

УДК 678.027.3

В'язкопружна поведінка термоусадкової плівки

Г.І. Ведь, к.т.н., І.О. Мікульонок, д.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., О.М. Шнирук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Якість пакування продукції в термоусадкову полімерну плівку передусім залежить від властивостей термоусадкового матеріалу (а саме, напружень у плівці та величини її усадки), також від умов проведення процесу пакування (зокрема, температури в камері усадки та часу перебування в ній пакованого об'єкта). Нині застосовують термоусадкові полімерні плівки, виготовлені рукавним або плоскощільним методом [1].

У цій статті наведено результати досліджень поведінки рукавної термоусадкової плівки з поліетилену низької густини як під час її виготовлення, так і під час використання. Термоусадкові плівки, виготовлені з кристалічних полімерів, під час застосування піддаються впливу деформації за температури вище від температури плавлення $T_{пл}$ за умови подальшого швидкого охолодження розплаву до температури $T < T_{пл}$, що забезпечує фіксацію деформованої конформаційної структури полімеру [2].

Під час деформування розплаву в умовах підвищеної швидкості в ньому розвиваються деформація плинину ε_m та високоеластична деформація $\varepsilon_{ве}$, які за певної швидкості охолодження зберігають у плівці свої значення і при цьому залишаються нерівноважними. Ця форма деформації обумовлює подальшу поведінку виробів, у результаті нагрівання яких вище за температуру $T_{пл}$ має місце прискорена релаксація напружень, нагромаджених у процесі їхнього виготовлення. Відомо, що у виробі, який зазнав швидкої деформації розтягу за певного напруження, і деформований стан та розміри якого зафіксовані охолодженням,

розвивається високоеластична деформація, величина якої наближається до рівноважного значення. При цьому кожній величині напруження відповідає певна величина деформації, а саме: напруження зменшується з наближенням до стану рівноваги [2, 3].

Подібні процеси відбуваються і в термоусадковій плівці під час пакування: це незмінність розмірів, зменшення напруження та залежність його від часу. Також треба взяти до уваги те, що за температури $T > T_{пл}$ у плівці одночасно розвиваються два типи деформації: високоеластична та деформація плинину. Рушійною силою обох видів деформації є напруження, яке нагромадилося у плівці в результаті її виготовлення й було зафіксовано (заморожено) під час її охолодження.

Усадкові явища в полімері тісно пов'язані з релаксаційними. Вихід на рівноважну деформацію характеризується часом запізнення, який оцінюється відношенням в'язкості до модуля пружності під час розтягу. Кінетична зміна напруження за постійної деформації, тобто процес релаксації, має релаксаційний спектр, який складається з притаманних для кожного релаксатора часів релаксації.

Для наочності подальших міркувань було запропоновано модель в'язкопружної поведінки термоусадкової плівки під час її використання, тобто під час процесу пакування. Модель містить послідовно з'єднані між собою пружне тіло Гука і в'язку рідину Ньютона (рисунок а, б). Також відома аналогічна за формою, але інша за змістом механічна модель тіла Максвелла (рисунок в). Розглянемо ці моделі та їхні основні відмінності більш докладно.

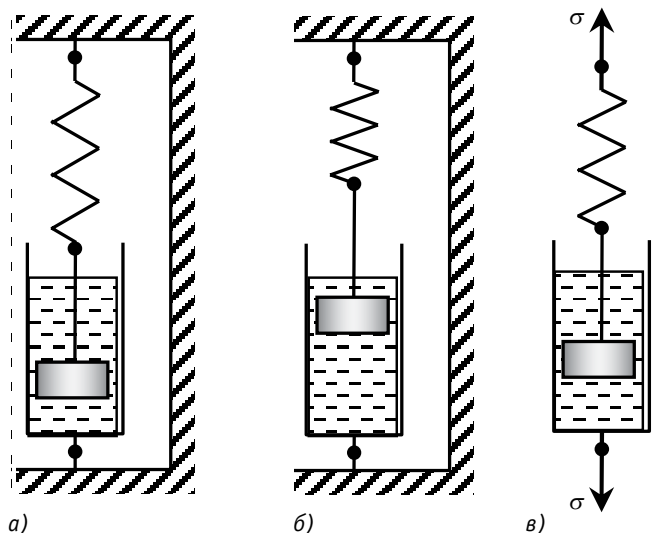


Рисунок. Механічні моделі термоусадкової плівки: запропонованої авторами (а) — ($T < T_{пл}$) та (б) — ($T > T_{пл}$); Максвелла (в)

У моделі Максвелла під дією напруження σ елемента Гука розвивається деформація елемента Ньютона, яка його зменшує. Здійснюється уповільнена релаксація деформації елемента Гука за рахунок збільшення деформації елемента Ньютона і, відповідно, всієї моделі Максвелла. Після припинення дії напруження ($\sigma = 0$) система матиме певну кінцеву деформацію, яка відповідає деформації плинності елемента Ньютона.

