где G - насыпная плотность материала; g - ускорение свободного падения; H - высота канала.

Физический смысл этого условия следующий: за последней пластиной, в месте расположения бункера, давление должно создаваться только весом материала (иначе его захват из бункера будет затруднен).

Полученная математическая модель процесса ротационного прессования порошковых материалов позволяет оптимизировать этот процесс и выработать рекомендации по конструированию различных прессующих устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятов В.В., Алексеев И.С., Ахтанин О.Н. Оптимизация геометрических параметров канала с подвижными и неподвижными стенками при формовании порошковых материалов// Tendencje rozwojowe w technologii maszyn. Zielona Gora, 1990.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.
3. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М., 1957.

УДК 621.762

А.В.Степаненко, академик, В.В.Пятов, канд. техн. наук, И.С.Алексеев, канд. техн. наук, А.Л.Коваленко

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ ФОРМОВАНИЯ

Целью настоящей работы является получение зависимости распределения напряжений в формующем инструменте при формовании трубчатых изделий из порошковых материалов или при нанесении покрытия на стержень.

На рисунке изображена схема зоны формования. Материал выдавливается через зазор между внутренней поверхностью матрицы 1 и наружной поверхностью оправки 2. Матрица имеет коническую часть длиной Z_1 и цилиндрическую часть длиной $Z_2 - Z_1$. Радиусы входного и выходного сечений матрицы r_2 и r_1 соответственно. Оправка представляет соосный цилиндрический стержень

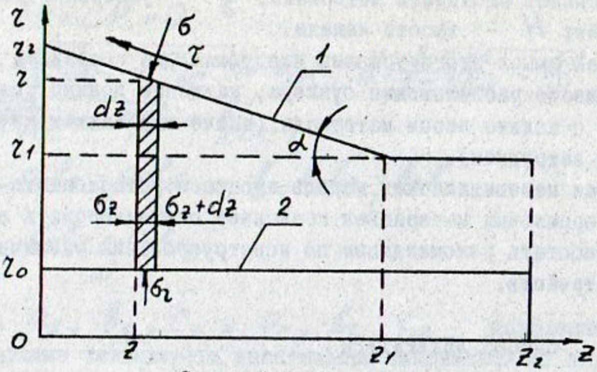

Схема формирования зоны

радиусом r_0 и длиной много больше длины матрицы z_2. Образующая конической части матрицы имеет угол наклона α. Оправка не закреплена и перемещается в процессе экструзии вместе с материалом.

Предполагается, что плотность материала в зоне формования постоянна. Его уплотнение происходит в канале шнека и во входном сечении матрицы, которое является наиболее напряженной областью. По мере удаления от входного сечения напряжения в материале уменьшаются и его дальнейшего уплотнения не наблюдается.

На материал действует усилие выдавливания, вызывающее напряжения σ_z, которые предполагаются распределенными в поперечных сечениях однородно (не зависят от радиуса поперечного сечения конической части матрицы r). Со стороны матрицы действуют нормальные σ и касательные τ напряжения, вызываемые силой трения материала о матрицу. Оправка создает нормальные напряжения σ_r в радиальном направлении. Касательные напряжения на оправке считаются пренебрежимо малыми, так как она движется вместе с материалом.

Закон трения (о связи касательных напряжений с нормальными на поверхности матрицы) выбран в виде [1]

$$f = a\rho + b, \tag{1}$$

где f - коэффициент трения материала о матрицу; ρ - плотность материала в зоне формования, равная плотности прессовки; a и b - постоянные коэффициенты, не зависящие от напряжений и плотности материала.

Условие пластичности взято в форме

$$\sigma_{11} - \sigma_{33} = \sigma_s, \tag{2}$$

где σ_{11} и σ_{33} - наибольшее и наименьшее главные нормальные напряжения соответственно; σ_s - сопротивление деформации материала (физический предел текучести при сжатии). Предполагается, что направления главных нормальных напряжений совпадают с координатными направлениями.

