УДК 678.027.3

Розтягування розплаву полімеру в зоні формоутворення плівки

Г.І. Ведь, к.т.н., І.О. Мікульонок, д.т.н., А.Д. Пєтухов, д.т.н., В.О. Сенатос, к.т.н., О.М. Шнирук, НТУУ «КПІ», м. Київ

Останнім часом полімерні плівки, як одношарові, так і багатошарові, широко використовуються для пакування різноманітної продукції. Цей тренд сьогодні явно проявляється у пошуках нових можливостей для підвищення економічних та якісних переваг гнучких пакувальних матеріалів. Насамперед це стосується процесу їхнього виготовлення.

У наукових працях [1, 2] з дослідження термомеханічного стану полімерних плівок зроблено припущення (Г.І. Ведь) про те, що напруження під час розтягування розплавів полімерів прямо пропорційне швидкості утворення відносної вільної поверхні одержуваного виробу. Це припущення зроблено за умови сталої швидкості його витягування і температури розплаву. Водночас розтягування розплаву в зоні формоутворення рукавної плівки проходить в умовах неізотермічності і змінної швидкості.

Проаналізуємо, наскільки зазначене припущення можна застосовувати в разі формоутворення рукавної полімерної плівки, для чого розглянемо кінематику плівки в зоні її формоутворення [3].

На рис. 1 наведено схему зони формоутворення рукавної полімерної плівки. Перехід від шийки рукава (його заготовки) до зони формоутворення і від зони формоутворення безпосередньо до рукава перед лінією твердіння (кристалізації) плавний, при цьому кут θ між дотичною до поверхні рукава в зоні формоутворення та його поздовжньою віссю в нижній частині цієї зони збільшується від 0 до θ_{max}, а у верхній — зменшується від θ_{max} до 0.

Для кільцевого елементу плівки заввишки Δl у межах зони формоутворення можна записати:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_в - v_н}{\Delta l} \text{ або } \dot{\varepsilon} = \frac{dv}{dl},$$

де $\dot{\varepsilon}$ — відносна швидкість розтягування, 1/с;

$v_н$, $v_в$ — швидкість руху нижньої й верхньої частин елемента Δl відповідно, м/с.

Якщо r — поточний радіус рукава в зоні формоутворення, то з урахуванням залежності $dl = dr / \sin\theta$ отримаємо формулу для визначення відносної швидкості розтягування:

$$\dot{\varepsilon} = \sin\theta \frac{dv}{dr},$$

причому на початку і в кінці зони формоутворення $\dot{\varepsilon} = 0$ (рис. 1).

Для з'ясування закономірності зміни швидкості v руху розплаву в зоні формоутворення залежно від радіуса r було проведено експеримент. Під час сталого процесу виготовлення рукавної плівки зона формоутворення «замороджувалася» (одночасно зупиняли черв'ячний екструдер і тягнучий пристрій), після чого через однакові відрізки відстані перпендикулярно поздовжній осі рукава на поверхню плівки наносили лінії, після чого в місцях цих ліній заміряли радіус і товщину плівки. Знаючи початкову швидкість руху розплаву і площу поперечного перерізу рукава в місцях замірів, визначали швидкість у відповідних перерізах.

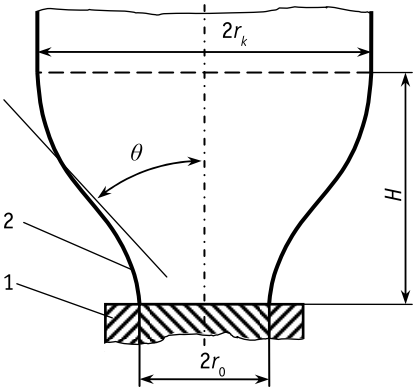

Рис. 1. *Схема зони формоутворення рукавної плівки: 1 — екструзійна головка; 2 — рукав; r_0 і $r_к$ — радіус заготовки й рукава відповідно, м; H — висота зони формоутворення рукава, м*

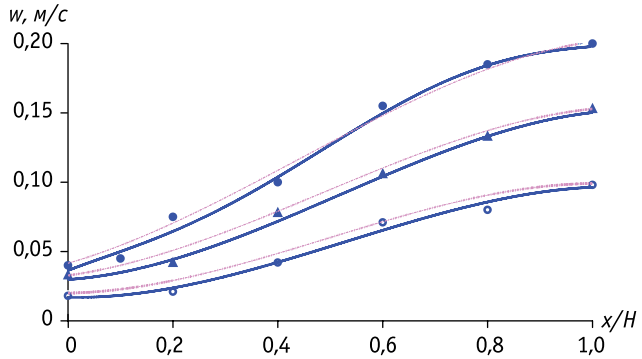

Рис. 2. *Залежність швидкості руху розплаву ПЕНГ 15803-020 у зоні формоутворення рукава по його висоті від температури розплаву на виході з головки T_0 (● — 170 °С; ▲ — 164 °С; ○ — 159 °С), отримана експериментально (—), розрахована (---)*

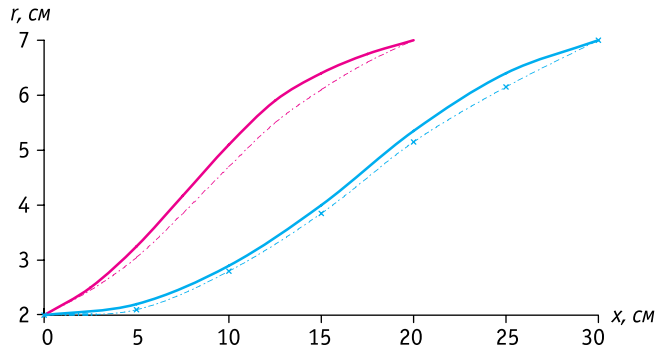

Рис. 3. *Залежність радіуса рукава плівки з Lupolen 1840D від відстані вздовж зони формоутворення за двох різних значень продуктивності екструдера: експериментальні дані (—, —) [4]; розрахункові дані (-·-·-, -·-·-); T_0 = 210 °С*

Отримані експериментальні залежності швидкості руху розплаву й радіуса рукава в зоні його формоутворення задовільно відповідають формулам:

$$v = v_0 + 0{,}5\left(v_к - v_0\right)\left[1 - \cos\left(\pi\frac{x}{H}\right)\right]; \qquad (1)$$

$$r = r_0 + 0{,}5\left(v_к - v_0\right)\left[1 - \cos\left(\pi\frac{x}{H}\right)\right], \qquad (2)$$

де v_0, $v_к$ — швидкості руху розплаву на початку і в кінці зони формоутворення рукава відповідно, м/с;
x — поздовжня координата, м ($0 \le x \le H$).
Результати експериментальних досліджень і розрахунків за залежностями (1) і (2) наведено на рис. 2 і 3 [3, 4].
Для визначення відносної швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ під час розтягування плівки продеференціюємо залежність (1):

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\pi}{2}\frac{\left(v_к - v_0\right)}{H}\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right). \qquad (3)$$

Помноживши і розділивши ліву частину виразу (3) на dl, отримаємо (з урахуванням залежностей $dv/dl = \dot{\varepsilon}$ і $dx/dl = \cos\theta$):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\pi}{2}\frac{\left(v_к - v_0\right)}{H}\cos\theta\,\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right). \qquad (4)$$

Похідна dr/dt становитиме:

$$\frac{dr}{dt} = v_r = \frac{\pi}{2}\frac{\left(r_к - r_0\right)}{H}v_x\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right),$$

де v_r, v_x — радіальна й поздовжня складові швидкості руху розплаву відповідно, м/с.
Оскільки $v_r / v_x = \mathrm{tg}\theta$, то:

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{\pi}{2}\frac{\left(r_к - r_0\right)}{H}\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right). \qquad (5)$$

З формули (5) маємо:

$$\theta = \mathrm{arctg}\left[\frac{\pi}{2}\frac{\left(r_к - r_0\right)}{H}\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right)\right]. \qquad (6)$$

Тоді з урахуванням залежності (6) формула (4) матиме вигляд:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\pi}{2}\frac{\left(v_к - v_0\right)}{H}\cos\left(\mathrm{arctg}\left[\frac{\pi}{2}\frac{\left(r_к - r_0\right)}{H}\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right)\right]\right)\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right). \qquad (7)$$

На межі зони формоутворення рукава (тобто для $x = 0$ і $x = H$) справедлива умова $\dot{\varepsilon} = 0$.
Для подальшого дослідження спростимо залежність (7), яка набуде вигляду:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\pi}{2}\frac{\left(v_к - v_0\right)}{H}\frac{\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right)}{\sqrt{1 + \left[\frac{\pi}{2}\frac{\left(r_к - r_0\right)}{H}\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right)\right]^2}}. \qquad (8)$$