Розглянемо дію моделі термоусадкової плівки. У плівці заморожена неврівноважена високоеластична деформація, якій відповідає певне напруження σ (аналогічно елементу Гука). Під час зростання температури $T > T_{nl}$ підвищена рухомість ланок полімерних ланцюгів призводить до зміни конформатції ланцюгів (скорочення їхньої довжини) у напрямку дії напруження й переміщення одних відносно інших, що є деформацією плинності (аналогічно елементу Ньютона). Скорочення довжини ланцюгів компенсується їхнім взаємним переміщенням, тому кінцева деформація відсутня. Саме в цьому і полягає відмінність моделей, які розглянуто.

Аналізуючи модель термоусадкової плівки, потрібно зазначити наступне:

- максимальне напруження усадження під час пакування має місце на початку процесу (за відсутності різниці між початковою довжиною плівки й периметром об'єкта пакування);
- напруження усадження зменшується зі збільшенням часу перебування плівки в умовах пакування.

З урахуванням зазначеного визначимо напруження усадження під час пакування. Для цього розглянемо однобічно напрямлену поздовжню усадку за таких початкових умов:

- температура плівки впродовж процесу усадження не змінюється;
- довжина плівки, що обтягує пакований об'єкт, не більша за периметр об'єкта в напрямку усадження.

Для запропонованої моделі маємо:

$$\sigma_{se} = \sigma_m, \quad (1)$$

де σ_{se} — напруження, що відповідає величині високоеластичної деформації ε_{el} , під час усадження, Па;

σ_m — напруження зміщення ланок макромолекул одна відносно одної під час усадження (границя плинності за розрахункової температури), Па.

У цій моделі σ_{se} — чинник, що спричиняє появу напруження σ_m . Також основою подальших висновків є припущення, що робота, витрачена на формування певної структури плівки під час її виготовлення, має потенційний характер, тобто після циклу «охолодження — нагрівання» у полімері утворюється активне зусилля (себто напруження σ_{se}).

Визначимо роботу, витрачену на формування плівки за одиницю часу:

$$A = 2\pi r_k \delta_k v_k \sigma_k, \quad (2)$$

де r_k , δ_k , v_k — радіус рукава (м), товщина плівки (м) і швидкість її руху (м/с) у кінці зони формоутворення відповідно; σ_k — напруження в кінці зони формоутворення, Па.

Згідно з результатами попередніх досліджень [4] напруження в зоні формоутворення плівки дорівнює:

$$\sigma_0 = K_{sep} \xi_{sep},$$

де K_{sep} — реологічна константа, Па·с;

ξ_{sep} — середня швидкість утворення відносної вільної поверхні, 1/с.

З умови рівності сил розтягування плівки в зоні формоутворення маємо:

$$\sigma_k = \sigma_0 \frac{r_0 \delta_0}{r_k \delta_k}, \quad (3)$$

де r_0 , δ_0 — радіус і ширина кільцевої щілини формувальної головки відповідно, м.

Після підстановки залежності (3) у формулу (2) можна отримати:

$$A = 2\pi r_0 \delta_0 v_k \sigma_0, \quad (4)$$

Визначена за формулою (4) робота витрачається на деформацію плинності (необоротну) і високоеластичну деформацію (оборотну), тобто робота відповідно до формули (4) є сумою двох складових:

$$A = A_{el} + A_m,$$

де A_{el} — робота, витрачена за одиницю часу на високоеластичну деформацію (на формування певної структури), Вт; A_m — робота, витрачена за одиницю часу на деформацію плинності, Вт.

За умови миттєвого охолодження величина A_{el} набуває якості потенціальної роботи.

Враховуючи залежність (4), можна визначити співвідношення A_m/A :

$$\frac{A_m}{A} = \frac{2\pi r_0 \delta_0 v_m \sigma_0}{2\pi r_0 \delta_0 v_k \sigma_0} = \frac{v_m}{v_k} = f,$$

де v_m — швидкість деформації плинності в зоні формоутворення, м/с;

f — міра необоротності деформації.

Тоді:

$$A_{el} = A(1 - f).$$

Визначимо роботу, віднесено до одиниці поверхні плівки:

$$a_{el} = \frac{A_{el}}{2\pi r_k v_k} = \frac{2\pi r_0 \delta_0 v_k \sigma_0 (1 - f)}{2\pi r_k v_k} = \frac{r_0}{r_k} \delta_0 \sigma_0 (1 - f). \quad (5)$$

З урахуванням нерозривності потоку в зоні формоутворення маємо:

$$r_0 \delta_0 = r_k \delta_k \frac{v_k}{v_0}, \quad (6)$$

де v_0 — швидкість переміщення розплаву на виході з кільцевої щілини формувальної головки (швидкість екструзії), м/с.