В конической и цилиндрической частях матрицы $\sigma_{11} = \sigma_r$ и $\sigma_{33} = \sigma_z$. Поэтому при $0 < z < z_1$, $z_1 < z < z_2$ условие пластичности записывается следующим образом:

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_s. \tag{3}$$

Уравнение равновесия сил, действующих на кольцевой элемент толщиной dz, имеет вид

$$\pi(r^2 - r_0^2)\sigma_z - \pi[(r - tg\alpha\, dz)^2 - r_0^2](\sigma_z + d\sigma_z) - \\ -2\pi(r - \tfrac{1}{2}tg\alpha\, dz)\sigma\, tg\alpha\, dz - 2\pi(r - \tfrac{1}{2}tg\alpha\, dz)\tau\, dz = 0. \tag{4}$$

или после удаления бесконечно малых высших порядков

$$-(r^2 - r_0^2)\frac{d\sigma_z}{dz} + 2r\, tg\alpha\, \sigma_z - 2r(\sigma\, tg\alpha + \tau) = 0. \tag{5}$$

Сделав подстановку (1) в выражение (5), получим

$$-\frac{r^2 - r_0^2}{2r}\frac{d\sigma_z}{dz} + tg\alpha\, \sigma_z - (tg\alpha + f)\sigma = 0. \tag{6}$$

Так как

$$\sigma_z = \frac{\sigma\cos\alpha - \tau\sin\alpha}{\cos\alpha} = \sigma(1 - f\,tg\alpha), \tag{7}$$

то с учетом пластичности (3) уравнение (6) записывается:

$$-\frac{r^2-r_0^2}{2r}\frac{d\sigma_z}{dz}+(tg\alpha-k)\sigma_z-k\sigma_s=0,\tag{8}$$

где

$$k=\frac{\alpha+f}{f\,tg\alpha}.\tag{9}$$

Принимая во внимание, что $r=r_2-tg\alpha z$, после преобразований получаем

$$-\frac{d\sigma_z}{(k-tg\alpha)\sigma_z+k\sigma_s}=2\frac{r_2-tg\alpha z}{(r_2-tg\alpha z)^2-r_0^2}dz.\tag{10}$$

После интегрирования (10) имеем

$$-\ln|(k-tg\alpha)\sigma_z+k\sigma_s|=\frac{tg\alpha-k}{tg\alpha}\ln|(r_2-z\,tg\alpha)^2-r_0^2|+A,\tag{11}$$

где A - произвольная постоянная, определяемая граничным условием

$$\sigma_z(z_1)=\sigma_1.\tag{12}$$

Потенциируя (12) и избавляясь от знаков абсолютной величины (под ними стоят неотрицательные выражения), имеем

$$(k-tg\alpha)\sigma_z+k\sigma_s=e^A[(r_2-z\,tg\alpha)^2-r_0^2]^n,\tag{13}$$

где

$$n=\frac{k-tg\alpha}{tg\alpha}=\frac{1}{tg\alpha}\left(\frac{f+tg\alpha}{1-f\,tg\alpha}-tg\alpha\right)=\frac{1}{tg\alpha}\frac{f(1+tg^2\alpha)}{1-f\,tg\alpha}.\tag{14}$$

Подставляя в (13) граничное условие (12), находим произвольную постоянную

$$e^A=[(k-tg\alpha)\sigma_1+k\sigma_s][(r_2-z_1tg\alpha)^2-r_0^2]^{-n}.\tag{15}$$

Выражая (15) через (13), получаем

$$\sigma_z=(\sigma_1+m\sigma_s)\left(\frac{F}{F_1}\right)^n-m\sigma_s,\tag{16}$$

где σ_1 - осевое напряжение в выходном сечении конической части матрицы;

$$m=\frac{k}{k-tg\alpha}=\frac{tg\alpha+f}{tg\alpha+f-tg\alpha(1-f\,tg\alpha)}=\frac{f+tg\alpha}{f(1+tg^2\alpha)};\tag{17}$$

F и F_1 - площади текущего и выходного сечений конической части матрицы соответственно.

