тогда
$$\Phi(A,\lambda) = \int_0^T A_1 d\varphi + \lambda\left[\int_0^T A_2 d\varphi - m_{20}\right].$$

Для определения экстремума функционала необходимо вычислить вариацию этого функционала и приравнять ее к нулю. Пусть $\delta A$ – вариация A, $\delta A$ – вариация $\lambda$, , $\delta\varnothing$ – вариация $\varnothing$.

Отсюда
$$\delta\varnothing = \int_0^T\left(\frac{\partial A_1}{\delta A}\delta A + \frac{\partial A_1}{\delta A'}\delta A'\right)du + \lambda\int_0^T\frac{\partial A_2}{\delta A}\partial A\,du + \delta\lambda\left[\int_0^T A_2\,du - m_{20}\right]$$

После интегрирования и преобразований имеем
$$A'' = 2\frac{A'\cos\varphi - A\sin\varphi}{A(z_1 - A\sin\varphi)}\left[A^2 + (A')^2\right] + A + \frac{2(A')^2}{A} + \lambda\frac{\left((A^2 + (A_1)^2\right)^{3/2}}{A(z_2 - A\sin\varphi)}$$

Таким образом, получено дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции A ( $\varphi$ ). По результатам численных расчетов на ЭВМ построены оптимальные профили винтовых каналов. По форме они приближаются к части эллипса, симметричной относительно малой оси.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименков С.С., Селивончик В.В. Мощность и момент шнекового прессования //Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении. Мн.: Университетское, 1990.

УДК 621.762.4.

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

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВ В КАНАЛАХ ШНЕКОВ

Экономическая эффективность технологических процессов в первую очередь определяется общей энергоемкостью. Их энергетический анализ удобно проводить, используя также в качестве критерия коэффициент полезного действия (кпд), Изучение кпд позволяет выявить факторы, в наибольшей степени влияющие на общие энергозатраты, что дает возможность снизить действие последних, а иногда и нейтрализовать или устранить их.

Ниже приводится расчет кпд применительно к шнековому прессованию.

Для установившегося процесса уплотнения порошка в канале шнека запишем систему уравнений равновесия в общем виде:

$$\nabla \cdot T_\sigma = 0,$$

где $\nabla$ - оператор ковариантного дифференцирования; $T_\sigma$ - тензор напряжений.

Отсюда

$$\nabla \cdot T_\sigma \bar{n} = \nabla(T_\sigma \cdot \bar{n}) - T_\sigma \cdot \nabla \bar{U} = 0,$$

где $\bar{U} = (U_1, U_2, U_3)$ - вектор скорости порошка; $\bar{n}$ - внешняя нормаль к соответствующей поверхности канала шнека.

Интегрируя равенства по всему объему канала шнека и применяя теорему Гаусса-Остроградского, получаем

$$\iiint\limits_V [\nabla(T_\sigma \cdot \bar{n}) - T_\sigma \nabla \bar{U}]\, dV = \iint\limits_\Sigma (T_\sigma \cdot \bar{n})\bar{n}\, ds - \iiint\limits_V T_\sigma \nabla \cdot \bar{U}\, dV = 0, \quad (1)$$

где $\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_{z0} + \Sigma_{z3}$ - поверхность, ограничивающая канал шнека.

Разложим вектор скорости $\bar{U}$ по базисным векторам:

$$\bar{U} = U_1 \bar{e}_1 + U_2 \bar{e}_2 + U_3 \bar{e}_3, \quad (2)$$

где $\bar{e}_1$, $\bar{e}_2$, $\bar{e}_3$ - единичные базисные векторы, соответствующие координатам $r$, $\theta$, $z$.

С учетом (2) равенство (1) примет вид

$$\iint\limits_{\Sigma_2} (T_\sigma \cdot \bar{e}_2)\bar{n} U_2\, ds = -\iint\limits_{\Sigma_2} (T_\sigma (U_1 \bar{e}_1 + U_3 \bar{e}_3))\bar{n}\, ds - \iint\limits_{\Sigma_2} (T_\sigma \cdot \bar{n})\bar{n}\, ds - \quad (3)$$

$$- \iint\limits_{\Sigma_{z0}} (T_\sigma \cdot \bar{n})\bar{n}\, ds - \iint\limits_{\Sigma_{z3}} (T_\sigma \cdot \bar{n})\bar{n}\, ds + \iiint\limits_V T_\sigma \nabla \bar{U}\, dV.$$

Левая часть равенства (3) выражает мощность сил, прилагаемых к порошку со стороны активной поверхности. Эта мощность затрачивается на преодоление сил, действующих на поверхностях $\Sigma_1$, $\Sigma_2$, $\Sigma_{z0}$, $\Sigma_{z3}$, а также на деформацию порошка. Мощность сил, деформирующих порошок, можно разделить на две части. Первая часть мощности затрачивается на деформацию без изменения объема порошка, а вторая часть мощности деформирует порошок с изменением его объема, т.е. расходуется на уплотнение, и является полезной.

Скорость изменения объема пористой среды определяется первым инвариантом тензора $\nabla\bar{U}$, который разложим на шаровую и девиаторную части. Полезная мощность, необходимая для изменения объема пористой среды, задается выражением

$$N_r = \frac{1}{3}\iiint\limits_V (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)(\nabla_1 U_1 + \nabla_2 U_2 + \nabla_3 U_3)\,dV. \qquad (4)$$

Первый вариант тензора $\nabla_1 U_1 + \nabla_2 U_2 + \nabla_3 U_3$ можно записать как $div\bar{U}$. Воспользовавшись уравнением неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\, div\bar{U} = 0,$$

получим

$$div\,\bar{U} = -\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} = -\frac{U}{\rho}\,\frac{d\rho}{d\theta}. \qquad (5)$$

С учетом (5) полезная мощность уплотнения порошка в коническом винтовом канале записывается следующим образом:

$$N_n = -\frac{1}{3}\rho_0 U_0 m(\theta_0)\int\limits_{\theta_0}^{\theta_1}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)\frac{1}{\rho^2}\frac{d\rho}{d\theta}\,d\theta.$$

Очевидно, что коэффициент полезного действия процесса уплотнения порошка в канале шнека определяется выражением

$$\text{кпд} = N_n/N,$$

где $N$ - полная мощность, расчет которой приводится в работе [1].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименков С.С., Селивончик В.В. Мощность и момент шнекового прессования // Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении. Мн.: Университетское, 1990.

УДК 621.923

О.С.Мурков, канд. техн. наук, Б.Р.Фомченко, канд. техн. наук

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРИЖИМНОГО ДИСКА ШАРОДОВОДОЧНЫХ СТАНКОВ

Финишная обработка шариков для шарикоподшипников осуществляется на специальных доводочных станках [1]. Процесс основан на бесцентровой обкатке шариков между торцами двух дисков,