

Формоутворення рукава полімерної плівки (критичні параметри процесу)

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

Екструзія з роздувом широко використовується для виробництва плівок з різних полімерів, які мають широке застосування в різних галузях, у тому числі у пакувальній індустрії, — насамперед термоусаджувальних, стретч- і твіст-плівок для виготовлення різних видів пакування.

Неізотермічне формоутворення рукава полімерних плівок, складна залежність опору розтягуванню розплаву полімеру від температури, швидкості розтягування і величини накопичених внутрішніх напружень, наявність двостороннього розтягування істотно ускладнюють математичний опис процесу виготовлення рукавів полімерних плівок методом екструзії. Тому для розрахунку параметрів цього процесу приймалися, приймаються і прийматимуться певні припущення.

Перша спроба розроблення математичної моделі формування рукава із припущенням ізотермічності процесу, сталості в'язкості розплаву і несумісного аеродинамічного впливу потоку охолодженого повітря на рукав полімерної плівки була зроблена на початку 1970-х рр. [1, 2]. Пізніше була розроблена модель процесу рідинного охолодження рукавної полімерної плівки [3], а також досліджені умови утворення шийки полімерного рукава під час роздуву повітрям екструдованої трубчастої заготовки [4–7].

Водночас досі відсутній достатньо повний і коректний математичний опис реального процесу формоутворення рукава в умовах зміни його товщини, а також стану полімеру під час інтенсивного охолодження формованого рукава. Це стримує подальше підвищення продуктивності виробництва полімерних плівок, не дає змоги прогнозовано здійснювати їхню термообробку, що вкрай необхідно, особливо для виготовлення термоусаджувальних, стретч- і твіст-плівок.

У працях [8–10], виходячи з кінематичних параметрів процесу формування рукава, були отримані залежності для визначення його геометричних і теплових параметрів, які забезпечують задовільну збіжність результатів розрахунку з експериментальними даними. Проте зазначені залежності отримані без урахування в'язкопружних характеристик полімеру, що ускладнює визначення деяких параметрів процесу: критичної швидкості повітря і ширини його потоку, граничної швидкості розтягування полімеру, критичної висоти лінії твердіння.

Метою статті є одержання залежностей для визначення зазначених параметрів.

Визначимо критичну висоту лінії твердіння полімеру. Для цього виділимо двома площинами ділянку формування плівки: по лінії, розміщеній на висоті h , і по верхній площині екструзійної головки (рисунок). Позначення на цьому рисунку такі: F — сила витягування рукава, Н; F_0 — сила, що протидіє витягуванню рукава (в'язкопружна сила), Н; F_{nom} — сила потоку повітря, Н; F_a — підйомна аеродинамічна сила, що виникає під час обдування рукава повітрям, Н; P — сила від внутрішнього тиску, Н; G — вага рукава, Н; r_0 — початковий середній радіус трубчастої заготовки на виході з екструзійної головки, м; r — поточний середній радіус плівкового рукава на ділянці його роздуву, м; r_k — середній радіус сформованого плівкового рукава, м; H — висота ділянки роздуву плівкового рукава, м; h — поточна висота в зоні формування рукава, м; δ_0 — початкова товщина трубчастої заготовки на виході з екструзійної головки, м; δ_k — кінцева товщина рукавної плівки, м; α — кут атаки рукава потоком повітря, град.; θ — половина кута плівкового рукава на ділянці його роздуву, град.

Перш за все зробимо припущення, що розплав полімеру на виході з кільцевої щілини екструзійної головки внаслідок

його швидкого розтягування не розбухає, а тому початкова товщина трубчастої заготовки δ_0 дорівнює величині зазначеної кільцевої щілини.

Рівняння рівноваги сил у векторній формі для ділянки формування плівки має вигляд [11]:

$$\vec{F} + \vec{F}_a + \vec{F}_{nom} + \vec{G} + \vec{F}_0 + \vec{P} = 0. \quad (1)$$

Визначимо проекцію суми векторів сил у рівнянні (1) на повздовжню (вертикальну) вісь рукава:

$$F + F_a + F_{nom} \sin \alpha - F_0 - G - P = 0. \quad (2)$$

Припустимо, що висота лінії твердіння визначається міцністю полімеру, який на ділянці формування зазнає найбільшого навантаження тоді, коли потік повітря не впливає на рукав, що можливо за незначного тиску, тобто виконується умова:

$$F_a + F_{nom} \cos \alpha = 0. \quad (3)$$

У цьому разі верхні шари рукава на ділянці формування перебувають під дією сили:

$$F = F_0 + (G + P), \quad (4)$$

яка збільшується із збільшенням висоти лінії затвердіння. Оскільки $F_0 > 0$, то залежність (4) можна подати у вигляді нерівності:

$$F - P > G. \quad (5)$$

Виразимо складові рівняння (5) через величини, які характеризують матеріал рукава і параметри процесу. Тоді можна отримати:

$$F = 2\pi r \delta \sigma, \quad (6)$$

де r — поточний середній радіус рукава, м;

δ — поточна товщина плівки, м;

σ — напруження під час розтягування, Па.

