

УДК 678.073:678.027.9

В.П.Ставров, профессор;  
Э.Н.Цвирко, инж.

### К ТЕОРИИ ПУЛТРУЗИИ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С ТЕРМОПЛАСТИЧНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ

The flow of thermoplastic polymer melt in planslit pultruding tool and the impregnation of fibersystem is described. Dependency between viscosity of melt, pressure in tool, size of slit, velocity and force of pultrudent band is determined.

Из числа известных вариантов пултрузионного способа получения волокнистых композитов [1] для изготовления однонаправленных препрегов с термопластичной матрицей наиболее пригоден способ пропитки волокнистой системы расплавом полимера в плоскощелевой головке [2]. Однако в теоретическом плане этот способ наименее исследован. В данной статье рассматривается задача о движении расплава термопластичного полимера при пултрузии в плоскощелевой головке и о пропитке им волокнистого слоя.

При пултрузии слой волокон (в виде нитей, ровинга) протягивается усилием  $F$  со скоростью  $U$  через головку, заполненную расплавом полимера, подаваемым из генератора расплава (обычно из шнекового экструдера) под давлением  $P_0$  (см. рисунок).

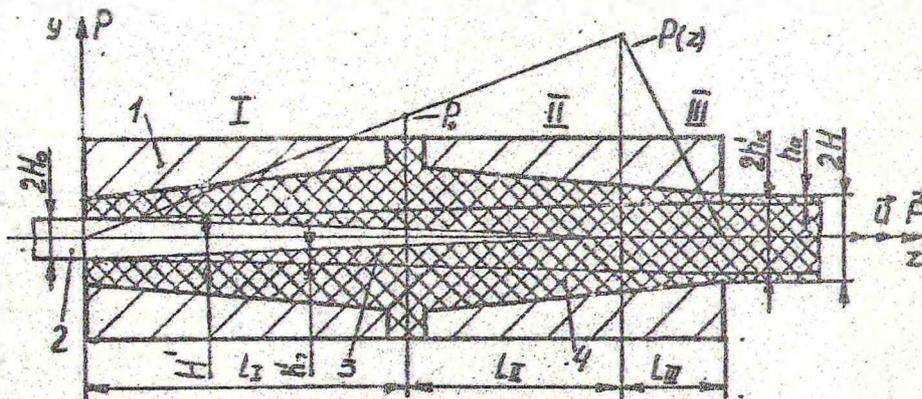


Схема формирования ленты в плоскощелевой головке:  
1 - формообразующая пластина; 2 - волокнистый слой;  
3 - пропитанный слой; 4 - слой полимера в зазоре.  
 $P(z)$  - эпюра давления расплава в головке

Слой волокон на входе сжимается под давлением расплава, поэтому имеет плотную упаковку. Пусть  $C_0$  - доля площади сечения волокнистого слоя на входе, заполненного волокнами. Проникновение полимера в движущийся слой обуславливает увеличение его толщины, зависящее от объемной доли полимера  $C_{II}$  в пропитанной части слоя. Толщина пропитанного слоя  $h'(z)$  зависит от проницаемости волокнистой системы, вязких свойств полимера и от закона изменения давления  $P(z)$  по длине головки.

На выходе из пултрузионной головки должна сформироваться лента заданной толщины  $2H$  и с заданным средним по сечению содержанием волокон  $C_c$ . При этом лента будет непременно иметь снаружи полимерную прослойку толщиной  $h_{II}$ . Поэтому фактическая доля волокон в пропитанной полимером части сечения ленты равна  $C_b = C_c H / (H - h_{II})$ . В пропитанной части ленты  $C_b = 1 - C_{II}$ .

Условия пропитки ленты на глубину  $h' = H - h_{II}$  получим, решив задачу о течении расплава полимера через пористую волокнистую систему. Объемный расход нелинейно-вязкой жидкости со степенным законом течения в направлении оси  $y$  через единичную площадку пористой среды равен:

$$Q_y = -\text{sign} \left( \frac{dP}{dy} \right) \frac{K_y}{\mu^s} \left| \frac{dP}{dy} \right|^s \quad (1)$$

Здесь  $K_y$  - коэффициент проницаемости в направлении оси  $y$ ;  $dp/dy$  - градиент давления;  $\mu$  и  $s$  - параметры степенного закона течения:  $\mu$  - коэффициент вязкости,  $s = 1/n$ ;  $n$  - показатель степени.