Дослідимо рівняння (8) на екстремум, для чого візьмемо похідну по x:

$$\frac{d\dot{\varepsilon}}{dx} = \frac{\pi^2}{2}\frac{\left(v_к - v_0\right)}{H^2}\frac{\cos\left(\pi\frac{x}{H}\right)}{\sqrt{\left(1 + \left[\frac{\pi}{2}\frac{\left(r_к - r_0\right)}{H}\sin\left(\pi\frac{x}{H}\right)\right]\right)^3}}.$$

Для $x = H/2$ величина $d\dot{\varepsilon}/dx = 0$, при цьому похідна $d\dot{\varepsilon}/dx$ при переході через точку $x = H/2$ змінює знак з «+» на «–». Таким чином, у цій точці функція має максимум. Тобто за умови $x = H/2$ величина $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{max}$. Тому зону формування за інтенсивністю деформування розплаву можна поділити на дві ділянки: ділянку $0 \le x \le H/2$, де величина $\dot{\varepsilon}$ змінюється від 0 до $\dot{\varepsilon}_{max}$, і ділянку $H/2 \le x \le H$, у якій величина $\dot{\varepsilon}$ змінюється від $\dot{\varepsilon}_{max}$ до 0.
Під час розтягування розплаву в режимі $v = const$ відносна швидкість $\dot{\varepsilon}$ змінюється за залежністю:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l_0 + vt},$$

де l_0 — початкова довжина зразка, м;
t — час розтягування рукава (час перебування розплаву в зоні формоутворення рукава), с.

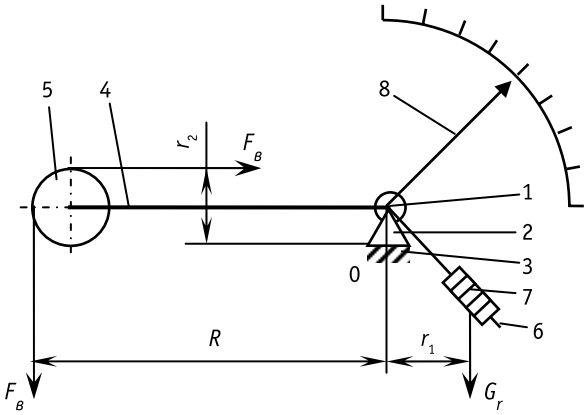

Рис. 4. *Експериментальний пристрій для вимірювання сили витягування у плівці*

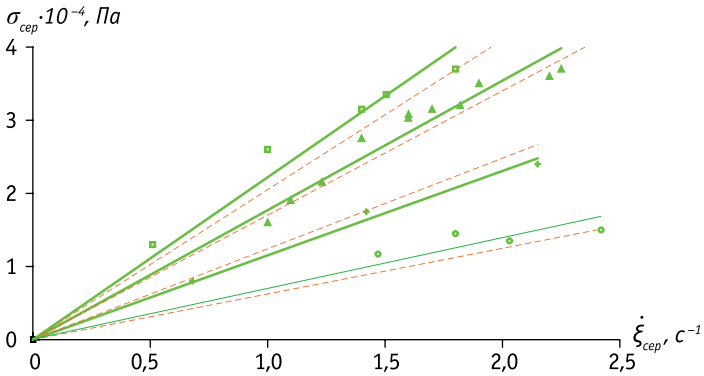

Рис. 5. *Залежність напруження $\sigma_{сер}$, яке виникає на початку зони формоутворення плівки з ПЕНГ 15803-020, від $\dot{\xi}_{сер}$ та температури (▫ — 151 °С; ▲ — 154 °С; ✚ — 170 °С; ● — 200 °С), отримана експериментально (—) та розрахована (– – –)*

За значної тривалості розтягування $\dot{\varepsilon} \to 0$, тобто умови деформування розплаву в режимі $v = const$ подібні умовам її деформування на другій ділянці зони формоутворення. Ця подібність стосується темпу збільшення деформації. Розтягування кільцевого елемента рукава в зоні формоутворення здійснюється із швидкістю, що дорівнює різниці швидкостей між верхньою ($v_в$) і нижньою ($v_н$) частинами елемента. Отже, для реального процесу формоутворення вагомими факторами впливу на темп розтягування буде не абсолютна швидкість v, а різниця $\Delta v = v_в - v_н$, і класичний режим $v = const$ відповідатиме режиму $\Delta v = const$, властивому другій ділянці зони формоутворення.

