

# Виготовлення рукавної полімерної плівки (деформування розплаву полімеру)

Г.І. Ведь, к.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., І.О. Мікульонюк, д.т.н., НТУУ «КПІ», м. Київ

Перероблення полімерів у виробі часто супроводжується деформуванням розтягування заготовки або напівфабрикату. Результати проведених авторами досліджень, зокрема [1–5], здебільшого стосуються отримання залежностей для визначення величини деформації від напруження деформації (або навпаки), а також границь застосування цих залежностей або режимів деформування. Наприклад, у праці [4] досліджено залежність роботи  $A$  від геометричних параметрів зони деформування (радіус зони й товщина плівки), кінцевої швидкості руху (швидкість плівки на виході із зони деформування) й напруження. Ця залежність відповідає процесу формування рукава полімерної плівки за умови істотного перевищення кінцевої швидкості руху  $V_k$  над швидкістю розплаву на виході з екструзійної головки  $V_0$  (тобто  $V_k \gg V_0$ ) і ступенем роздуву  $\beta = 1,5$ .

Розглянемо зону деформування у вигляді зрізаного конуса з кутом при вершині  $2\theta$ .

Питома (за одиницю часу) робота з деформування рукава дорівнюватиме сумі елементарних робіт:

$$dA = d(FV), \quad (1)$$

де  $F$  – зусилля витягування рукава в зоні деформування, Н;  $V$  – швидкість переміщення розплаву, м/с.

Оскільки справедливі залежності  $F = \text{const}$  [6] і  $V = \frac{Q}{2\pi r\delta}$ ,

де  $Q = \text{const}$  – масова продуктивність екструдера, кг/с;  $r, \delta$  – поточні значення радіуса зони деформування і товщини плівки відповідно, м; то можна отримати:

$$dA = F \frac{Q}{2\pi} d\left(\frac{1}{r(x)\delta(x)}\right), \quad (2)$$

де  $x$  – координата, спрямована вздовж зони деформування плівки (осі рукава), м.

З достатньою точністю можна прийняти:

$$r(x) \approx r_0 + \frac{r_k - r_0}{H} x = r_0 + ax; \quad (3)$$

$$\delta(x) = \delta_0 + \frac{\delta_0 - \delta_k}{H} x = \delta_0 - bx, \quad (4)$$

де  $H$  – довжина (висота) зони деформування, м;

$r_0, r_k$  – початкове й кінцеве значення радіуса зони деформування відповідно, м;

$\delta_0, \delta_k$  – початкове й кінцеве значення товщини плівки відповідно, м.

Тоді із врахуванням (3) і (4) матимемо:

$$d\left(\frac{1}{(r_0 + ax)(\delta_0 - bx)}\right) = \frac{br_0 - a\delta_0 + 2abx}{(r_0 + ax)^2 (\delta_0 - bx)^2} dx. \quad (5)$$

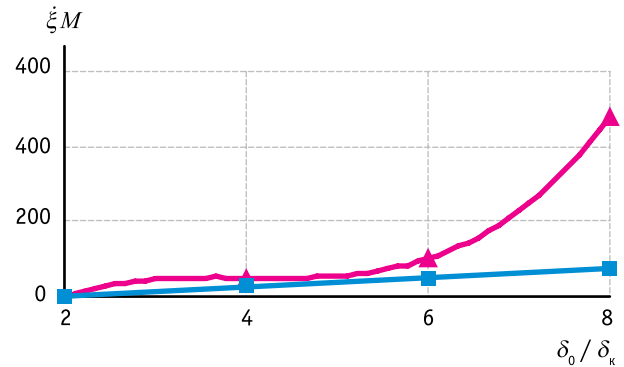


Рисунок. Залежність добутку  $\xi M$  від відношення  $\delta_0 / \delta_k$ :

▲ –  $\beta = 2$ ; ■ –  $\beta = 4$

Для подальшого аналізу розкладемо чисельник виразу (5) на складові [6]:

$$\frac{br_0 - a\delta_0 + 2abx}{(r_0 + ax)^2 (\delta_0 - bx)^2} = \frac{C}{(r_0 + ax)^2} + \frac{C_1}{r_0 + ax} + \frac{C_2}{(\delta_0 - bx)^2} + \frac{C_3}{\delta_0 - bx}, \quad (6)$$

де  $C$  і  $C_i$  ( $i = \overline{1, 3}$ ) – коефіцієнти.

Позбуваючись у залежності (6) знаменників і прирівнюючи між собою чисельники лівої та правої частин залежності, знаходимо значення коефіцієнтів  $C$  і  $C_i$ :

$$C = -\frac{\frac{\delta_0 + r_0}{b} + \frac{r_0}{a}}{\left(\frac{\delta_0 - r_0}{b} - \frac{r_0}{a}\right)^2}; \quad (7)$$

$$C_1 = C_3 = \frac{\frac{r_0}{a} - \frac{\delta_0}{b} + \frac{\left(\frac{r_0}{a} + \frac{\delta_0}{b}\right)\left(\frac{\delta_0}{b}\right)^2 - \left(\frac{r_0}{a}\right)^2}{\left(\frac{\delta_0 - r_0}{b} - \frac{r_0}{a}\right)^2 - \frac{r_0 + \delta_0}{a + b}}; \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{1}{\frac{r_0}{a} + \frac{\delta_0}{b}}. \quad (9)$$

