

Взаємозв'язок між деякими реологічними характеристиками полімерних матеріалів

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

Одна з важливіших технологічних операцій переробки полімерних композиційних матеріалів у виробі — їх витягування (орієнтація) у цілому або окремих їх елементів у високоеластичному стані — належить до надто складних для розрахунків. Ця операція особливо необхідна для виготовлення таких пакувальних виробів і матеріалів, як роздувній орієнтовані плівки, порожнисті ємності з литтєвих преформ і трубчастих заготовок, під час термоформування з листа корексів, блістерів тощо.

Необхідність математичного моделювання процесів виготовлення перерахованих вище виробів є викликом часу, вимогами третьої технічної революції — суцільний перехід на комп'ютерно-програмне управління процесом і обладнанням під час виготовлення виробів з полімерів.

У статті розглянуто реологічні характеристики розплавів та високоеластичний стан термопластів, які залежать від багатьох чинників і передусім від виду деформації, яку вони спричиняють під час переробки.

Кожний вид переробки можна описати однією чи декількома математичними моделями, які встановлюють кількісний зв'язок між причиною (наприклад, силовий чинник) і наслідком (здебільшого величина деформації). Кількісно цей зв'язок описується через відповідні реологічні константи.

Основними видами деформування термопластів є зсув і розтягнення. Зазвичай зсув має місце під час екструзії (зокрема, під час підготовки розплаву та формування заготовки виробу), а розтягнення — під час формоутворення листів, плівок і труб.

Математичні моделі цих деформацій дуже важливі, оскільки дають змогу здійснювати потрібні інженерні розрахунки під час проектування відповідного обладнання, а також під час розроблення технологій, передбачаючи при цьому поведінку розплавів.

Серед основних рівнянь таких моделей найбільшого поширення набули:

- під час зсуву — закон внутрішнього тертя Ньютона, що пов'язує напруження зсуву τ з градієнтом швидкості $\dot{\gamma}$ через в'язкість μ ($\tau = \mu \dot{\gamma}$);
- під час розтягнення — рівняння Трутона, яке визначає нормальне напруження σ і швидкість відносної деформації розтягнення за Генкі $\dot{\epsilon}$ ($\dot{\epsilon} = v/l$, де v — швидкість розтягнення; l — поточна довжина зразка) через поздовжню в'язкість η ($\sigma = \kappa \dot{\epsilon}$); при цьому пошаровий зсув у термопласті відсутній, а наявним є розтягнення сегментів макромолекул.

Зазначені реологічні залежності прості й зручні в застосуванні на практиці та описують поведінку ньютонівських рідин. З часом технічний прогрес сприяв появі рідин нових типів, переробка яких здійснювалася із все більшою інтенсивністю. Дослідження довели, що величини μ і η не є ста-



лими, а залежать від швидкості деформації і температури. Такі рідини віднесли до класу неньютонівських, до яких належать і розплави термопластів (детальну класифікацію неньютонівських рідин подано в праці [1]).

У праці [2] показано, що для розплавів термопластів сталість величин μ і η характерна для лінійної області деформування (межі цієї області достатньо розмиті, але здебільшого $(\dot{\gamma}, \dot{\epsilon}) \leq 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. У цих межах відношення $\eta/\mu = 3$ для екструдату циліндричної форми та $\eta/\mu = 2$ для плоского екструдату.

За умови подальшої інтенсифікації переробки коефіцієнт η збільшується, а коефіцієнт μ зменшується.

Тому наведені вище рівняння для опису нового класу термопластів стали некоректними, а для врахування в цих залежностях неньютонівських властивостей термопластів замість коефіцієнта μ було введено коефіцієнт ефективної в'язкості μ_{ef} , який визначається як відношення $\tau/\dot{\gamma}$. Проте конкретного зв'язку між η і μ_{ef} встановлено не було.

Такий стан справ аж ніяк не задовольняв фахівців з переробки полімерів і полімерних виробів, оскільки стало надто важко, а іноді і неможливо, здійснювати відповідні інженерні розрахунки.

У зв'язку із зазначеним автори зробили спробу встановити взаємозв'язок між коефіцієнтами ефективної (зсувної) в'язкості μ_{ef} та поздовжньої в'язкості η .

Під час розтягнення термопластів було отримано залежність [3] між нормальними напруженнями σ (напруження віднесено до початкового поперечного перерізу зразка) і швидкістю утворення відносної вільної поверхні $\dot{\xi}$ ($\sigma = \kappa \dot{\xi}$) через коефіцієнт пропорційності κ , який залежить від температури й залишається постійним зі зміною швидкості деформації $\dot{\epsilon}$ у її практичних межах.

У праці [4] одержано залежність для визначення величини $\dot{\xi}$:

$$\dot{\xi} = \frac{v}{l_0 (\sqrt{k} - \sqrt{k_n})}, \quad (1)$$

де l_0 — початкова довжина зразка; k , k_n — міра витягування зразка: кінцева та до моменту стабілізації сили розтягування відповідно.

