех пор, пока различие смежных величин $\pm_{n}$ не будет превышать 3-5%.

Список литературы: **1.** *Непомнящий И.Л.* Коксовые машины, их конструкция и расчет. – М.:Металлургиздат, 1963. – 388с. **2.** *Комолов В.Г., Макаров Г.Н.* Новые машины и оборудование для производства кокса. М.: Металлургия, 1987. – 144с. **3.** *Ткачев В.С., Остапенко М.А.* Оборудование коксохимических заводов. – М.: Металлургия, 1983. – 360с. **4.** *Остапенко М.А., Зборщик М.П., Нестеров А.Н.* Влияние физико-механических, конструктивных и силовых факторов на прессование твердых дисперсных материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Выпуск 17. – Донецк: Донецкий государственный технический университет. – 2001. – С. 153 – 157. **5.** *Остапенко М.А., Нестеров А.Н.* Распределение напряжений при прессовании порошковых и сыпучих материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Выпуск 22. – Донецк: Донецкий государственный технический университет. – 2002. – С. 23 – 27. ***6.*** *Веретельник С.П., Зыков Д.Д., Карпов В.С.* Исследование уплотнения твердого топлива в процессах термической переработки // Химия твердого топлива. – 1978. -№5. – С.129 – 136.

Поступила в редколлегию 16.09.06.

УДК 693.52

А.Н. БАРАНОВ, проф., докт. техн. наук, ***А.И. МОРОЗОВ***,
Украинская инженерно-педагогическая академия

ВЛИЯНИЕ АССОРТИМЕНТА МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В МЕЛЬНИЦАХ БАРАБАННОГО ТИПА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПОМОЛЕ

Розглянуто питання контакту куль, що мелють, і часток матеріалу, що подрібнюють в кульових млинах, з позицій теорії удару. Розроблено модель оцінки напруг, що виникають у частках матеріалу при ударі куль. Розроблена модель дозволяє оптимізувати розмір і швидкість куль, що мелють, у процесі помелу матеріалу у кульових млинах.

The questions of the contact of the milling solids and particles of the material which reduced in ball-mills of the blow theory position are considered. The model of the strains estimation which appears in the particles of the material under the balls blow is designed. The designed model allows to optimizing the size and the velocity of the passage in the process of the material grinding in the ball-mills.

Введение. В большинстве случаев использование твердых материалов в гетерогенных и твердофазных реакциях без их предварительного измельчения невозможно. Поскольку очень многие применяемые промышленностью материалы в обычных условиях находятся в твердом состоянии, измельчение является одной из основных операций их переработки. Наиболее распространенным способом получения твердых тел в дисперсном состоянии является механическое измельчение. Измельчение применяют в таких отраслях промышленности, как горнорудная, цементная, стекольная, пищевая. В производстве металлокерамики, ферритовых изделий, твердых топлив для реактивных двигателей, взрывчатых веществ, ядерных тепловыделяющих элементов, лекарственных порошков, ядов и др. В зависимости от природы материала и характера использования к измельчению предъявляют разнообразные, но, чаще всего, вполне конкретные требования по характеру измельчения.

Состояние вопроса. Способов механического измельчения, т. е. способов разрушения твердых тел на все более мелкие частицы путем создания в них разрушающих напряжений, как и машин, предназначенные для этой цели, используется большое количество. При создании мельниц учитываются дисперсность, которую необходимо получить, размеры исходного материала, его механические свойства (твердость, пластичность, прочность), возможная степень загрязнения материала продуктами износа мельницы и мелющих тел и ряд других показателей.

Обычно разрушение материала производится путем механического воздействия на него мелющих тел или кусков того же материала. Элементарные акты разрушения осуществляются созданием в частицах предельных напряжений сдвига путем сдавливания, удара или среза. Трубные мельницы с мелющими телами являются наиболее распространенным типом измельчителей.

В настоящее время процесс измельчения твердых тел в трубных мельницах, несмотря на большое количество исследований в этой области, не является хорошо изученным. Отдельные решения с успехом применяются лишь для некоторых конкретных задач конструирования и эксплуатации мельниц. Однако общего решения проблемы все еще не найдено. В значительной мере это связано с тем обстоятельством, что влияние ряда факторов на измельчение твердых материалов в большинстве работ не учитывалось. Кинетическая энергия в точке падения определяет основные технические характеристики барабанной мельницы. Очевидно, что при надлежащем выборе скорости вращения, обеспечивающей необходимый подъем шаров, их кинетическая энергия растет с увеличением диаметра барабана. Однако расчет энергии шара в момент падения осложняется совокупным движением других шаров и измельчаемого материала и выполнен только при допущении большого ряда упрощающих приближений. Кроме того, не учитывается отличие механизмов реализации энергии на разрушение материала при различном соотношении размеров мелющих тел и частиц материала. Ассортимент мелющих тел в мельницах барабанного типа – один из решающих факторов, влияющих на эффективность помола.

