

Рис. 4. Коэффициент влияния полярного угла поворота форсунки на площадь пятна орошения

орошения. В отличие от известных формул они учитывают не только наклон форсунки, но и ее поворот вокруг продольной оси. Это позволяет рассчитывать размеры пятна орошения струи с некруглым поперечным сечением при произвольной ориентации форсунки относительно плоскости листа. Показано, что при реализуемых на практике углах наклона и раскрытия плоскофакельных струй поворот форсунок вокруг оси может изменять площадь пятна орошения на 20 % и более. Полученные формулы предназначены для использования в программах проектирования установок, разработки технологии и управления процессом контролируемого охлаждения плоских металлических изделий.

© 2012 г. Э.Е. Бейгельзимер, Я.Е. Бейгельзимер
Поступила 12 января 2012 г.

УДК 621.926.323

А.Г. Никитин, С.А. Лактионов, Д.Ф. Сахаров

Сибирский государственный индустриальный университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА В ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКЕ*

Многие промышленные (металлургические, горные и др.) производства перерабатывают и используют в больших количествах сыпучие материалы различных классов крупности. В большинстве случаев нужный размер материала достигается измельчением более крупных кусков на дробилках, в том числе и одновалковых.

Дробление куска хрупкой породы неправильной формы – сложный процесс, так как при разрушении возникает несколько точек соприкосновения с поверхностью дробильных элементов, через которые передается разрушающее воздействие на кусок хрупкой породы. Так как форма дробимого материала не влияет на величину и направление сил, действующих на кусок в одновалковой дробилке, то принимается, что разрушению будут подвергаться куски правильной кубической формы. Это упрощение позволяет теоретически обосновать характер разрушения кусков материала в одновалковой дробилке и дает возможность проверки полученных результатов исследования с помощью эксперимента.

Кусок дробимого материала в одновалковой дробилке подвергается одновременному действию скручивающих и сжимающих нагрузок [1]. Для анализа напряженного состояния выбрана произвольная точка, взятая в куске дробимого материала. Главные напряжения в

этой точке дробимого куска выражаются через напряжения на площадке его поперечного сечения, проходящей через эту точку.

От кручения в поперечном сечении дробимого куска возникают касательные напряжения, а от сжатия – нормальные. Выбирается направление осей координат в соответствии с рис. 1. Вследствие такого выбора осей координат компоненты напряжений в рассматриваемой точке будут следующими: σ_y – нормальное напряжение, возникающие от силы сжатия; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ – касательные напряжения, возникающие от кручения; $\sigma_x = \sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$. Таким образом, в рас-

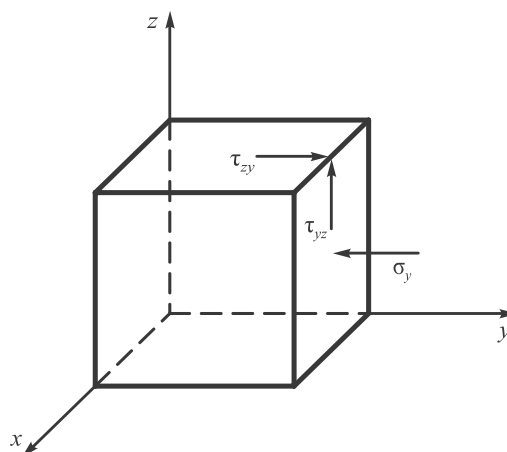


Рис. 1. Напряжения, действующие в точке, расположенной в дробимом куске

* Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом Министерства образования и науки № 7.4662.2011.

смаатриваемой точке имеет место частный случай плоского напряженного состояния.

Из положений теории упругости известно [2]

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_i & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_i & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_i \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где σ_i – нормальное напряжение на главной площадке.

По заданным компонентам с учетом того, что напряжение σ_y направлено в обратную сторону направления оси y , получим определитель

$$\begin{vmatrix} -\sigma_i & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_y - \sigma_i & \tau_{zy} \\ 0 & \tau_{yz} & -\sigma_i \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

решение которого имеет вид:

$$\sigma_i [(-\sigma_y - \sigma_i)\sigma_i + \tau_{zy}^2] = 0. \quad (3)$$

Приравнивая к нулю каждый из сомножителей формулы (3), получим

$$\sigma_i^2 + \sigma_i\sigma_y - \tau_{zy}^2 = 0 \text{ и } \sigma_i = 0. \quad (4)$$

Решение полученного квадратного уравнения (4) запишется следующим образом:

$$\sigma_i = -\frac{\sigma_y}{2} \pm \frac{\sqrt{\sigma_y^2 + 4\tau_{zy}^2}}{2}. \quad (5)$$

Второе слагаемое в выражении (5) для величины σ_i всегда больше первого, следовательно, в дробном кубике, в отличие от общего случая плоского напряженного состояния, сразу можно главным напряжениям приписать соответствующие индексы, учитывая, что $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, тогда

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_y^2 + 4\tau_{zy}^2} - \frac{\sigma_y}{2}; \\ \sigma_2 = 0; \\ \sigma_3 = -\frac{1}{2}\sqrt{\sigma_y^2 + 4\tau_{zy}^2} - \frac{\sigma_y}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

Решение $\sigma_2 = 0$ приводит к уже известной главной площадке, перпендикулярной оси x . На этой площадке, как видно из рис. 2, $\tau_{xz} = \tau_{xy} = \sigma_x = 0$. Другие два решения системы уравнений (6) определяют напряжения на двух других главных площадках, параллельных оси x .