Коэффициент проницаемости волокнистой системы для нелинейно-вязкой жидкости в направлении, перпендикулярном слою волокон при  $n = 0,4 - 0,7$  (что типично для расплавов термопластов), на 2 - 3 порядка больше, чем коэффициент проницаемости вдоль волокон (по оси  $z$ ). Следовательно, при расчете скорости пропитки продольной составляющей можно пренебречь. Как показывают оценки, давлением  $P_a$ , в т.ч. от сил поверхностного натяжения, можно пренебречь, а градиент давления можно считать постоянным по толщине пропитанного слоя. Тогда уравнение баланса расплава, протекающего через единичную площадку перпендикулярно направлению волокон, согласно формуле (1) имеет вид:

$$C_{II} \frac{dh'}{dt} = \frac{K_y}{\mu^s} \left( \frac{P_0}{h'} \right)^s \quad (2)$$

Преобразуем переменную  $t$  в уравнении (2) в координату  $z$ , отсчитываемую в направлении движения ленты, и проинтегрируем уравнение (2). Получим зависимость глубины пропитки  $h'$  от координаты  $z$ :

$$h'(z) = \left[ \frac{(1+s) K_y}{\mu^s U C_n} \int_0^z P_0^s(z) dz \right]^{1/1+s} \quad (3)$$

Толщина протягиваемого слоя (точнее его половина) изменяется по закону

$$H'(z) = H_0 + h'(z)(1 - C_n / C_0). \quad (4)$$

Распределение давления по длине головки  $P(z)$  определяется давлением  $P_0$ , создаваемым генератором расплава, зазором  $H(z)$  между неподвижной стенкой и движущейся лентой (см. рисунок), вязкими свойствами расплава и скоростью пултрузии  $U$ .

Предположим, что головка и лента располагаются симметрично относительно плоскости ( $xz$ ) и что имеет место прилипание расплава к поверхности головки. В этом случае задача о течении расплава в зазоре между лентой и неподвижной поверхностью головки сводится к известной задаче о течении нелинейно-вязкой жидкости между двумя плоскими стенками, одна из которых неподвижна, а другая (в данном случае пропитываемая лента) движется со скоростью  $U$  (см., например, [3]). При положительном градиенте давления  $dp/dz$  скорость расплава  $v(y, z)$  равна [3]:

$$v = \frac{(dp/dz)^s h^{s+1}}{\mu^s (s+1)} \left[ \lambda_0^{s+1} - (\lambda_0 - \lambda)^{s+1} \right] \quad (0 < \lambda < \lambda_0). \quad (5)$$

Здесь  $\lambda = y'/h$  - безразмерная ордината ( $y'$  отсчитывается от неподвижной поверхности головки);  $\lambda_0$  соответствует  $\tau=0$ .

Характер распределения скорости расплава в различных зонах головки определяется значением  $\lambda_0$ , которое, в свою очередь, определяется соотношением других параметров, входящих в формулу (5), и скоростью пултрузии  $U$ . Типичными для плоскощелевой пултрузионной головки являются зоны I - III, показанные на рисунке.

Предположим, что в зоне I градиент давления равен  $dp/dz = P_0/L_1$ . Тогда согласно формуле (5) получим скорость на поверхности ленты из условия  $U = v$  ( $\lambda = 1$ ):

$$U = \frac{(P_0/L_1)^s h^{s+1}}{\mu^s (s+1)} \left[ (1 - \lambda_0)^{s+1} - \lambda_0^{s+1} \right] \quad (6)$$

Расход полимера через щель сечением  $h(z) \times B$  получим, проинтегрировав (5) по сечению:

$$Q(z) = \frac{U B h(z)}{s+2} W(\lambda_0), \quad (7)$$

$$\text{где } W(\lambda_0) = \frac{(1-\lambda_0)^{s+2} + \lambda_0^{s+2} - (s+2)\lambda_0^{s+1}}{(1-\lambda_0) - \lambda_0}. \quad (8)$$