Постановка задачи. Измельчение материала в мельницах с падающими мелющими телами в основном осуществляется за счет удара. Баланс энергии, соответствующий положениям классической механики (тела после удара могут обладать только двумя видами энергии — кинетической и энергией, пластических деформаций, если они имеются) предполагает, что кинетическая энергия, потерянная при ударе, может перейти только в энергию пластических деформаций. Известно, что под пластическими понимают такие деформации, которые не исчезают после снятия нагрузки. Поэтому тело, подвергшееся пластическим деформациям, должно изменить после удара форму и размеры. Однако исследование тел, участвующих в ударе, показывает, что размеры их после удара не изменились и, следовательно, пластические деформации отсутствуют. Кинетическая энергия шара переходит в потенциальную энергию упругого сжатия частицы.

Выражения баланса энергии при ударе показывают, что основное отличие современных представлений об энергетическом балансе при ударе от представлений классической механики заключается в существовании в теле после удара наряду с кинетической также и потенциальной энергии, в то время как классическая теория исключает такую возможность.

Одновременное существование в теле потенциальной и кинетической формы энергии после удара становится возможным благодаря тому, что напряжения и деформации от точки контакта распространяются по телу не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью — скоростью волны В связи с этим та часть тела, которая уже охвачена волной напряжения, обладает потенциальной энергией, а та часть, которой волна напряжения еще не достигла, сохраняет начальную кинетическую энергию.

Таким образом, формулы классической механики удара оказываются, вообще говоря, неверными. При сжатии тела деформируются и скорости точек изменяются. Благодаря волновому характеру распространения деформаций поле скоростей точек тела становится неоднородным. Те области, которые уже охвачены волной деформаций, изменяют свою скорость, в тех же областях тела, которых волна еще не достигла, сохраняется прежняя скорость.

Разработана вероятностная модель количества контактов мелющих тел и частиц материала, измельчаемого в шаровых мельницах [1]. Однако количество контактов не определяет полностью процесс измельчения, т.к. не каждый контакт приведет к разрушению частиц материала. Поэтому необходимо определить условия разрушения частиц при контакте с позиций теории удара. Взаимодействие двух соударяющихся шаров, между которыми находятся частицы измельчаемого материала, зависит от гранулометрии материала, находящегося в зоне измельчения. Нами решена задача определения напряжений, возникающих в слое полифракционного материала, попадающего в зону измельчения, при центральном соударении двух шаров [2], когда размер частиц материала на порядок меньше размера мелющих тел. При размерах частиц порядка размера мелющих тел необходимо решать принципиально другую задачу соударения мелющего тела (шара) и частиц материала. Решение этой задачи – предмет изложенных исследований.

Основной материал.

В процессе удара мелющего тела (шара) по частице материала в ней возникают продольные смещения U(x,t), для определения которых необходимо решить краевую задачу

$$
\begin{gathered}
U_{tt} = a^2 U_{xx} \qquad 0 < x < d_ч, \quad 0 < t < \infty \\
U(0,t) = 0 \qquad M \cdot U_{tt}(d_ч, t) = E \cdot S \cdot U_x(d_ч, t); \qquad 0 < t < t_0 \qquad (1) \\
U(x,0) = 0 \qquad 0 < x < d_ч \\
U_t(x,0) = \begin{cases} 0, & (0 < x < d_ч) \\ -V_0, & (x = d_ч) \end{cases}
\end{gathered}
$$

где

$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$;

E - модуль упругости материала (Юнга);

ρ - плотность материала;

S - поперечное сечение частицы материала;

$d_ч$ – размер частицы материала;

M – масса шара;

V_0 - скорость шара в начале удара.

Краевая задача описывает следующую ситуацию.

Частица находится в месте падения шара. По ее верхней части наносит удар шар массой М, движущийся со скоростью V_0. В интервале времени от 0 до t_0 наблюдается распространение продольных колебаний по частице.

Согласно формуле Даламбера, решением краевой задачи (1) является

$$U(x,t) = \varphi(at-x) + \varphi(at+x)$$

$$at - x = z \ ,$$

где функция φ(z) определяется из следующих условий:

$$\varphi'(z) = 0 \quad -d_ч < z < d_ч \qquad (2)$$

$$\varphi(z) = 0 \quad -d_ч < z < d_ч \qquad (3)$$

$$\varphi''(z) + \frac{1}{\text{¢} d_ч}\varphi'(z) = \varphi''(z-2d_ч) - \frac{1}{\text{¢} d_ч}\varphi'(z-2d_ч) \qquad -d_ч < z < d_ч \qquad (4)$$

$\text{¢} = \dfrac{M}{{}^\circ S d_ч}$ - отношение массы шара к массе частицы.

С помощью уравнения (4) и условий (1) определяется функция φ′(z) на участке $d_ч < z < 3d_ч$. Далее функция φ′(z) находится на интервалах $3d_ч < z < 5d_ч$, $5d_ч < z < 7d_ч$ и т.д. Причем константа интегрирования каждый раз определяется из условия непрерывности изменения скорости перемещения частицы в точке контакта с футеровкой $U_t(d_ч, t)$ при $t > 0$.