Враховуючи залежність (6), формула (5) набуває вигляду:

$$a_{el} = \delta_k k \sigma_0 (1 - f),$$

де $k = v_k/v_0$ — міра витягування плівкового рукава в зоні формоутворення.

Оскільки площа плівки, яка перебуває в контакті з об'єктом пакування, становить $S_k = cl$ (c — ширина плівки, м; l — довжина плівки в напрямку усадження, м), то:

$$\sigma_{se} = \frac{cl a_{el}}{c \delta_k l_{yc}} = \frac{cl \delta_k k \sigma_0 (1 - f)}{c \delta_k l_{yc}} = \frac{l}{l_{yc}} k \sigma_0 (1 - f),$$

де $l_{yc} = lb$ — різниця між початковою та кінцевою довжинами плівки під час її вільного усадження, м;

b — міра усадки, використана під час пакування.



Якщо b_0 — паспортне значення усадки термоусадкової плівки, то $b < b_0$.

Отже, напруження, яке відповідає усадці b , дорівнює:

$$\sigma_{ve} = \frac{k(1-f)}{b} \sigma_0. \quad (7)$$

Напруження σ_{ve} є активним зусиллям, що обумовлює появу в розплаві полімеру реактивної складової, яка є напруженням плинності, що відповідає закону Трутона:

$$\sigma_m = \eta \dot{\epsilon}_f, \quad (8)$$

де η — поздовжня в'язкість, Па·с [5];

$\dot{\epsilon}_f$ — швидкість відносної деформації плинності під час розтягування, 1/с.

Оцінимо діапазон швидкостей, у якому проходить усадження. Найімовірніше значення використаної усадки дорівнює $b = 0,2...0,3$. За оптимального часу проведення пакування до $t \leq 20$ с швидкість деформації складатиме $\dot{\epsilon}_f = b/t = 0,01...0,02$ с⁻¹. Відомо [3], що за цієї інтенсивності деформації поздовжня в'язкість залежить лише від температури, а ньютонівська в'язкість μ для плівок визначається з виразу $\eta = 2\mu$.

Після підстановки залежностей (8) і (7) у формулу (1) можна отримати:

$$\frac{k(1-f)}{b} \sigma_0 = \eta \frac{b}{t}. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (9) дає змогу зробити такі висновки:

- найбільше значення напруження усадки має місце на початку процесу усадження;
- незалежно від паспортного значення усадки плівки b_0 з підвищенням температури напруження усадки зменшується (величина η);
- доцільно використовувати такий діапазон величин усадження, щоб виконувалась нерівність $b \ll b_0$.

Література

1. Малкин А.Я. Расчет степени термической усадки рукавных полимерных пленок / Малкин А.Я., Петухов А.Д., Сенатос В.А., Гончаренко В.В. // Химическое машиностроение: респ. межвед. научн.-техн. сб. — Вып. 26. — К.: Техніка, 1977. — С. 20–24.
2. Тагер А.А. Физикохимия полимеров / Тагер А.А. — М.: Госхимиздат, 1978. — 528 с.
3. Малкин А.Я. Реология: концепции, методы, приложения / Малкин А.Я., Исаев А.И. — СПб.: Профессия, 2010. — 560 с.
4. Ведь Г.И. Розтягування розплаву полімеру в зоні формоутворення плівки / Ведь Г.И., Мікульонок І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О., Шнирук О.М. // Упаковка. — 2013. — № 5. — С. 37–40.
5. Ведь Г.И. Формоутворення пакувальних матеріалів та тари з термопластів (дослідження процесу розтягування розплаву) / Ведь Г.И., Мікульонок І.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О., Шнирук О.М. // Упаковка. — 2013. — № 4. — С. 50–54. *Y*

Вязкоупругое поведение термоусадочной пленки

Г.И. Ведь, к.т.н., И.О. Микулёнок, д.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., О.Н. Шнырук
В статье авторы предлагают механическую модель поведения термоусадочной пленки во время ее усадки, также исследовано взаимосвязь свойств пленки с параметрами процесса ее изготовления.

Ключевые слова: полимер; термоусадочная пленка; усадка; свойства.

Viscoelastic behavior of thermoshrinkable film

G.I. Ved, Ph.D., I.O. Mikulenok, Dr., A.D. Petukhov, Dr., O.N. Shnyruk
The mechanical model of behavior of a thermoshrinkable film during its shrinkage is offered, and also interrelation of properties of a film with parameters of process of its manufacturing is investigated.

Key words: polymer; thermoshrinkable film; shrinkage; properties.



ЧП «ЛЕКО-ПЛЮС»
Україна, г. Київ,
ул. Чистяковская, 2-а, оф. 517
Тел./факс (044) 583-14-21
Тел. (044) 581-56-33
www.leko-plus.com.ua
E-mail: leko-plus@ukr.net

- Широкий вибор баночек, тубофлаконов и флаконов для косметики
- Разнообразные цветовые решения и формы
- Современная технология печати