Інтегруючи вираз (2) із врахуванням (7)–(9) у залежностях (5) і (6), отримаємо:

$$A = F \frac{Q}{2\pi H^2} M, \quad (10)$$



де  $M$  – коефіцієнт:

$$M = \frac{1}{(d+t)(t-1)t} - \frac{t}{(d-t)^2 d} + \frac{d-t + \frac{(d+t)t^2}{(t-d)^2} - \frac{d^2}{d+t}}{dt(d+t)} \cdot \ln \frac{(d+1)t}{(t-1)d}, \quad (11)$$

$$\text{де } d = \frac{r_0}{r_k - r_0}; \quad t = \frac{\delta_0}{\delta_0 - \delta_k}.$$

Зусилля витяжки рукава в зоні деформування становить [7]:

$$F = \sigma_0 2\pi r_0 \delta_0 = \kappa \xi^2 2\pi r_0 \delta_0, \quad (12)$$

де  $K$  – реологічна константа, Па·с;

$\xi$  – середня швидкість утворення відносної вільної поверхні рукава,  $\text{с}^{-1}$ .

На рисунку зображено залежність  $\xi M$  від  $\delta_0 / \delta_k$ , яка є достатньо складною, проте потрібно зазначити, що зі збільшенням відношення  $\delta_0 / \delta_k$  витрати роботи на деформування розплаву полімеру в зоні формування плівкового рукава збільшуються.

Рукав у зоні формування зазнає деформації у двох напрямках, яким відповідають певні складові роботи:

- в осьовому напрямку (вздовж осі  $x$ ):  $A_x = A \cos^2 \theta$ ;
- у радіальному напрямку:  $A_r = A \sin^2 \theta$ .

На основі аналізу рівняння (10) можна зробити такі висновки:

1. Завдяки введенню величин  $K$  (реологічної константи) і  $\xi$  (середньої швидкості утворення відносної вільної по-

верхні рукава) можна оцінити роботу з деформування рукава в зоні його формування.

2. Величина роботи деформування залежить не лише від  $\xi$ , а й від комплексного показника  $M$ , який містить компоненти мір деформування як вздовж осі рукава, так і за його радіусом.

3. Величина роботи прямо пропорційна довжині (висоті) зони формування рукава, що можна пояснити залежністю жорсткості розплаву від часу деформування (наприклад, збільшення висоти зони призводить до зменшення інтенсивності деформування й, відповідно, до зменшення жорсткості розплаву).

4. Отримана залежність для визначення роботи з деформування рукава надає змогу більш ефективно впливати на процес виготовлення рукавної полімерної плівки.

### Література

1. Вєдь Г.І., Мікульонюк І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О. Формоутворення рукава полімерної плівки (критичні параметри процесу) // Упаковка. – 2013. – № 2. – С. 50–53.
2. Вєдь Г.І., Мікульонюк І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О., Шнирук О.М. Формоутворення пакувальних матеріалів та тари з термопластів (дослідження процесу розтягування розплаву) // Упаковка. – 2013. – № 4. – С. 50–54.
3. Вєдь Г.І., Мікульонюк І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О., Шнирук О.М. Розтягування розплаву полімеру в зоні формоутворення плівки // Упаковка. – 2013. – № 5. – С. 37–40.
4. Вєдь Г.І., Мікульонюк І.О., Петухов А.Д., Шнирук О.М. В'язкопружна поведінка термоусадкової плівки // Упаковка. – 2013. – № 6. – С. 41–43.
5. Вєдь Г.І., Петухов А.Д., Мікульонюк І.О., Шнирук О.М. Теоретичне дослідження процесу одновісного розтягування розплаву полімеру // Упаковка. – 2015. – № 3. – С. 32–33.
6. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. – Т. 1. – М.: Наука, 1968. – 340 с.
7. Вєдь Г.И., Сенатос В.А., Петухов А.Д. Некоторые особенности растяжения расплавов полимеров // Химическая технология. – К.: Наук. думка, 1976. – № 3. – С. 42–44.

### Изготовление рукавной полимерной пленки (деформирование расплава полимера)

Г.И. Вєдь, к.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., И.О. Микунюк, д.т.н.

Сделана попытка определить работу, которая затрачивается на деформирование заготовки рукава в зоне его формирования на выходе из кольцевой экструзионной головки. В дальнейшем это даст возможность качественно и количественно оценить величину усадки пленочного рукава как в продольном, так и в поперечном направлениях, а также влияние на указанную усадку как вытяжки рукава (в продольном направлении), так и степени его раздува. **Ключевые слова:** рукавная полимерная пленка; деформация; напряжение; усадка; работа; зависимость.

### Making of a sleeve polymeric film (deformation of the polymer melt)

G.I. Ved, Ph.D., A.D. Petukhov, Dr., I.O. Mikulionok, Dr.

Attempt to define work which is spent for deformation of pill of a tube in a zone of its formation on an exit from ring extrusion head is made. It will allow further qualitatively and quantitatively to estimate size усадки a film sleeve both in longitudinal, and in cross-section directions, and also influence on specified shrinkage as tube extracts (in a longitudinal direction), and its blow degrees.

**Keywords:** tubular polymeric film; deformation; pressure; shrinkage; work; dependence.