ВИГОТОВЛЯЄМО ПЕТ ТАРУ

ТОВ «ДЕМЕТРА ОДИС»

65085, м. Одеса,
вул. Просьолочна, 10-А

(048) 715-95-96 (098) 747-95-88
(048) 737-68-80 (050) 683-74-83
(073) 408-39-30

<http://demetra-odis.com/>



Розділивши й помноживши залежність (1) на l , після перетворень отримаємо:

$$\dot{\xi} = \dot{\varepsilon} \frac{\kappa}{\sqrt{k} - \sqrt{k_n}}. \quad (2)$$

Підставимо у (2) вирази $\dot{\xi} = \sigma/\kappa$ та $\dot{\varepsilon} = \sigma/\eta$, після чого матимемо:

$$\eta = K \frac{\kappa}{\sqrt{k} - \sqrt{k_n}}. \quad (3)$$

Тобто поздовжня в'язкість залежить від температури (через величину K) і величини деформації.

Розглянемо процес екструзії розплаву термопласту крізь круглий циліндричний канал діаметром $2R$ і завдовжки L . Сила зсуву становить:

$$F = 2\pi RL\tau. \quad (4)$$

Оскільки $\tau = \mu_{\text{ef}}\dot{\gamma}$, а величина $\dot{\gamma}$ для цього каналу дорівнює $4V_c/R$ [4], де V_c – середня швидкість розплаву, то залежність (4) матиме вигляд:

$$F = 8\pi V_c L \mu_{\text{ef}}. \quad (5)$$

Результатом дії сили F є утворення екструдату з вільною поверхнею S :

$$S = 2\pi R l_c + S_0, \quad (6)$$

де S_0 – початкова поверхня екструдату ($S_0 = \pi R^2$); l_c – довжина екструдату.

Швидкість утворення вільної відносної поверхні, спричинена силою зсуву F , становитиме [5]:

$$\dot{\xi} = \frac{d\left(\frac{S_0 - S_n}{S_0}\right)}{dt}, \quad (7)$$

де t – час дії сили F ; S_n – поверхня зразка в момент часу t . Оскільки величина S_n має характер пружної складової, яка після виходу розплаву з каналу релаксує, то можна прийняти $S_n \approx 0$.

Тоді із врахуванням залежності (6) матимемо:

$$\dot{\xi} = \frac{2V_c}{R}. \quad (8)$$

У той самий час параметр $\dot{\xi}$ може бути відповідним силі розтягнення, яка виражається через залежність $\sigma = \kappa\dot{\xi}$ і становить:

$$P = \sigma\pi R^2 = \kappa\pi V_c R. \quad (9)$$

Величини F і P , які спричиняють однаковий результат своєї дії, будуть тотожні, тобто $F = P$, звідки можна отримати:

$$\mu_{\text{ef}} = \kappa \frac{R}{4L}. \quad (10)$$

Розділивши (3) на (10), матимемо:

$$\frac{\eta}{\mu_{\text{ef}}} = \left(\frac{\kappa}{\sqrt{k} - \sqrt{k_n}} \right) \frac{L}{R}. \quad (11)$$

Потрібно зауважити, що залежність (11) справедлива для однакових значень $\dot{\xi}$.

З вищезазначеного можна зробити такі висновки:

1. Залежності (3) і (10) дають змогу визначити коефіцієнти η і μ_{ef} , які матимуть не локальне, а середнє значення для відповідного процесу деформування, проте це не зменшує їхньої практичної цінності.
2. Відношення коефіцієнтів поздовжньої та ефективної в'язкості не залежить від температури.

У наступних статтях цього циклу передбачаються виклад результатів експериментальних досліджень, їх зіставлення з теоретичними та визначення коефіцієнту пропорційності κ з рівняння $\sigma = \kappa\dot{\xi}$.

Література

1. *Виноградов Г.В., Малкин А.Я.* Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. – 440 с.
2. *Ballman R.L.* Viscosity at a longitudinal flow // *Rheol. Acta.* – 1965. – Vol. 4. – N. 1. – P. 137–142.
3. *Ведь Г.И., Сенатос В.А., Петухов А.Д.* Некоторые особенности растяжения расплавов полимеров // *Хим. технология.* – 1976. – № 3. – С. 42–44.
4. *Ведь Г.И., Микуюнок И.О., Петухов А.Д., Сенатос В.О., Шнырук О.М.* Формоутворення пакувальних матеріалів та тари з термопластів (дослідження процесу розтягування розплаву) // *Упаковка.* – 2013. – № 4. – С. 50–54.
5. *Лукач Ю.Е., Петухов А.Д., Сенатос В.А.* Оборудование для производства полимерных пленок. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с. *Ж*

Взаимосвязь между некоторыми реологическими характеристиками полимерных материалов

Г.И. Ведь, к.т.н., А.Д. Петухов, д.т.н., И.О. Микуюнок, д.т.н., О.Н. Шнырук Сопоставлены реологические характеристики термопластов во время течения их расплавов, а также во время деформирования растяжением. Рассматривается связь между коэффициентами сдвижной и продольной вязкости. *Ключевые слова:* термопласт; деформация; сдвиговая вязкость; продольная вязкость; зависимость.

Interrelation between some rheological properties of polymeric materials

G.I. Ved, Ph.D., A.D. Petukhov, Dr., I.O. Mikulionok, Dr., O.M. Shnyruk Rheological properties of thermoplastics are compared during their melts current and also during deformation by a stretching. Connection between factors of shear viscosity and longitudinal viscosity is considered. *Keywords:* thermoplastic; deformation; shift viscosity; longitudinal viscosity; dependence.