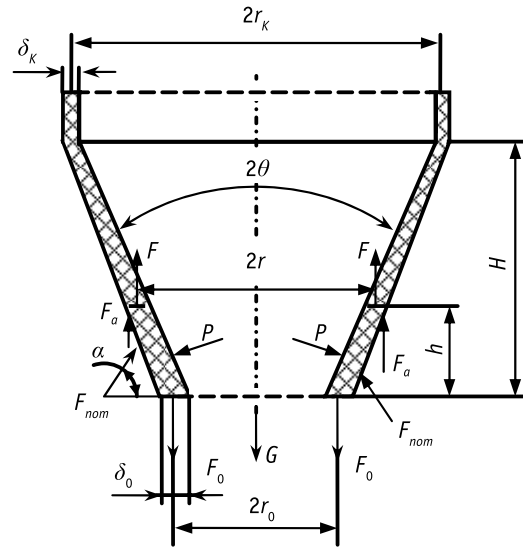


Рисунок. Схема сил, які діють на ділянці формування рукавної плівки

Для визначення ваги рукава виділимо кільцевий елемент рукава заввишки dh . Його вага становитиме:

$$dG = 2\pi \rho g \left[\frac{r + (r + dr)}{2} \right] \left[\frac{\delta + (\delta - d\delta)}{2} \right] dh, \quad (7)$$

де ρ — густина полімеру, кг/м³;
 g — прискорення вільного падіння, м/с².

Нехтуючи величинами другого порядку малості, отримуємо:

$$dG = 2\pi \rho g r \delta dh. \quad (8)$$

Відомо, що залежність швидкості полімеру може бути апроксимована прямою вигляду [12]:

$$v = v_0 + \frac{v_k - v_0}{H} h, \quad (9)$$

де v_0, v_k — початкова швидкість розплаву (на виході з екструзійної головки) і швидкість витягування трубчастої заготовки відповідно, м/с.

Припускаючи, що густина полімеру у процесі формування рукава $\rho = const$, з рівняння нерозривності отримуємо:

$$r_0 \delta_0 v_0 = r \delta v. \quad (10)$$

Форма рукава на ділянці формування близька до конічної [12], тобто залежність поточного радіуса рукава від поточної висоти можна прийняти у вигляді:

$$r = r_0 + \frac{r_k - r_0}{H} h. \quad (11)$$

Підставивши співвідношення (9) і (11) у формулу (10), отримаємо:

$$\delta = \frac{r_0 \delta_0 v_0}{\left(r_0 + \frac{r_k - r_0}{H} h \right) \left(v_k + \frac{v_k - v_0}{H} h \right)}. \quad (12)$$

Сила внутрішнього тиску на рукав:

$$P = \pi p (r^2 - r_0^2), \quad (13)$$

де p — тиск всередині рукава, Па.

З урахуванням інтегрування співвідношення (6) в інтервалі висоти $[0; h]$, а також залежностей (8, 11–13) розв'язуємо нерівність (5) відносно висоти H (для $h = H$):

$$H < \frac{2\pi r_k \delta_k \sigma_k - \pi \rho (r_k^2 - r_0^2)}{2\pi r_0 \delta_0 \left(\frac{v_0}{v_k - v_0} \right) \rho g \ln \frac{v_k}{v_0}}, \quad (14)$$

де δ_k, σ_k — товщина плівки (м) і напруження під час розтягу (Па) у рукаві на лінії твердіння відповідно.

У праці [9] показано, що міцність полімерного рукава в розплавленому стані визначається його довговічністю під час розтягування, тобто часом до розриву.

Із збільшенням навантаження полімерного рукава його «довговічність» зменшується і може зрівнятися з часом його перебування на ділянці формоутворення. Відповідне цьому часу напруження σ є максимально допустимим, а висота лінії твердіння, яка визначена з нерівності (14) для $\sigma_{кр} = \sigma$ — критичною.

Унаслідок аналізу теплообміну між розплавом і охолодним повітрям на ділянці формування рукава у праці [13] було отримано залежність для визначення температурного поля в рукаві:

$$\Theta = \exp \left[-\frac{\alpha_1 H}{v_0 \delta_0 c_p \rho} \right] \left(1 + 0,5 \left(\frac{r_k}{r_0} - 1 \right) \right), \quad (15)$$

де Θ — коефіцієнт температури;

α_1 — коефіцієнт тепловіддачі від рукавної плівки до навколишнього повітря, Вт/(м²·К);

c_p — масова теплоємність розплаву полімеру, Дж/(кг·К).

Розв'язуючи разом залежності (14 і 15), можна визначити, чи забезпечує теплообмін умови збереження форми рукава, а також потрібні значення параметрів процесу (швидкість обдування рукава, коефіцієнт тепловіддачі та інші) для забезпечення розташування лінії твердіння в межах висоти H , режим ефективного проведення процесу (максимальні коефіцієнт тепловіддачі і швидкість екструзії), критичну швидкість і ширину потоку повітря.

Для визначення критичної ширини потоку повітря в місці контакту з рукавом розглянемо вираз:

$$F_a + F_{nom} \sin \alpha = F_0 + (G + P), \quad (16)$$

який описує граничний режим обдування, коли витягування плівки може здійснюватися аеродинамічними силами. Визначимо складові виразу (16). Підйомна аеродинамічна сила становить:

$$F_a = \frac{\pi \rho_n \bar{v}_n^2}{2} (r_k^2 + r_0^2), \quad (17)$$

де ρ_n — густина повітря, кг/м³;

\bar{v}_n — середня швидкість потоку повітря біля поверхні рукава, м/с:

$$\bar{v} = \frac{1}{l} \int_0^l v_n dl, \quad (18)$$

де l — довжина конічної частини рукава, м;

v_n — поточна по висоті рукава швидкість потоку повітря [12], м/с:

$$v_n = v_m \exp(-al - d), \quad (19)$$

де v_m — швидкість повітря в місці контакту з рукавом, м/с; a, d — коефіцієнти:

$$a = 0,2 \frac{k}{b_m} \sqrt{\frac{r_k}{r_0}};$$

$$d = 0,04 \sqrt{\frac{r_k}{r_0}},$$

де k — коефіцієнт турбулентності повітря;

b_m — ширина потоку повітря в місці контакту з рукавом, м. Після інтегрування виразу (18) з урахуванням залежності (19) отримуємо:

$$\bar{v} = \frac{v_m}{la} (e^{-d} - e^{-al-d}). \quad (20)$$

В'язкопружна сила у полімері на виході з екструзійної головки:

$$F_0 = 2\pi r_0 \delta_0 \sigma_0. \quad (21)$$

Сила потоку повітря:

$$F_{nom} = 2\pi r_0 b_m \rho_m \frac{v_m^2}{2} \cos \alpha. \quad (22)$$

Визначимо проекцію суми векторів сил у рівнянні (1) на поперечну вісь рукава (радіальний напрямок):

$$F_{nom} \cos \alpha = P \cos \theta.$$

Для елемента одиничної поверхні:

$$\rho_m \frac{v_m^2}{2} \cos \alpha = P \cos \theta. \quad (23)$$

З рівняння (23) отримуємо:

$$v_m = \sqrt{\frac{2P \cos \theta}{\rho_m \cos \alpha}} P = v_{kp}. \quad (24)$$

З рівняння (24) виходить, що для $\alpha \rightarrow 90^\circ$ швидкість $v_{kp} \rightarrow \infty$. Проте практика свідчить, що швидкість v_m так набагато не може бути збільшена, оскільки з досягненням деякого її критичного значення порушується стабільність процесу. Тому вважається [12], що найдоцільнішим є кут $\alpha \leq 45^\circ$.

Після підстановки виразів (17, 21, 22 і 24) у формулу (16) та для $r = r_{kp}$ і $l = L$ можна обчислити ширину потоку повітря в місці контакту з рукавом:

$$b_m = \frac{1}{P \cos \theta \operatorname{tg} \alpha} \left[\delta_0 \sigma_0 + \frac{G + P}{2\pi r_0} + \frac{\rho_n \bar{v}_n^2 (r_k^2 - r_0^2)}{4r_0} \right]. \quad (25)$$

Рівняння (25) розв'язується методом послідовних наближень.

Знаючи величину b_m , можна визначити [12] ширину щілини охолодного кільця. Цей параметр необхідний для конструювання охолодних систем і визначення витрати охолодного повітря.

Під час виготовлення плівки можливий випадок, коли виконується умова:

$$F_a + F_{nom} \sin \alpha = G + P, \quad (26)$$

при цьому співвідношення (2) матиме вигляд:

$$F = F_0. \quad (27)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (6), (12), (20) і (27), отримуємо вираз:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\left(r_0 + \frac{r_k - r_0}{H} h \right) \left(v_0 + \frac{v_k - v_0}{H} h \right)}{r v_0}, \quad (28)$$

який описує зміну напруження в рукаві вздовж поздовжньої вісі.

