СОПРОТИВЛЕНИЕ СУЖАЮЩЕЙСЯ КОНИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПРЕССОВАНИЮ ПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА В НАЧАЛЕ ДВИЖЕНИЯ

Панов Е.И., Полищук В.Ю., Ханин В.П., Николенко Ю.В.
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Методами теории пластичности рассмотрено напряженное состояние в момент начала движения экструдируемого полуфабриката в сужающейся конической полости без наложения ограничения на изменение предела текучести и коэффициента контактного трения в зависимости от напряженного состояния полуфабриката.

Формующие каналы штемпельных прессов для прессования брикетов из древесных опилок в местах перехода от камеры предварительного сжатия к прессующему цилиндрическому каналу имеют, как правило, конические полости. Входные конические полости являются обязательным элементам в фильерах пресс-грануляторов, вырабатывающих древесные пеллеты. Поэтому для определения технико-экономических параметров оборудования необходимо оценивать сопротивление сужающихся конических полостей экструдированию полуфабриката (древесных опилок).

Напряженное состояние полуфабриката при установившемся движении в канале фильеры отличается от его напряженного состояния в момент начала движения [1,2]. Будем полагать, что это различие сохраняется и для сужающейся конической полости.

Рассмотрим напряженное состояние полуфабриката, пластически деформируемого в сужающейся входной полости с произвольным углом конусности относительно цилиндрической системы координат (r,φ,z) с началом в точке вершины конуса, образующего полость.

Будем полагать, что нормальные осевые напряжения σ_z зависят только от координаты z. Сечение конической полости плоскостью, содержащей ось Oz показано на рисунке 1.

Выделим элементарный объем пространства двумя плоскостями, перпендикулярными оси Oz на расстоянии dz друг от друга и приложим к нему действующие нагрузки. Объемными силами в полуфабрикате будем пренебрегать по сравнению с поверхностными.

Как и ранее [3], будем полагать, что контактные напряжения сдвига τ определены законом Кулона, то есть зависят от нормального напряжения на контактной поверхности σ_n и не могут превосходить предельного напряжения сдвига τ_T , а коэффициент трения f_i принят постоянным на выбранном промежутке изменения нормальных напряжений

$$\tau = f_i\sigma_n \text{, при } \sigma_{n(i-1)} \le \sigma_n \le \sigma_{ni} . \qquad (1)$$

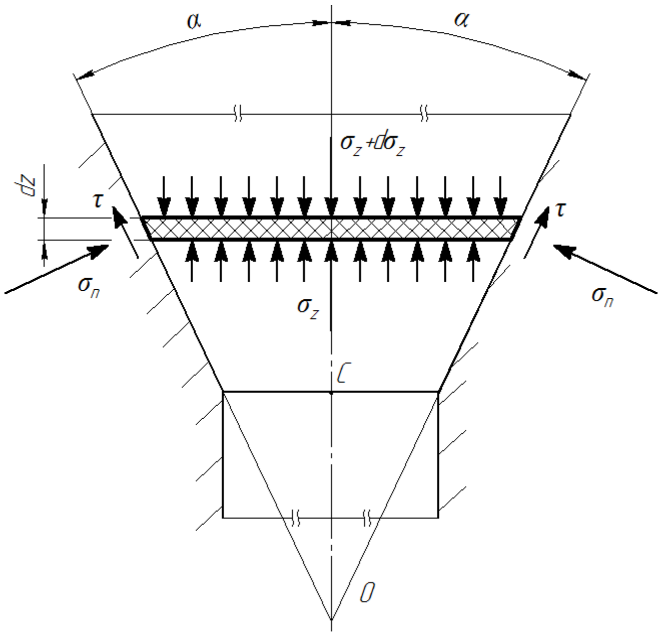

Рисунок 1 – Схема напряженного состояния системы конической сужающей полости цилиндрического канала.

Выделим сектор элементарного объема, заштрихованного на рисунке 1 двумя плоскостями, содержащими ось Oz, угол между которыми равен $d\varphi$ и рассмотрим его равновесие по оси Or. Это позволяет связать τ с нормальным радиальным напряжением σ_r

$$\tau = \frac{f_i}{1 - f_i tg\alpha}\sigma_r = f_i'\sigma_r, \text{ при } \sigma_{r(i-1)} \le \sigma_r \le \sigma_{ri}, \qquad (2)$$

где α – угол конуса полости;

f_i' – приведенный коэффициент трения.

Это также позволяет связать граничные значения нормальных напряжений

$$\sigma_{ri} = (1 - f_i tg\alpha)\sigma_{ni}. \qquad (3)$$

Применение условия равновесия выделенного элемента, на котором основаны зависимости (2) и (3) при больших значениях угла α ограничено, так как позволяет получать недопустимые значения напряжений.

Будем полагать как и ранее [3] на участке Кулонова трения справедливость соотношения между осевым нормальным напряжением σ_z радиальным нормальным напряжением σ_r и пределом текучести полуфабриката σ_T

$$\sigma_z - \sigma_r = \sigma_T. \qquad (4)$$

А предел текучести полуфабриката является переменным и зависит от всестороннего напряжения сжатия, которым в данном случае является напряжение σ_z . Полигональная аппроксимация предела текучести полуфабриката имеет вид

$$\sigma_T = \sigma_{T(i-1)} + \delta_i\left[\sigma_r - \sigma_{r(i-1)}\right], \qquad (5)$$

где $$\delta_i = \frac{\sigma_{Ti} - \sigma_{T(i-1)}}{\sigma_{ri} - \sigma_{r(i-1)}};\tag{6}$$

$\sigma_{T(i-1)}$ и σ_{Ti} – величина предела текучести соответственно в начале и конце i – го участка аппроксимации;

$\sigma_{r(i-1)}$ и σ_{ri} – напряжения сжатия соответственно в начале и конце i – го участка аппроксимации.

С учетом зависимостей (4) и (5) связь между напряжениями σ_r и σ_z имеет вид

$$\sigma_z = (1+\delta_i)\sigma_r - \delta_i \sigma_{r(i-1)} + \sigma_{T(i-1)}.\tag{7}$$

Аналогичное представление коэффициента трения и предела текучести были использованы ранее для цилиндрического канала фильеры [2]

Следует обратить внимание на связь граничных значений участков аппроксимации

$$\sigma_{zi} = \sigma_{ri} + \sigma_{Ti},\tag{8}$$

которая совместно с выражением (3) определяет значения всех нормальных напряжений и предела текучести на границах i – го участка аппроксимации. Номограмма, иллюстрирующая описанный алгоритм представлена на рисунке 2.

Дифференциальное уравнение напряженного состояния полуфабриката имеет вид [4]

$$\frac{d\sigma_z}{dz} - \frac{4\tau}{z\sin 2\alpha} + \frac{2(\sigma_z - \sigma_r)}{z} = 0.\tag{9}$$

Использование приведенных выше зависимостей позволяет получить из уравнения (9) уравнение с разделенными переменными

$$\frac{d\sigma_z}{A_i\sigma_z + B_i} = \frac{2dz}{z\sin 2\alpha},\tag{10}$$

где $$A_i = \frac{2f_i' + \delta_i \sin 2\alpha}{1+\delta_i};\tag{11}$$

$$B_i = (2f_i' + \delta_i \sin 2\alpha)\frac{\delta_i \sigma_{z(i-1)} - \sigma_{T(i-1)}}{1+\delta_i} + \sigma_{T(i-1)}\sin 2\alpha.\tag{12}$$

Описание напряженного состояния в конической сужающейся полости начинается в точке C с координаты z_c, в которой действует осевое нормальное напряжение σ_{zc}. Будем считать, что это напряжение соответствует j – ому участку аппроксимации.