За незначної величини Δl можна припустити, що температура елемента вздовж його висоти є величиною сталою. Тоді під час розтягування i-го елемента в режимі $\Delta v = const$ (на ділянці $H/2 \le x \le H$) в основі зони формоутворення виникне напруження [2, 3]:

$$\sigma_0 = K_i \dot{\xi}_i,$$

де K_i — реологічна константа, Па·с;
$\dot{\xi}_i$ — швидкість утворення відносної вільної поверхні, 1/с.

Визначимо роботу, виконану під час розтягування i-го елемента за час Δt_i:

$$A_i = K_i \dot{\xi}_i 2\pi r_0 \delta_0 \Delta l_i, \qquad (9)$$

де δ_0 — товщина плівки в основі зони формоутворення, м;
Δl_i — приріст висоти елемента, м.

Зважаючи на те що розтягування проходить в режимі $v = const$, можна записати:

$$\Delta l_i = \Delta v_i \Delta t_i.$$

Тоді робота (9) становитиме:

$$A_i = K_i \dot{\xi}_i 2\pi r_0 \delta_0 \Delta v_i \Delta t_i. \qquad (10)$$

Формоутворення рукава супроводжується одночасним деформуванням всіх його елементів n. Загальна робота, що витрачається на формоутворення рукава, становить:

$$A = \sum_{i=1}^{n} A_i.$$

З іншого боку, ця робота витрачається на розтягування елемента від початкової l_n до кінцевої $l_к$ довжини:

$$A = P_{сер}\left(l_к - l_n\right), \qquad (11)$$

де $P_{сер}$ — середня сила розтягування рукава, Н.

Оскільки $l_к = \frac{v_к}{v_0} l_0$, а $l_n = \frac{v_n}{v_0} l_0$, то формула (11) матиме вигляд:

$$A = P_{сер} l_0 \frac{v_к - v_n}{v_0}, \qquad (12)$$

де $P_{сер} = \sigma_{0сер} 2\pi r_0 \delta_0$;
$l_0 = v_0 \Delta t_i$;
$\sigma_{0сер}$ — середнє напруження в рукаві на початку зони формоутворення, Па.

Тоді залежність (12) набуде вигляду:

$$A = \sigma_{0\,сер}\, 2\pi r_0 \delta_0 \Delta t_i \left(v_к - v_n\right). \qquad (13)$$

З урахуванням залежностей (10), (12) і (13), а також того, що $(v_к - v_n)/n = \Delta v_i$, можна отримати:

$$\sigma_{0\,сер} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i \dot{\xi}_i}{n},$$

або, переходячи до середніх величин:

$$\sigma_{0\,сер} = K_{сер} \dot{\xi}_{сер}, \qquad (14)$$

де швидкість утворення відносно вільної поверхні:

$$\dot{\xi}_{сер} = \frac{S_к - S_n}{S_0 t}, \qquad (15)$$

де t — час проходження елементом другої ділянки, с;
$S_к$, S_n — площа поверхні відповідно до і після формоутворення плівкового рукава, м²;
S_0 — початкова площа вільної поверхні рукава, м².

Вирази для зони формоутворення мають вигляд:

$$S_к = 4\pi \frac{r_к v_к}{\sqrt{k}}; \qquad (16)$$

$$S_n = \pi\left(r_к + r_0\right) \frac{v_к + v_0}{\sqrt{0{,}5\left(k+1\right)}}; \qquad (17)$$

$$S_0 = 4\pi r_0 v_0; \quad (18)$$

$$k = \frac{v_к}{v_0}. \quad (19)$$

Підставляючи залежності (16–19) у формулу (15), отримаємо:

$$\dot{\xi}_{сер} = \frac{1}{t}\left(\beta\sqrt{k} - 0{,}353(\beta+1)\sqrt{k+1}\right),$$

де $\beta = r_{сер} / r_0$;

$t = H / (2v_{сер})$;

$v_{сер}$ — середня швидкість на другій ділянці зони формоутворення, м/с.

Значення $v_{сер}$ можна отримати, інтегруючи рівняння (1) у діапазоні [H; H/2].

Реологічна константа $K_{сер}$ (Па) визначається з емпіричної залежності, отриманої в ізотермічних умовах, яка для ПЕНГ марки 15803-020 має вигляд [2, 3]:

$$K = 75 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{T_0} - 4{,}15 \cdot 10^{-3}\right), \quad (20)$$

де T_0 — температура розплаву на виході з екструзійної головки, °С.

