

РОМАНЧЕНКО М. А., магістрант; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЕФЕКТ РОЗБУХАННЯ ПІД ЧАС ЕКСТРУЗІЙНОГО ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПРОФІЛІВ

Досліджено ефект розбухання під час екструзійного формування полімерних профілів, визначено залежності розподілу швидкостей зсуву та лінійних швидкостей за довжиною профілю, проаналізовано залежність коефіцієнта розбухання від коефіцієнта налипання.

Ключові слова: полімер, екструзія, ефект розбухання, в'язкопружність.

© Романченко М. А., Сокольський О. Л., 2013.

Постановка проблеми. У виробництві полімерних виробів екструзією поперечний переріз екструдованого струменя полімеру є збільшеним порівняно з перерізом формувального каналу [1], що впливає на остаточні розміри й форму виробу. У технологічній практиці ефект розбухання оцінюють за співвідношенням діаметрів екструдату й формувального каналу. Під час екструдування складних профілів неоднорідність розбухання різних елементів їх перерізу обумовлена тим, що на різних ділянках формувальних каналів діють різні напруження, які є причиною виникнення різної в'язкопружної деформації. Це може призводити до викривлення профілю аж до повної неможливості отримання виробів заданої конфігурації.

Аналіз попередніх досліджень. Екструзійне розбухання полягає в розширенні струменя розплаву полімеру після виходу з формувального інструменту. Розширення струменя обумовлене проявом пружних властивостей рідини та перебудовою профілю швидкостей під час переходу рідини з течії Пуазейля до течії з вільною поверхнею [2].

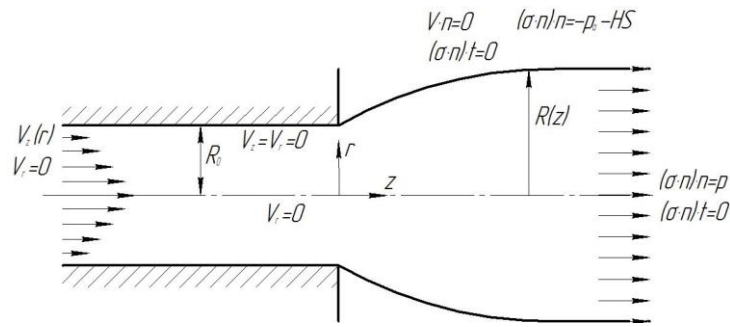
Експериментальні дослідження розширення потоку при екструзії поліцукриду з великою молекулярною масою і ксантану, що виявляє властивості ступеневої рідини, дозволили визначити відстань від виходу з формувального інструменту до ділянки, де відбувається стабілізація екструдованого [3]. Дослідження профілів вільної поверхні для довгих і коротких насадок екструдера засвідчили, що для коротких формувальних каналів спостерігалися розбіжності з експериментальними даними, для довгих – результати моделювання показали добру збіжність [4]. Досліджували також неньютонівські рідини за умов проковзування в області виходу екструдату з формувального отвору [5, 6] із визначенням коефіцієнта проковзування для різних рідин [7], ґрунтуючись на даних експериментів [8]. Прокковзування виникало, коли напруження на стінках досягали певної величини, а наявність проковзування зменшувало ефект розбухання.

У праці [9] досліджено неоднорідність розбухання екструдату після виходу з формувального інструменту. Коефіцієнти розбухання екструдатів при витіканні розплавів із каналів складного поперечного перерізу виявилися більшими, аніж для екструдатів, отриманих в циліндричних каналах. Окрім цього, коефіцієнти розбухання були більшими, коли у поперечному перерізі каналу були наявні виступи. Концентрації напруження після виходу струменя збільшували поперечне розбухання, а нерівномірність напружень за перерізом для некруглого екструдату виявилася більшою, аніж для циліндричного струменя.

Метою статті є визначення залежностей розподілу швидкостей зсуву та лінійних швидкостей за довжиною профілю для врахування ефекту розбухання під час екструзійного формування полімерних профілів.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо такі умови витікання ступеневої рідини з формувального отвору круглого перерізу за умов розширення потоку. Розрахункова область течії в'язкопружної рідини в зоні виходу з формувального отвору обмежена відношенням z його довжини до діаметра від мінус 3 до 3. Від'ємні z означають область формувального отвору перед виходом із нього. Позиція 0 відповідає виходу з формувального отвору (рис. 1).