Интегрируя уравнение (10) при начальных условиях $z = z_c$ $\sigma_z = \sigma_{zc}$, получим распределение осевых нормальных напряжений на j – ом участке аппроксимации

$$\sigma_z = \frac{1}{A_j}\left\{\left[A_j\sigma_{zc} + B_j\right]\left(\frac{z}{z_c}\right)^{\frac{2A_j}{\sin 2\alpha}} - B_j\right\},\ \sigma_{zc} \le \sigma_z \le \sigma_{zj},\tag{13}$$

где $$A_i = \frac{2 f_j' + \delta_j \sin 2\alpha}{1+\delta_j}; \tag{14}$$

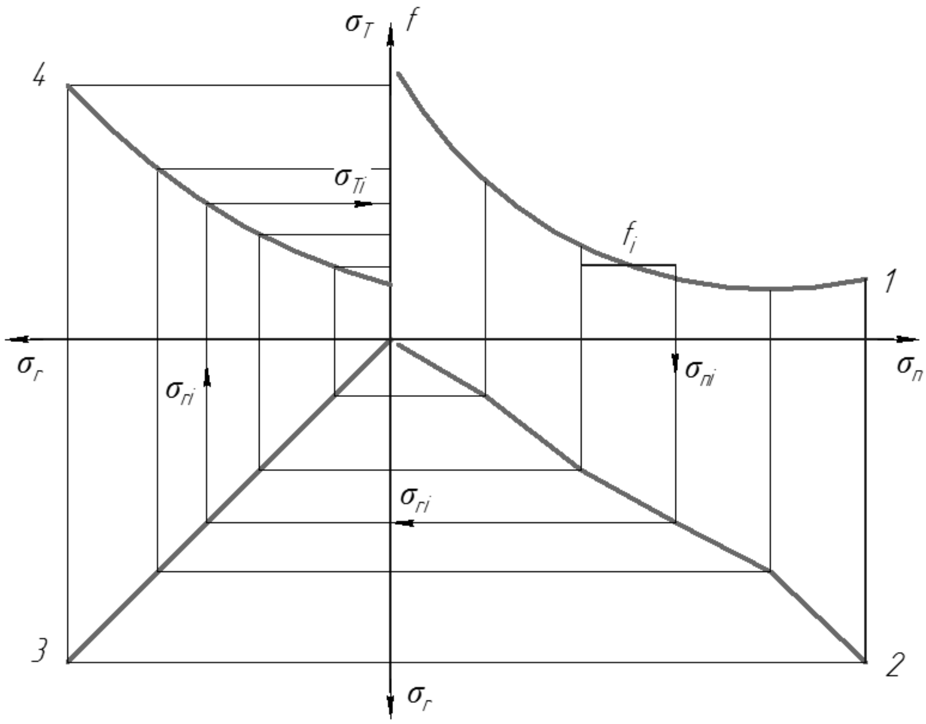

Рисунок 2 Номограмма для определения граничных значений нормальных напряжений с диаграммами зависимостей: 1 – $f = f(\sigma_n)$; 2 – $\sigma_r = f(\sigma_n)$; 3 – $\sigma_r = \sigma_r$; 4 – $\sigma_T = f(\sigma_r)$.

$$B_i = 2\left(2 f_i' + \delta_i \sin 2\alpha\right)\frac{\delta_i \sigma_{z(i-1)} - \sigma_{T(i-1)}}{1+\delta_i} + \sigma_{T(i-1)} \sin 2\alpha. \tag{15}$$

$$\delta_j = \frac{\sigma_{Tj} - \sigma_{Tc}}{\sigma_{rj} - \sigma_{rc}}; \tag{16}$$

σ_{Tc} – величина предела текучести в точке C;

σ_{zc} – величина напряжения сжатия в точке C.

