

УДК 675.92.027

О.П. Бурмістенков, д.т.н., проф.  
Б.М. Злотенко, к.т.н., доц.

Київський національний університет технологій та дизайну

### ОРІЄНТАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ ВИРОБІВ ПРИ ЛИТТІ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ТИСКОМ

Наведені результати математичного моделювання процесу лиття під тиском полімерних матеріалів з рециркуляцією розплаву в системі матеріальний циліндр-прес-форма. Отримані залежності товщини пристінного високоорієнтованого шару полімеру та міцності виробів від технологічних параметрів процесу лиття та розмірів оформляючої порожнини прес-форми.

Одним з найбільш ефективних методів підвищення міцності полімерних матеріалів є забезпечення орієнтації його структури в напрямку дії руйнівних навантажень [1]. При литті під тиском підвищений ступінь орієнтації структури полімерного матеріалу у виробі може бути забезпечений рециркуляцією розплаву в системі матеріальний циліндр-прес-форма [2]. В результаті затвердіння розплаву в пристінних областях оформляючої порожнини в умовах існування зсувних напружень, вироби мають зовнішній шар з високоорієнтованою структурою та внутрішній – з низькоорієнтованою.

Для того, щоб прогнозувати міцність виробів необхідно визначити залежність товщини пристінного шару та ступеня його орієнтації від параметрів процесу лиття з рециркуляцією розплаву та прес-форми (рис. 1).

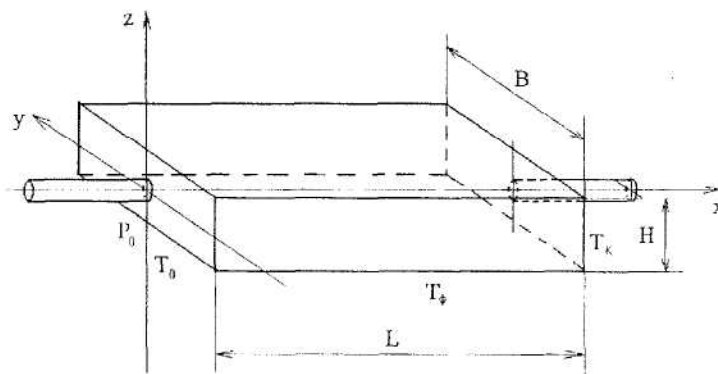


Рис. 1. Розрахункова схема процесу лиття з рециркуляцією розплаву

Ефективні значення границі текучості і модуля пружності при розтяганні шаруватого виробу з кристалічного полімерного матеріалу визначаються за формулами [3]:

$$\sigma_{m,ef} = \sum_{i=1}^n \sigma_{m,efi} \frac{S_i}{S_a}; \quad E_{ef} = \sum_{i=1}^n E_i \frac{S_i}{S_a}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{m,ef}$ ,  $E_i$ ,  $S_i$ ,  $S_a$  – межа текучості, модуль пружності і площа структурного шару.

Згідно з [4] у випадку одноосної деформації твердого матеріалу, що має включення у вигляді лінійних пружних елементів, його міцність при розтяганні в напрямку деформування збільшиться:

$$\sigma(\varepsilon) = 2\sigma(0) \frac{(1+\varepsilon)^{\frac{3}{2}}}{1+(1+\varepsilon)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – деформація;  $\sigma(0)$  – міцність неорієнтованого матеріалу.

Нехтуючи вкладом бокових частин у загальну площу ґратки шарів і вважаючи, що міцність шаруватого виробу визначається як і зазначені фізико-механічні властивості при розтяганні в напрямку заповнення прес-форми, отримаємо:

$$\sigma = \frac{2}{H} \left( \sigma(\varepsilon_s) \delta_s + \sigma(\varepsilon) \left( \frac{H}{2} - \delta_s \right) \right), \quad (3)$$

де  $H$  – висота оформляючої порожнини;  $\delta_s$  – товщина пристінного високоорієнтованого шару полімерного матеріалу.

Середнє за висотою виробу значення залишкової високоеластичної деформації внутрішнього шару [4]:

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1 - 1,2\Delta}, \quad (4)$$

де  $\Delta$  – теплова усадка виробу.

Значення високоеластичної деформації, в замороженої у внутрішньому шарі:

$$\varepsilon_{\delta_s} = \ln \frac{1}{1 - 1,2\Delta_{\delta_s}}. \quad (5)$$

В роботі [3] наведена уточнена формула для визначення теплової усадки виробу:

$$\Delta = \alpha_0 \alpha_{1(P)} \left( \frac{P}{S} \right)^{0,8} \gamma_{e_0}^{\alpha_2} \exp \left\{ - \left[ \alpha_3 \alpha_4 \frac{h^2}{a \Theta_{\gamma(T)}} \lg \left( \frac{8}{\pi^2} \frac{T_0 - T_\Phi}{T_c - T_\Phi} \right)^K \right] \right\}, \quad (6)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнти;  $P, S$  – периметр та площа поперечного перетину виробу;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $\gamma_{e_0} = \Theta_{\gamma(T)} \dot{\gamma}_{ef}$  – величина, прийнята за міру високоеластичної деформації при зсувній течії;  $\Theta_{\gamma(T)}$  – значення характерного часу релаксації;  $T_0, T_\Phi, T_c$  – температура матеріалу, форми та скловання;  $h$  – висота форми.