Для поддержания заданного режима течения с учетом проницаемости волокнистой системы необходимо, чтобы расход расплава  $Q(z)$  в зазоре  $h(z)$  был равен расходу расплава  $Qq'(z)$ , движущегося вместе с лентой:  $Q'(z) = B h'(z) C_n U$ . Подставив отсюда  $Q'(z)$  в (7), получим вместе с (6) систему нелинейных уравнений относительно  $h(z)$  и  $\lambda_0(z)$ . Ее решение и формула (4) дают оптимальный профиль поверхности головки в зоне I.

Необходимый для повышения качества пропитки режим течения расплава в зоне II головки обеспечивается в сужающейся щели. Найдем закон изменения зазора между движущейся (и пропитываемой) лентой и неподвижной поверхностью, обеспечивающий поддержание постоянного градиента давления, равного  $P_0$ . Толщина движущейся со скоростью  $U$  ленты изменяется при этом по закону (4). Полный расход расплава равен:

$$Q_{\text{п}} = Q(z) + Q'(z) = B H U (1 - C_0) = \text{const.} \quad (9)$$

Подставив значение расхода расплава в зазоре  $Q(z)$ , вычисленное по формуле (9), в выражение (7), найдем закон изменения зазора:

$$h(z) = \frac{Q(z)(s+2)}{B U W(\lambda_0)}. \quad (10)$$

Значение  $\lambda_0(z)$  найдем из условия  $v(\lambda=1) = U$ :

$$U_0 = \frac{P_0^s h^{s+1}(z)}{\mu^s (s+1)} \left[ (1-\lambda_0)^{s+1} - (-\lambda_0)^{s+1} \right]. \quad (11)$$

Решив систему уравнений (10) и (11) относительно  $h(z)$  и  $\lambda_0(z)$ , получим искомую зависимость зазора от координаты  $z$ .

На участке III головки градиент давления отрицателен. Для формирования наружного слоя толщиной  $h_{\text{н}}$  должно быть  $1 < \lambda_0 < \infty$ . Минимальному зазору соответствует  $\lambda_0 = 1$ . Тогда

$$v = U \left[ 1 - (1-\lambda)^{s+1} \right].$$

Расход постоянен и равен:

$$Q_3 = \frac{B U h_{\pi} (s+1)}{s+2}$$

Таким образом, получены все уравнения, необходимые для расчета параметров пултрузионной головки и процесса пултрузии в случае получения однонаправленно армированных лент с термопластичной матрицей. Обоснованность изложенного подхода подтвердилась в процессе проектирования опытной плоскощелевой пултрузионной головки и отработки технологии формования лент.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волоконная технология переработки термопластичных полимерных материалов/Под ред. Г.С.Головкина. - М.: МАТИ, 1992.
2. Патент США 4988278. - 1992.
3. Торнер Р.В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета). - М.: Химия, 1972.

УДК 678.073:678.066.9:539.4

В.П.Ставров, профессор;

В.М.Давыдик, инж.;

А.О.Жуковский, инж.

#### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПУЛТРУЗИЕЙ

Permeability of stochastic fibersystem for thermoplastic polymer melt and dependency of elastic and strength properties of unidirectional pultruded glassfiber prepregs on consistency and properties of components is described.

Высокопрочные материалы и изделия на основе однонаправленных волокнистых наполнителей получают методом пултрузии. Одна из наиболее существенных проблем, от решения которой зависит получение высокопрочных изделий из армированных термопластов, - проблема пропитки волокнистой системы расплавом полимера [1]. В данной статье приводятся результаты исследования проницаемости волокнистой системы с учетом ее стохастического характера, а также влияние доли и свойств компонентов на свойства композита, получаемого пултрузией.

Нити и ровинг, консолидируемые путем пултрузии, образуют трансверсально изотропную волокнистую систему, поэтому необходимо определить проницаемость в двух главных направлениях: вдоль волокон (по оси z) и в плоскости, перпендикулярной волокнам (по оси