Тогда уравнения скорости распространения волны в частице имеют вид:

$$\varphi'(z) = \frac{V_0}{a} e^{-\frac{z-d_ч}{\text{¢} d_ч}} \qquad d_ч<z<3d_ч \qquad (5)$$

$$\varphi'(z) = \frac{V_0}{a} e^{-\frac{z-d_ч}{\text{¢} d_ч}} + \frac{V_0}{a}\left[1 - \frac{2}{\text{¢} d_ч}(z-3d_ч)\right] e^{-\frac{z-3d_ч}{\text{¢} d_ч}} \qquad 3d_ч<z<5d_ч \qquad (6)$$

$$\varphi'(z) = \frac{V_0}{a} e^{-\frac{z-d_ч}{\text{¢} d_ч}} + \frac{V_0}{a}\left[1 - \frac{2}{\text{¢} l}(z-3d_ч)\right] e^{-\frac{z-d_ч}{\sim d_ч}} + \frac{V_0}{a}\left[1 - \frac{4}{\text{¢} d_ч}(z-3d_ч) + \frac{2}{\text{¢}^2 d_ч^2}(z-5d_ч)^2\right] e^{-\frac{z-5d_ч}{\text{¢} d_ч}} \qquad 5d_ч<z<7d_ч \qquad (7)$$

Функция $\varphi(z)$ определяется интегрированием φ′(z) на указанных интервалах с учетом непрерывности изменения $U(d_ч,t)$ с течением времени.

После интегрирования:

$$\varphi(z) = \frac{\text{¢} d_ч V_0}{a}\left[1 - e^{-\frac{z-d_ч}{\text{¢} d_ч}}\right], \qquad d_ч < z < 3d_ч \qquad (8)$$

$$\varphi(z) = -\frac{\text{¢} d_ч V_0}{a} e^{-\frac{z-d_ч}{\text{¢} d_ч}} + \frac{\text{¢} d_ч V_0}{a}\left[1 + \frac{2}{\text{¢} d_ч}(z-3d_ч)\right] e^{-\frac{z-3d_ч}{\text{¢} d_ч}}, \quad 3d_ч < z < 5d_ч \qquad (9)$$

$$\varphi(z) = \frac{\text{¢} d_ч V_0}{a}\left[e^{-\frac{z-d_ч}{\sim d_ч}} - 1\right] + \frac{\text{¢} d_ч V_0}{a}\left[1 + \frac{2}{\text{¢} d_ч}(z-3d_ч)\right] e^{-\frac{z-3d_ч}{\sim d_ч}} - \frac{\text{¢} d_ч V_0}{a}\left[1 + \frac{2}{\text{¢}^2 d_ч^2}(z-5d_ч)^2\right] e^{-\frac{z-5d_ч}{\text{¢} d_ч}}, \qquad 5d_ч < z < 7d_ч \qquad (10)$$

При $t < d_ч/a$, согласно условию, $\varphi(at-x)=0$, поэтому $U(x,t) = \varphi(at+x)$. Это свидетельствует о том, что по частице распространяется только волна, идущая от основания ($x=l$), по которому нанесен удар. В период времени $d_ч/a < t < 2d_ч/a$ к ней прибавится отраженная волна и т.д.

Время контакта шара и частицы должно превышать $2d_ч/a$ т.к. при $t < 2d_ч/a$ $U(d_ч,t)<0$

Для того, чтобы время контакта было больше $2d_ч/a$ но меньше $4d_ч/a$, необходимо и достаточно, чтобы $2+d_ч^{-2/\delta}<4/\delta$, т.е. $\text{¢}<1{,}73$.

После определения максимума $U_x(x,t)$ и, соответственно, возникающих напряжений в частице при прохождении ударной волны, можно найти необходимые условия ее разрушения.

Выводы:

1. Рассмотрены вопросы контакта мелющих тел и частиц материала, измельчаемого в шаровых мельницах, с позиций теории удара.
2. Разработана модель оценки напряжений возникающих в частицах в результате удара шара и частицы сравнимых размеров.
3. Разработанная модель позволяет оптимизировать размер и скорость мелющих тел в процессе помола различных фракций измельчаемого материала в шаровых мельницах.

Список литературы: 1. *Баранов А.Н., Морозов А.И.* Оценка количества контактов мелющих тел и частиц материала, измельчаемого в шаровых мельницах. // Науковий вісник будівництва. Вип. 26. - Харків: ХДТУБА - 2004. - С. 210-214. **2.** *Баранов А.Н., Морозов А.И.* Оценка возникающих напряжений в измельчаемом материале при центральном соударении двух шаров// Науковий вісник будівництва. Вип. 28. - Харків: ХДТУБА - 2004. - С. 223-227.

Поступила в редколлегию 16.09.06.