Залежність постійної часу від швидкості зсуву, наприклад, для блочного полістиролу, має вигляд [5]:

$$\Theta = \frac{\Theta_n}{1 - 3 \cdot 10^{-1} (\dot{\gamma} \Theta_n)^{0,423} + 2,08 (\dot{\gamma} \Theta_n)^{0,845}}, \quad (7)$$

де  $\Theta_n$  – характерний час релаксації в лінійній області деформування.

Постійна часу релаксації залежить також від температури:

$$\Theta_n = A \exp \frac{U_{peon,n}}{RT}, \quad (8)$$

де  $A$  – коефіцієнт;  $U_{peon,n}$  – енергія активації процесу релаксації;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – температура.

Для внутрішнього шару швидкість деформації буде:

$$\bar{\dot{\gamma}}_{\delta_s} = \frac{(2n+1)2Q}{nB(H-2\delta_s)^2}, \quad (9)$$

де  $Q$  – об'ємна витрата розплаву;  $n$  – реологічний параметр;  $B$  – ширина оформляючої порожнини.

Теплова усадка затверділого шару визначиться співвідношенням:

$$\Delta_{\delta_s} = \alpha_0 \alpha_{1(P)} \left( \frac{P}{S} \right)^{0,8} \gamma_{e_0}^{\alpha_2}. \quad (10)$$

Середня швидкість зсуву при склованні зовнішнього шару буде:

$$\bar{\dot{\gamma}}_{\delta_s} = \frac{1}{\delta_s} \int_{\frac{H}{2} - \delta_s}^{\frac{H}{2}} \dot{\gamma}(z) dz. \quad (11)$$

Після підстановки (9) в (11) та інтегрування отримаємо:

$$\bar{\dot{\gamma}}_{\delta_s} = \frac{(2n+1)4Q}{nB\delta_s} \left( \frac{1}{H-2\delta_s} - \frac{1}{H} \right). \quad (12)$$

Рівняння енергії можна записати у вигляді:

$$\frac{dT}{dt} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (13)$$

Середня за висотою оформляючої порожнини швидкість течії визначиться виразом:

$$\bar{V} = \frac{2}{H} \int_0^{\frac{H}{2}} V_x dz. \quad (14)$$

Для перетину розплаву в площині, перпендикулярній до напрямку течії, який рухається з швидкістю  $\bar{V}$ , рівняння (13) набуде вигляду:

$$\frac{dT}{dt_x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; \quad (15)$$

$$t_x = \frac{x}{\bar{V}}. \quad (16)$$

Величина  $t_x$  має зміст часу просування даного перетину від початку течії до координати  $x$ , а  $L$  – відстань від фронту потоку до входу в оформляючу порожнину.

Розв'язок рівняння (15) у вигляді знаковмінного ряду з точністю до першого члену ряду відомий:

$$T \approx \frac{4}{\pi} \cos\left(\pi \frac{z}{H}\right) \exp(-gt_x)(T_0 - T_\phi) + T_\phi, \quad (17)$$

де  $g = \frac{10a}{H^2}$ ;  $T_0$  – температура на вході в порожнину.

Середня температура перетину розплаву буде:

$$\bar{T} = \frac{2}{H} \int_0^{\frac{H}{2}} T dz. \quad (18)$$

Знаючи початкову та кінцеву температуру розплаву при його течії в прес-формі, можна визначити величину теплопритоку в неї:

$$N = Qc(\bar{T}_0 - \bar{T}_k), \quad (19)$$

де  $\bar{T}_k$  – температура розплаву на виході з оформляючої порожнини;  $c$  – коефіцієнт теплоємності розплаву.

Потужність внутрішніх джерел тепла буде:

$$q = \frac{Qc(\bar{T}_0 - \bar{T}_k)}{BHL}. \quad (20)$$

Розв'язок теплопровідності для матеріалу в формі матиме вигляд [6]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + b = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t_x}, \quad (21)$$

де  $\theta = T - T_\phi$ ;  $b = \frac{q}{\lambda}$ ;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності розплаву.

