

УДК 628.027.3

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 екструдуювання 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].

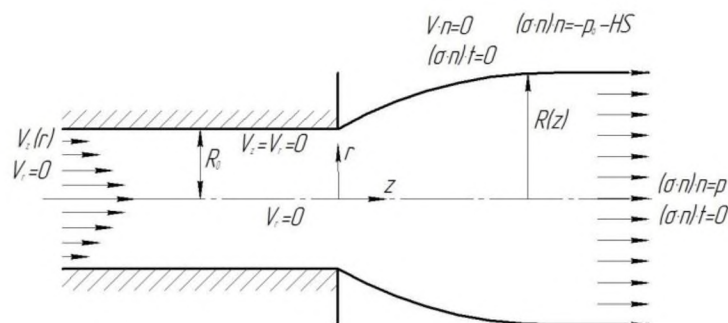
Експериментальні дослідження розширення потоку при екструзії поліцукриду з великою молекулярною масою і ксантану, що виявляє властивості ступеневої рідини, дозволили визначити відстань від виходу з формувального інструменту до ділянки, де відбувається стабілізація екструдованого [3]. Дослідження профілів 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]. