УДК 621.762

ЭКСТРУЗИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Доц. Пятов В.В., ст. преп. Ковчур А.С. (ВГТУ)

Часто композиционные материалы, армированные дискретными волокнами, формуют методом выдавливания (экструзией). В простейшем случае ориентация волокон остается произвольной, хотя механические характеристики получаемых изделий в этом случае не высоки.

Лучшими свойствами обладают материалы, армированные ориентированными волокнами, однако их ориентация в процессе экструзии представляет сложную техническую проблему. В статье показано, как, изменяя геометрию экструзионного инструмента, можно управлять ориентацией дискретных волокон в композиционном материале.

Расчетная схема изображена на рисунке 1. Предполагается, что формуется труба, однако при подстановке нулевого значения для внутреннего радиуса в конечные формулы, полученные зависимости становятся справедливы и для стержней.

На схеме и в расчетах приняты следующие обозначения:

$2l$ - длина волокна;

r_1 и r_2 - внутренний и наружный радиусы шнека;

r_3 и r_4 - наружный и внутренний радиусы трубчатого изделия;

L - длина конической части матрицы;

α и ρ - половина угла конусности матрицы и наконечника шнека;

Θ - угол наклона линии тока материала к направлению выдавливания;

r_{c0} и r_{cL} - расстояние от центра волокна до оси на входе и выходе из конической части матрицы;

r_c - текущий радиус (расстояние от оси) центра волокна;

φ_0 - угол между проекцией волокна на плоскость чертежа и линией тока, проходящей через центр волокна, на входе в коническую часть матрицы;

φ - текущий угол наклона волокна;

x - координата центра волокна, отсчитываемая от входа в коническую зону.

Задача нахождения зависимости угла наклона волокна φ от геометрических параметров процесса формования решена при следующих допущениях.

1. Материал выдавливается шнеком в полость матрицы одновременно по всему кольцевому зазору (задача осесимметрична);

2. Через каждое сечение за одинаковые промежутки времени проходят одинаковые объемы материала.

3. Материал движется таким образом, что выполняется гипотеза о плоских сечениях (проекции скоростей частиц, находящихся в одном поперечном сечении, на ось x, равны).

4. Линии тока представляют собой прямые линии, делящие в одинаковой пропорции входное и выходное сечения:

$$\frac{r_{c0}-r_1}{r_2-r_1}=\frac{r_{cL}-r_4}{r_3-r_4} \qquad (1)$$

5. Движение волокон представляет собой поступательное перемещение вместе с центром масс и вращение относительно этого центра. Скорость центра волокна совпадает по величине и направлению со скоростями близлежащих частиц; проекции скоростей концов волокна на перпендикулярное ему направление равны проекциям скоростей соответствующих частиц на это же направление, т.е.

$$V_{HB}=V_{XH\Pi}^{\sin(\varphi-\Theta)}+V_{rH\Pi}^{\cos(\varphi-\Theta)} \qquad (2)$$

$$V_{KB}=V_{XK\Pi}^{\sin(\varphi-\Theta)}+V_{rK\Pi}^{\cos(\varphi-\Theta)}$$

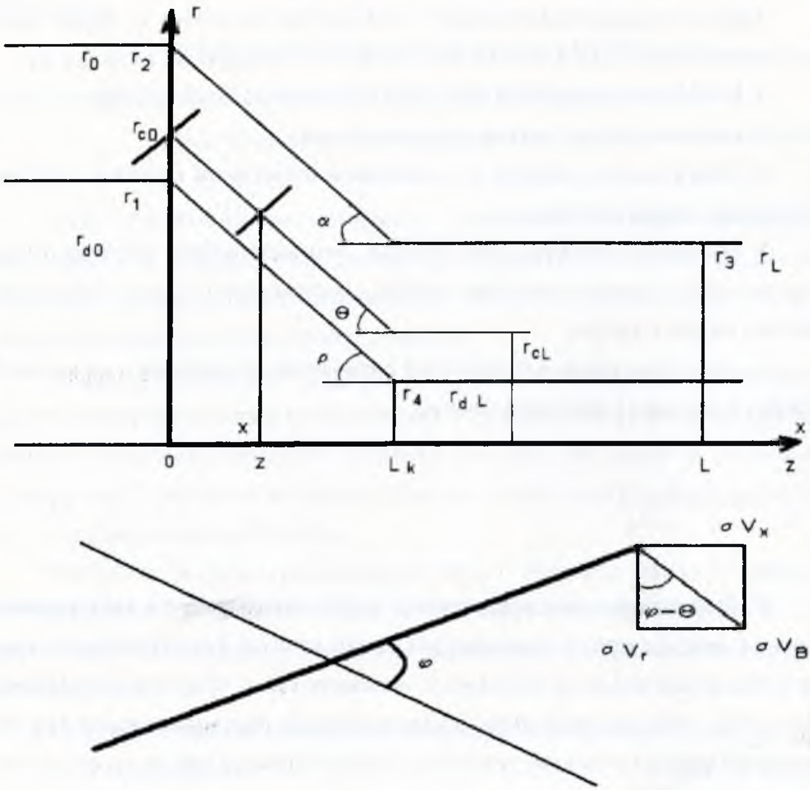

Рис. 1. Расчетная схема.