Розв'язок цього рівняння дає розподіл температури:

$$T \approx \frac{qH^2}{2\lambda} \left[ \left( \frac{z}{H} \right) - \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right] + \frac{4}{\pi} \cos\left(\pi \frac{z}{H}\right) \exp(-gt_x) \left( T_0 - T_\phi - \frac{qH^2}{\pi^2 \lambda} \right) + T_\phi. \quad (22)$$

При великих значеннях часу розподіл температури відповідатиме усталеному теплообміну:

$$T \approx \frac{qH^2}{2\lambda} \left[ \left( \frac{z}{H} \right) - \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right] + T_\phi. \quad (23)$$

Товщина затверділого шару може бути визначена як корінь квадратного рівняння:

$$T_c = \frac{qH^2}{2\lambda} \left[ \left( \frac{z}{H} \right) - \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right] + T_\phi. \quad (24)$$

З урахуванням (20) і (24) товщина пристінного шару високоорієнтованого полімерного матеріалу визначиться у вигляді:

$$\delta_s = \frac{1}{2} \left[ H - \sqrt{H^2 - \frac{8Qc(T_c - T_\phi)}{BLH(T_0 - T_k)}} \right]. \quad (25)$$

На рис. 2 та рис. 3 наведені залежності товщини пристінного високоорієнтованого шару від величини витрату розплаву при його рециркуляції та висоти оформляючої порожнини.

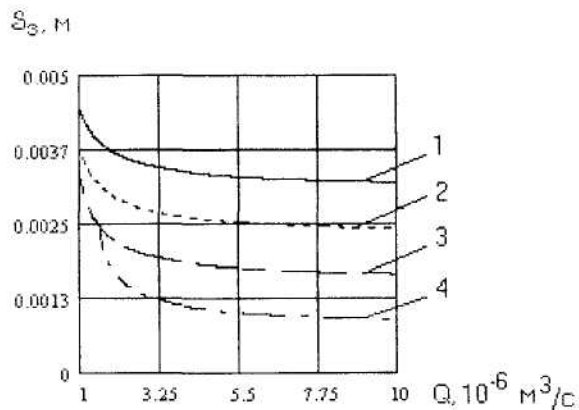


Рис. 2. Залежність товщини пристінного шару виробів від видатку розплаву:  
 1 –  $H=20 \cdot 10^{-3}$  м; 2 –  $H=15 \cdot 10^{-3}$  м;  
 3 –  $H=10 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $H=5 \cdot 10^{-3}$  м

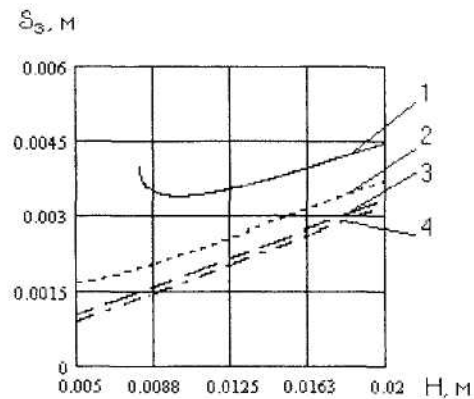


Рис. 3. Залежність товщини пристінного шару виробів від висоти порожнини:  
 1 –  $Q=10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с; 2 –  $Q=2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с;  
 3 –  $Q=5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с; 4 –  $Q=10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с

З наведених графіків видно, що при малих значеннях видатку з його зменшенням товщина високоорієнтованого шару збільшується, проте зменшується швидкість зсуву та ступінь орієнтації, а отже, і міцність полімерного матеріалу.

Після деякого значення видатку його подальше збільшення майже не впливає на товщину пристінного шару, проте приводить до збільшення його міцності.

Отже, враховуючи те, що на міцність виробу впливає як товщина пристінного шару, так і ступінь його структурної орієнтації, можна знайти значення видатку, при якому вона є найбільшою.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Лавшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. – М.: Химия, 1974. – 270 с.
2. Пат. 34717А України. Прес-форма для лиття під тиском полімерів / О.П. Бурмістенков, Б.М. Злотенко, П.М. Костенко (Україна). – Заявка № 2000042048 від 10.04.2000; Опубл. 15.05.2001.
3. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. – Л.: Химия, 1983. – 288 с.
4. Hsiao C.C. Flow orientation and fracture strength of a model linear hard polymer solid // Journal of polymer science. – 1960. – Vol. 44. – P. 71–79.
5. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Процессы релаксации расплавов некоторых полимеров // Пластические массы. – 1975. – № 7. – С. 42–45.
6. Шнайдер П. Инженерные задачи теплопроводности. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 478 с.

БУРМІСТЕНКОВ Олександр Петрович – доктор технічних наук, професор, декан факультету технологічного обладнання та систем управління Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

- обладнання легкої промисловості;
- автоматизація технологічних процесів, електромеханіка.

ЗЛОТЕНКО Борис Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Київського національного університету технологій та дизайну.

Наукові інтереси:

- технологічні процеси та обладнання легкої промисловості.