Проаналізуємо напруження, що виникають в екструдаті в області виходу за таких межових умов: коли $z < 0$, відбувається повне налипання, коли $z > 0$ напруження зсуву дорівнюють нулю; на вході в розрахункову область аксіальна складова швидкості є функцією радіуса $V_z(r)$, а радіальна складова $V_r = 0$; на стінках виконуються умови налипання ($V_z = 0$), симетрії відносно осі ($V_r = 0$), рівності нулю дотичних напружень на виході з формувального отвору; на вільній межі тангенційні напруження відсутні, нормальні напруження збалансовані Лапласівським тиском, межа непроникна.



r – радіальна координата, z – аксіальна координата; V_z , V_r – аксіальні та радіальні швидкості; n – нормаль до поверхні; σ – напруження; t – час; p – тиск; p_a – Лапласівський тиск; H – нормальні напруження

Рис. 1 – Схема течії з межовими умовами

Моделювання течії в'язкопружної рідини на виході з формувального інструмента здійснено з використанням програмного комплексу ANSYS Academic Teaching POLYFLOW [15]. За реологічну вибрано модель Фан-Тьєн-Таннера (ФТТ), що дозволяє обчислювати в'язкопружну компоненту T_1 [15].

Процес накопичення високоеластичної деформації за сталих швидкостей ($\dot{\epsilon} = \text{const}$) є оберненим процесу дезорієнтації за умов термічної усадки [1]:

$$\exp\left[\frac{\epsilon\lambda}{\eta_1}(T_1)\right] T_1 + \lambda \left[\left(1 - \frac{\xi}{2}\right) T_1^\nabla + \frac{\xi}{2} T_1^\Delta \right] = 2\eta_1 D, \quad (1)$$

де λ – тривалість релаксації, визначається як час, необхідний для скорочення напруження зсуву приблизно до третини його початкового значення, коли швидкість деформації дорівнює нулю; ξ і ϵ – матеріальні константи, що контролюють зсуву в'язкість і подовження (ненульове значення ϵ призводить до обмеження стійкості об'ємної в'язкості); D – швидкість зміни тензора деформації; η_1 – в'язкість для в'язкопружної компоненти тензора екстра-напруження; $T_1^\nabla = \frac{DT_1}{Dt} - T_1 \nabla v - \nabla v^T T_1$ і $T_1^\Delta = \frac{DT_1}{Dt} + T_1 \nabla v^T + \nabla v T_1$ – верхня та нижня конвективні похідні за часом в'язкопружного екстра-напруження; v – швидкість потоку полімеру.

Розрахунки виконували для с-подібного полімерного профілю внутрішнім діаметром 60 мм із товщиною стінки 2,3 мм. Розрахункова область – завдовжки 90 мм, довжина формувального каналу екструзійної головки – 30 мм, довжина екструдованого профілю після виходу із головки – 60 мм.

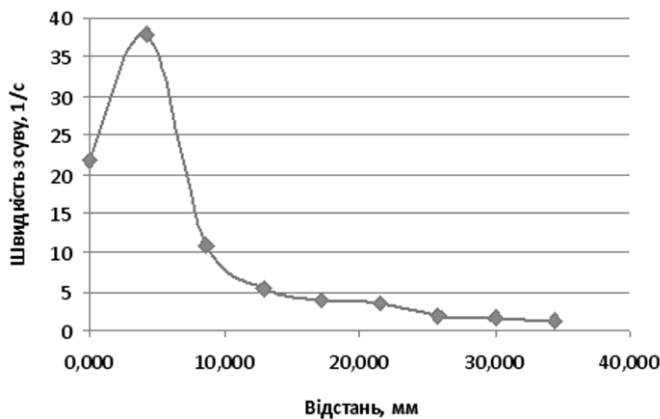


Рис. 2 – Розподіл лінійних швидкостей за довжиною

Врахування пружних властивостей полімеру дозволяє помітити зростання стрибків тиску і напружень в області виходу з формувального інструмента, визначити межі області перебудови профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формувального інструмента.

Для визначення умов тертя полімеру в каналі використано узагальнений закон Нав'є $f_s = -k v_s$, де v_s – тангенціальна складова швидкості течії; k – коефіцієнт тертя.

Було використано згущення розрахункової сітки в області виходу з формувального інструменту екструдера ($z = 0$). Це пов'язано з тим, що найбільші стрибки тиску і напруження відбуваються поблизу вільної поверхні після виходу з формувального отвору [11]. Таке згущення дозволяє точніше дослідити геометрію вільної поверхні екструдату на виході з формувального отвору і зміну розподілу тиску і напружень у профілі.

Спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі з досягненням сталого значення на деякій відстані від головки (рис. 2). Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

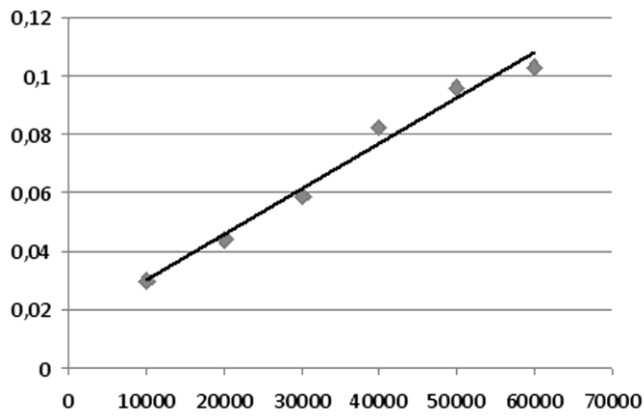


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта розбухання від коефіцієнта тертя

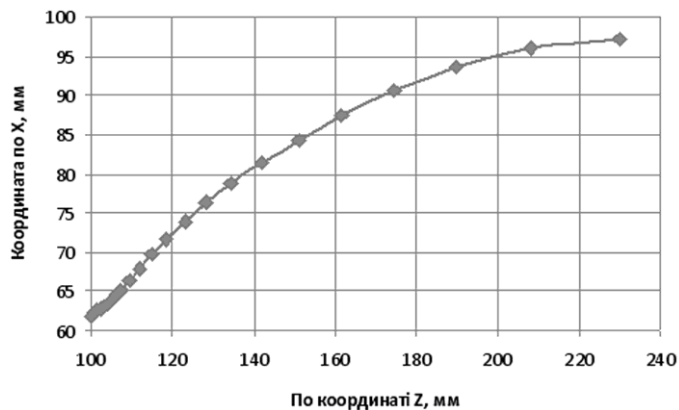


Рис. 4 – Графік деформації екструдату

забезпечення заданого профілю виробу.

Список використаної літератури

1. Сівецький В. І. Пристинні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. С. Сахаров, О. Л. Сокольський, Д. Д. Рябінін. – К. : Прінт-центр, 2009. – 140 с.
2. Tanner R. I. A new inelastic theory of extrudate swell / R. I. Tanner // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1980. – V. 6 – P. 289.
3. Allain C. Die swell in semi-rigid polymer solutions / C. Allain, M. Cloitre, P. Perrot // Eur. J. Mech. Fluids. – 1993. – V. 12. – № 2. – P. 175-186.
4. Beraud C. A finite element method for computing the flow of multi-mode viscoelastic fluids: comparison with experiments / C. Beraud, A. Fortin, T. J. Coupez // Non-newtonian Fluid Mech. – 1998. – V. 75 – P. 1-23.
5. Silliman W. J. Separating flow near a static contact line: slip at the wall and shape of the free surface / W. J. Silliman, L.E. Scriven // J. Comput. Phys. – 1980. – V. 34. – P. 287-313.
6. Liu T. Finite difference solution of a newtonian jet swell problem / T. Liu, T. Cheng // Int. J. For Num. Meth. In Fluids. – 1991. – V. 12. – P. 125-142.
7. Phan-Thien N. Influence of wall slip on extrudate swell: a boundary element investigation / N. Phan-Thien // J. Non-newtonian Fluid Mech. – 1988. – V. 26. – P. 327.
8. Ramamurthy A. V. Wall slip in viscous fluids and influence of materials of constructions / A. V. Ramamurthy // J. Rheology. – 1986. – V. 30. – P. 337.
9. Панов А. А. Разработка конструкций и метода расчета многоручьевых экструзионных головок : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / А. А. Панов. – Уфа, 2002. – 165 с.
10. ANSYS POLYFLOW 12.1 User's Guide // ANSYS, Inc., 2009. – 859 p.
11. Гадельшина Г. А. Моделирование течений неньютоновских жидкостей на выходе из экструдера : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.05 / Г. А. Гадельшина. – Казань, 1999. – 126 с.

Надійшла до редакції 01.02.2013.

У разі врахування проковзування екструдату з $k = 10^5$ спостерігається розширення потоку на 3 %, за умов налипання екструдату розбухання потоку збільшується до 11 %. Із збільшенням коефіцієнта тертя коефіцієнт розбухання полімерного профілю збільшується майже лінійно (рис. 3).

Уздовж осі симетрії перепад тиску в екструдованому профілі на виході з формувального отвору монотонно зменшується до нуля, тоді як на поверхні тиск різко змінюється, набуваючи від'ємних значень на ділянці $z = 0 \dots 1$. Із збільшенням пружних властивостей рідини перепад тиску на поверхні профілю на цій ділянці зростає. Падіння тиску поблизу поверхні відбувається до мінус 5 МПа для в'язкопружної рідини.

Екструдат набуває сталої геометрії на відстані більше 240 мм від виходу з головки, а степінь його розбухання становить 1,6 (рис. 4).

Висновки. Результати досліджень зміни конфігурації струменя на виході з формувального інструменту екструдера є основою для уточненого моделювання екструдуювання розплавів полімерів під час проектування нових екструзійних головок та обґрунтування режимів екструдуювання з метою підвищення якості погонажних виробів.

Перспективним є розв'язання задачі модифікації форми каналів головки для