Таким образом, найдено распределение напряжений вдоль конической части матрицы.

Для установления распределения напряжений вдоль цилиндрической части матрицы в (6) подставим $\alpha=0$ и $z=z_1$:

$$- \frac{r_1^2 - r_0^2}{2r_1} \frac{d\sigma_z}{dz} - f\sigma = 0.$$

Подставляя в (18) $\sigma = \sigma_z$, с учетом (3) получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma_z}{\sigma_z + \sigma_s} = - \frac{2fr_1}{r_1^2 - r_0^2} dz, \tag{19}$$

решением которого будет

$$\sigma_z = Be^{\frac{2fr_1}{r_1^2 - r_0^2} z} - \sigma_s. \tag{20}$$

Из граничного условия

$$\sigma_z(z_2) = 0 \tag{21}$$

находим произвольную постоянную

$$B = \sigma_s e^{\frac{2fr_1}{r_1^2 - r_0^2} z_2}. \tag{22}$$

Таким образом, распределение напряжений вдоль цилиндрической части матрицы имеет вид

$$\sigma_z = \sigma_s [e^{p(z_2 - z)} - 1], \tag{23}$$

где

$$p = \frac{2fr_1}{r_1^2 - r_0^2}. \tag{24}$$

Напряжение на выходе конической части записывается:

$$\sigma_1 = \sigma_s [e^{p(z_2 - z_1)} - 1]. \tag{25}$$

Отдельно рассмотрим случай, когда внешнее трение отсутствует ($n = 0$, $m = \infty$).

При $f \to 0$ имеем

$$\lim_{f \to 0} \sigma_z = \sigma_s \lim_f \frac{1 + tg\alpha}{1 + tg^2\alpha} \left[\left(\frac{F}{F_1}\right)^{\frac{f(1 + tg^2\alpha)}{tg\alpha(1 - f tg\alpha)}} - 1 \right] = \sigma_s \ln \frac{F}{F_1}, \tag{26}$$

т.е. напряжение прессования в этом случае зависит только от прочности материала и от степени обжатия.

Полученные зависимости распределения напряжений конической и цилиндрической части матрицы позволяют рассчитывать усилия, возникающие в процессе формования труб или при нанесении покрытий на стержень, а также определять оптимальные геометрические параметры ф_ ,мообразующего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров В.Л..Механика обработки металлов давлением.М.: Металлургия, 1986.

УДК 621.762

С.С.Клименков, канд. техн. наук, В.В.Селивончик

МИНИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ШНЕКОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Минимизацию энергетических затрат шнекового прессования выполним применительно к винтовому каналу постоянного по длине профиля. Задача в конечном итоге сводится к расчету оптимального профиля продольного сечения канала шнека плоскостью Σ_θ. Искомую поверхность канала Σ_1 зададим уравнением $r = r_{\Sigma_1}(\theta, z) = f(z - a\theta)$, активная поверхность Σ_2 сопрягаемой со шнеком гильзы описывается уравнением $r = r_2$. Линии пересечения поверхностей Σ_1 и Σ_2 будут описываться уравнениями

$$z = z_1(\theta) = a\theta \quad , \quad r = r_2;$$
$$z = z_2(\theta) = a\theta + b, \quad r = r_2,$$

где b - длина линии пересечения поверхности Σ_2 с плоскостью Σ_θ.

Будем исходить из следующих кинематических соотношений:

$$u_1 = 0 \ ; \ u_2 = r u(\theta) ; \ \ u_3 = a u(\theta).$$

Аналогично работе [1] мощность,необходимая для преодоления контактного трения порошка о поверхность канала, определяется выражением

$$N_{\Sigma_1} = -\iint\limits_{\Sigma_1} (T_\sigma \ \bar{e}_2)\bar{n} u r \, ds.$$

На поверхности Σ_1

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + (f')^2}}(-1, -af', f), \quad ds = f\sqrt{1 + (f')^2}\, dz\, d\theta,$$

где f' -- производная функции f.

После преобразований получим