Для определения положения какой-либо главной площадки надо совместно решить следующие уравнения [2]:

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma_i) \cos \alpha + \tau_{yx} \cos \beta + \tau_{zx} \cos \gamma = 0; \\ \tau_{xy} \cos \alpha + (\sigma_y - \sigma_i) \cos \beta + \tau_{zy} \cos \gamma = 0; \\ \tau_{xz} \cos \alpha + \tau_{yz} \cos \beta + (\sigma_z - \sigma_i) \cos \gamma = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Поскольку в рассматриваемом случае плоского напряженного состояния направляющие косинусы нормали к главной площадке примут значения $\cos \alpha = \cos 90^\circ = 0$ и $\cos \gamma = \sin \beta$, то для определения угла α достаточно только второго уравнения системы (7):

$$(\sigma_y - \sigma_i) \cos \beta + \tau_{zy} \sin \beta = 0. \quad (8)$$

Тогда угол, на который нужно повернуть ось y , чтобы она совпала с направлением нормали к первой главной площадке с напряжением $\sigma_i = \sigma_1$, определится как

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma_i - \sigma_y}{\tau_{zy}}. \quad (9)$$

Разрушение дробимого куска определяется касательными напряжениями, максимальная величина которых достигается на площадках, ориентированных под углом 45° . Положительным значениям $\operatorname{tg} \beta$ при правой системе координатных осей x, y, z соответствует их поворот против часовой стрелки.

На рис. 2 видно, что максимальные касательные напряжения действуют в плоскости, расположенной по линии $a - a$.

Так как $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, наибольшее из касательных напряжений равно полуразности крайних главных напряжений [2]:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sqrt{\sigma_y^2 + 4\tau_{zy}^2}}{2}. \quad (10)$$

Из вышесказанного следует, что разрушение куска правильной кубической формы в одновалковой дробилке при одновременном действии сжимающих сил и

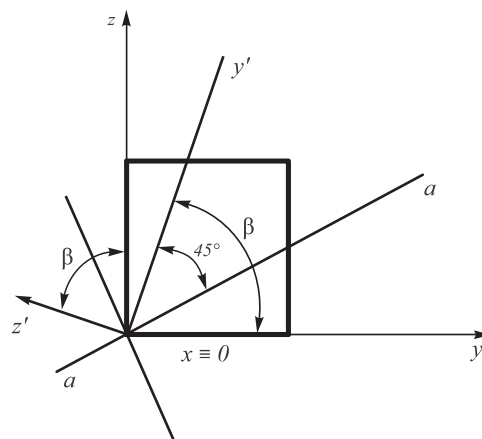


Рис. 2. Положение нормалей к главным площадкам z', y' – нормали к главным площадкам

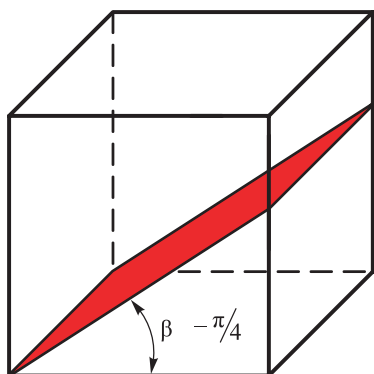


Рис. 3. Положение плоскости действия максимальных касательных напряжений

крутящего момента будет проходить по плоскости максимальных касательных напряжений, как показано на рис. 3.

Для проверки достоверности математической модели процесса разрушения кубического куска в процессе дробления была спроектирована и изготовлена исследовательская установка, представляющая собой одновалковую дробилку [3]. Для проведения экспериментов были изготовлены образцы кубической формы со стороной 40 мм из цементно-песчаной смеси.

На рис. 4 представлены результаты разрушения образцов кубической формы, подтверждающие достоверность математической модели процесса разрушения кубического куска.

Выводы. Теоретически определено и экспериментально подтверждено, что при дроблении хрупких материалов в одновалковой дробилке разрушение кусков



Рис. 4. Образцы кубической формы после разрушения в одновалковой дробилке

происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 10. С. 41, 42.
2. Кац А.М. Теория упругости. 2-е изд., стер. – СПб.: Изд-во «Лань», 2002. – 208 с.
3. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 53.

© 2012 г. А.Г. Никитин, С.А. Лактионов,
Д.Ф. Сахаров
Поступила 22 марта 2012 г.