Координата конической полости z_j, на которой заканчивается действие j – го участка аппроксимации определена выражением

$$z_j = z_c \left[\frac{A_j \sigma_{zj} + B_j}{A_j \sigma_{zc} + B_j}\right]^{\frac{\sin 2\alpha}{2A_j}}. \tag{17}$$

Интегрируя уравнение (10) на участке $z > z_j$ при начальных условиях $z = z_{i-1}$ $\sigma_z = \sigma_{z(i-1)}$, получим распределение осевых нормальных напряжений на i – ом участке аппроксимации

$$\sigma_z = \frac{1}{A_i}\left\{\left[A_i \sigma_{z(i-1)} + B_i\right]\left(\frac{z}{z_{i-1}}\right)^{\frac{2A_i}{\sin 2\alpha}} - B_i\right\}, \ \sigma_{z(i-1)} \le \sigma_z \le \sigma_{zi}. \tag{18}$$

Координата конической полости z_i, на которой заканчивается действие i – го участка аппроксимации определена выражением

$$z_i = z_{i-1}\left[\frac{A_i\sigma_{zi}+B_i}{A_i\sigma_{z(i-1)}+B_i}\right]^{\frac{\sin 2\alpha}{2A_i}}. \qquad (19)$$

На k – ом участке аппроксимации в поперечном сечении полости с осевой координатой z_b касательное контактное напряжение может достигнуть предельного напряжения сдвига

$$f_k'\sigma_{rb} = \tau_T. \qquad (20)$$

Поскольку

$$\tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}, \qquad (21)$$

из условий (4), (20) и (21) имеем

$$\sigma_{zb} = \left(\frac{1+\delta_k}{f_k'\sqrt{3}-\delta_k}+1\right)\left[\sigma_{T(k-1)}-\delta_k\sigma_{r(k-1)}\right],\ \sigma_{z(k-1)} \le \sigma_{zb} \le \sigma_{zk}, \qquad (22)$$

$$z_b = z_{k-1}\left[\frac{A_k\sigma_{zb}+B_k}{A_k\sigma_{z(k-1)}+B_k}\right]^{\frac{\sin 2\alpha}{2A_k}}. \qquad (23)$$

При попадании полуфабриката в зону пластического контактного трения $\tau=\tau_T$ связь между нормальными напряжениями в полуфабрикате приобретает вид

$$\sigma_z - \sigma_r = 0. \qquad (24)$$

Расчет напряжений для этого случая рассмотрен нами ранее [4].

Если точка b отсутствует по всей протяженности входной полости, расчет напряжений в ней проводится по зависимостям (18) и (19).

Таким образом, в настоящей статье изложен метод определения напряжений в полуфабрикате, экструдируемом через сужающуюся коническую полость, в начале движения полуфабриката, который позволяет не накладывать ограничений на форму представления физико-механических свойств экструдируемого полуфабриката.

Список литературы:

1. Полищук, В.Ю. Гранулирование комбикорма в цилиндрических каналах фильер при непрерывном режиме процесса прессования. / В.Ю. Полищук, А.Я. Соколов // Изв. вузов, Пищевая технология. – 1980. – № 1. – С. 67-71.

2. Полищук, В.Ю. Гранулирование комбикорма в фильерах при периодическом режиме прессования. / В.Ю. Полищук, А.Я. Соколов // Изв. вузов, Пищевая технология. – 1980. – № 6. – С. 97-100.

3. Полищук, В.Ю. Определение давления выпрессовывания в конических фильерах кольцевой матрицы пресса для гранулирования кормов. / В.Ю. Полищук // Изв. вузов, Пищевая технология. – 1976. – № 3. – С. 113-118.

4. Напряженное состояние пластичного полуфабриката при экструзии через сужающуюся коническую полость / Е.И. Панов, В.Ю.

Полищук, В. П. Ханин, Ю.В. Медведева // Вестник СамГУПС. – 2014. – № 1. С. 107-111.