Також аналогічні залежності було отримано для інших марок ПЕНГ:

- марка 17902-017 (17803-015):

$$K = 154 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{T_0} - 5{,}4 \cdot 10^{-3}\right); \quad (21)$$

- марка 15203-003 (15303-003):

$$K = 188 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{T_0} - 3{,}5 \cdot 10^{-3}\right). \quad (22)$$

Урахувавши в залежностях (20–22) умови неізотермічності, тобто підставивши замість T_0 середню температуру по висоті зони формування $T_{сер}$, яку отримано інтегруванням виразу локального значення температури, одержимо значення величини $K_{сер}$.

Експериментальна перевірка залежності (14) здійснювалась на лабораторній установці для виготовлення рукавної полімерної плівки, на якій вимірювали швидкість екструзії, швидкість витягування, температуру розплаву на виході з головки, а також силу витягування. Швидкість витягування та екструзії визначали зважуванням контрольних зразків плівки, отриманих за певний час, і перерахунком через площу поперечного перерізу рукава і формувальної щілини головки. Температуру розплаву визначали за допомогою термопари, вмонтованої в головку так, що її спай розташовувався безпосередньо у порожнині формувальної щілини.

Силу витягування рукава вимірювали пристроєм, установленим на ділянці проходження рукава перед витяжними валками (рис. 4). Він складається з осі 1, яка спирається двома призмами 2 на опори 3. До осі двома пластинами 4 прикріплені вільнообертовий ролик 5, а також штанга 6 з вантажами 7 і стрілкою 8. Під час роботи стан рівноваги системи пристрою забезпечувався за умови рівності моментів сили $F_в$, що діяла на ролик, і ваги вантажів. Зі зміною сили $F_в$ змінювався момент сили відносно точки 0. Це порушувало рівновагу, і система пристрою починала обертатися навколо точки 0 доти, поки не досягалась нова рівновага моментів. Цій рівновазі відповідало певне положення стрілки, яке вказувало за відповідного тарування на величину сили $F_в$, що спричиняла цю зміну в системі. Вагою вантажів регулювали інтервал виміру сили витягування. Значення поділки шкали становило 0,01 Н/мм.

Результати досліду обробляли у вигляді залежності $\sigma_{0сер} = f\left(\dot{\xi}_{сер}\right)$. Точки експериментальних даних (рис. 5) апроксимовані у прямі лінії, кут нахилу яких залежить від температури T_0.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних показало їхню задовільну збіжність. Але за ступеня роздування більше 2,0–2,5 спостерігалося збільшення розходження цих даних. Очевидно, у цих умовах виявляється вплив двовісного розтягування плівки. Таким чином, залежність (14) можна рекомендувати для визначення напружень, що виникають у рукаві полімерної плівки в зоні його формоутворення з урахуванням неізотермічності процесу, обмежуючись ступенем роздування 2,0–2,5. Також показана аналітично й підтверджена експериментально можливість описання процесу розтягування розплаву полімеру у випадку його двовісного розтягування на основі припущення Г.І. Ведя [2] для одновісного розтягування.

Література

1. *Ведь Г.І., Мікульонок І.О., Пєтухов А.Д., Сенатос В.О.* Формоутворення рукава полімерної плівки (критичні параметри процесу) // Упаковка. — 2013. — № 2. — С. 50–53.
2. *Ведь Г.І., Мікульонок І.О., Пєтухов 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. *Ведь Г.И., Сенатос В.А., Петухов А.Д.* Определение напряжений при формовании рукавной полимерной пленки // Химическая технология (Киев, «Наук. думка»). — 1979. — № 4(106). — С. 34–37.
4. *Ast Willi.* Der Abkuhlvorgang beim Herstellen von Blasfolien aus Polyäthylen niedriger Dichte / Kunststoffe. — 1973. — Bd 63, N 7. — S. 427–433.

Растяжение расплава полимера в зоне формообразования пленки

Г.И. Ведь, к.т.н., И.О. Микулёнок, д.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., В.А. Сенатос, к.т.н., О.Н. Шнырук

В статье исследована возможность использования предположения Г.И. Ведя, апробированного для реологических расчетов одноосного формообразования изделий из полимеров, для анализа процесса изготовления рукавной полимерной пленки.

Ключевые слова: полимер; рукавная пленка; формование.

Stretching the polymer melt in the area of film formation

G.I. Ved, Ph.D., I.O. Mikulenok, Dr., A.D. Petukhov, Dr., V.A. Senatos, Ph.D., O.N. Shnyruk

Possibility of use of the assumption of G.I.Ved' approved for rheological calculations of uniaxial forming of products from polymers, for the analysis of process of manufacturing a tubular polymeric film is investigated.

Key words: polymer; tubular film; forming.