За умови $h = H$ вираз (28) набуде вигляду:

$$\sigma_{kp} = \sigma_0 \frac{v_{kp}}{v_0}. \quad (29)$$

Співвідношення (29) дає змогу визначити напруження в розплаві біля лінії твердіння залежно від швидкості руху рукава.

Якщо в залежність (29) замість величини σ_0 підставити її граничне значення, яке передує розриву полімерної плівки, можна визначити граничну швидкість її витягування. Отримана залежність (26) відповідає оптимальному режиму виготовлення рукава полімерної плівки, за якого процес проходить у широкому діапазоні початкової температури розплаву полімеру, а швидкість повітря, котра забезпечує потрібну підйомну силу, менша за швидкість повітря, що забезпечує граничний режим обдування, і, як засвідчує практика, перебуває в ділянці стійкого процесу формування рукава полімерної плівки роздувом.

Література

1. Pearson J.R.A., Petrie C.J.S. A Fluid-Mechanical analysis of the film-blowing process // *Plastics Polymers*. — 1970. — Vol. 38. — № 4. — P. 85–94.
2. Ast W. Der Abkühlvorgang beim Herstellen von Blasgolian aus Polyäthylen niedriger Dichte // *Kunststoffe*. — 1973. — Bd 63. — № 7. — S. 427–439.
3. Mikulionok I.O., Radchenko L.B. Simulation of Liquid Cooling of an Extruded Sleeve Plastic Film // *Russian Journal of Applied Chemistry*. — 2011. — Vol. 83. — № 6. — P. 1 080–1 084.
4. Goncharenko V.V., Mikulenok I.O., Shvachko D.G., Shved D.N. Development of an identification system for biaxially oriented polymer films based on the degree of their transverse



extension // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2010. — Vol. 83. — № 5. — P. 1 010–1 015.

5. Goncharenko V., Kononchuk E., Mikulionok I., Shvachko D., Shved D. Formation of the neck in the tubular polymer film produced by blow-molding extrusion // Journal for Technology of Plasticity. — 2012. — Vol. 37. — № 1. — P. 69–84.

6. Гончаренко В.В., Швед М.П., Мікульонюк І.О., Лелека О.М., Кравченко Є.В. Ступінь нестационарності процесів формування рукавних двовісноорієнтованих полімерних плівок // Вісник НТУУ «КПІ». Напрямок «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2008. — № 2. — С. 39–44.

7. Гончаренко В.В., Кравченко Є.В., Мікульонюк І.О., Швед Д.М. Визначення напружень у процесі виробництва рукавної полімерної плівки // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 6/7(54). — С. 54–57.

8. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. — СПб.: Профессия, 2010. — 560 с.

9. Сенатос В.А., Гончаренко В.В., Петухов А.Д., Малкин А.Я. Исследование процесса формирования рукавной пленки // Химическая технология. — 1974. — № 5. — С. 51–53.

10. Малкин А.Я., Волосевич В.В. Исследование монодисперсных полиизопренов в широком диапазоне скоростей деформирования методом одноосного растяжения // Реология полимерных дисперсных систем и реофизика: VIII Всесоюзный симпозиум по реологии: материалы. — Ч. 2. — Минск: 1975. — С. 3–9.

11. Лукач Ю.Е. Петухов А.Д., Сенатос В.А. Оборудование для производства полимерных пленок. — М.: Машиностроение: 1981. — 224 с.

12. Сенатос В. А. Исследование и разработка систем охлаждения рукавных полимерных пленок: Автореф. канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии». — К.: 1973. — 22 с.

13. Сенатос В.А., Гончаренко В.В., Петухов А.Д., Малиновский В.В., Лукач Ю.Е. О механизме раздува рукава при производстве полимерных пленок методом раздува // Химическое машиностроение: респ. межвед. научн.-техн. сб. — К.: Техника, 1974. — Вып. 19. — С. 23–26. ✓

Формообразование рукава полимерной пленки (критические параметры процесса)

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

На основе анализа сил, действующих на участке формирования рукава полимерной пленки, получены расчетные зависимости для некоторых параметров процесса ее стабильного формирования.

Ключевые слова: полимер; рукавная пленка; вытягивание; скорость; сила.

Formation of a tubular polymer film (critical parameters of process)

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

On the basis of the analysis of the forces operating on a site of formation of a tubular polymer film, settlement dependences for some parameters of process of its stable formation are received.

Key words: polymer; tubular film; stretching; speed; force.



ЭЛИТНАЯ ПЛАСТИКОВАЯ
упаковка для вашей
продукции



ООО "ПП" СЕРВИС-ПАК"

+38 050 400 7324
+38 050 302 5841

+38 057 754 7879
+38 057 736 0343

office@service-pack.com.ua
www.service-pack.com.ua