где:

$V_{НВ}$ и $V_{КВ}$ - скорости начала и конца волокна в его вращении;

$V_{X\,нп}$, $V_{r\,нп}$, $V_{X\,кп}$ и $V_{r\,кп}$ - проекции скоростей частиц, совпадающих с началом и концом волокна, на соответствующие оси.

6. Поперечные размеры волокна много меньше его длины, а длина много меньше толщины стенки изделия. Последнее требование позволяет заменить соответствующие разности дифференциалами и получить аналитическое решение уравнения движения волокна.

Учитывая выражение (1) и то, что $tg\Theta = (r_{c0} - r_{cL})/L$, после несложных преобразований получается

$$\mathrm{tg}\Theta = \frac{\mathrm{tg}\rho \cdot (r_2 - r_{c0}) + \mathrm{tg}\alpha (r_{c0} - r_1)}{r_2 - r_1} \quad (3)$$

Тогда уравнение траектории движения центра масс волокна запишется следующим образом:

$$r_c = r_{c0} - x \cdot \mathrm{tg}\,\Theta \quad (4)$$

Условие несжимаемости позволяет записать

$$V_x S_x = V_{x0} S_0 \quad (5)$$

где V_{x0} и V_x - проекции на ось x скоростей частиц порошка;

S_0 и S_x - площадь кольцевого зазора на входе и в сечении с координатой x.

Подстановка выражений этих площадей в (5) дает

$$V_x = V_{x0} \bullet \frac{r_2^2 - r_1^2}{(r_2 - x\mathrm{tg}\alpha)^2 - (r_1 - x\mathrm{tg}\rho)^2} \quad (6)$$

$$V_r = V_x\,\mathrm{tg}\Theta \quad (7)$$

При перемещении центра волокна на элементарную величину бх проекции скорости составят $V_x + \delta V_x$ и $V_r + \delta V_r$, где

$$\delta V_x = \frac{V_{x0} S_0}{S_x^2} \bullet \frac{\delta S_x}{\delta x} \delta x \quad (8)$$

$$\delta V_r = \mathrm{tg}\Theta\ \ \delta V_x + V_x\,\delta \mathrm{tg}\Theta \quad (9)$$

Дифференцирование дает

$$\delta V_x = \frac{2 \cdot V_{X0} \cdot S_0 \left[(r_2 - x \cdot tg\alpha) tg\alpha - (r_1 - x \cdot tg\rho) tg\rho\right]}{\pi\left[(r_2 - x \cdot tg\alpha)^2 - (r_1 - x \cdot tg\rho)^2\right]^2} \quad (10)$$

где π = 3.14...

$$\delta tg\Theta = \frac{1}{L}\left(1 - \frac{r_3 - r_4}{r_2 - r_1}\right) \cdot \delta r_{c0} \tag{11}$$

Но δr_{c0} функция от r:

$$r_{c0} = r + x\,tg\Theta \tag{12}$$

поэтому

$$\delta r_{c0} = \frac{\delta r + \delta x tg\Theta}{1 - Ax} \tag{13}$$

где $A = \frac{1}{L} \cdot \left(1 - \frac{r_3 - r_4}{r_2 - r_1}\right)$ (14)

Подставляя эти выражения в (9), получим

$$\delta V_r = tg\,\Theta \cdot \delta V_x + AV_x \frac{\delta r + tg\,\Theta\,\delta x}{1 - Ax} \tag{15}$$

Приращение скорости одного из концов волокна в его вращении вокруг центра масс

$$\delta V_B = \delta V_X^{\sin(\varphi - \Theta)} + \delta V_r^{\cos(\varphi - \Theta)} \tag{16}$$

Приравнивая два различных выражения для угловой скорости волокна, получим

$$V_X \frac{d\varphi}{dx} = \frac{\delta V_B}{l} \tag{17}$$

Подстановка в (17) выражений (16), (15) и (10), учитывая, что $\delta x = l\cos(\varphi-\Theta)$ и $\delta r = l\sin(\varphi-\Theta)$, после преобразований и разделения переменных приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{2d\varphi}{sin2(\varphi-\Theta)+[cos2(\varphi-\Theta)+1]tg\Theta}=\left[\frac{\delta V_x}{V_x\delta x}+\frac{A}{1-Ax}\right]dx \qquad (18)$$

Решение этого уравнения при граничном условии

$$\varphi(0) = \varphi_0 \qquad (19)$$

имеет вид

$$\varphi = arctg\left[\left|\frac{C}{D}\left[tg(\varphi_0-\Theta)+tg\Theta\right]\left(x^2-2\frac{B}{C}x+\frac{D}{C}\right)(Ax-1)\right|-\left|tg\Theta\right|\right]+\Theta \qquad (20)$$

где

$$\begin{aligned} B &= r_2 tg\alpha - r_1 tg\rho \\ C &= tg^2\alpha - tg^2\rho \\ D &= r_2^2 - r_1^2 \end{aligned} \qquad (21)$$

Таким образом, получена зависимость угла ориентации волокна от его начального положения (φ_0 и r_{c0}) и геометрии зоны формования.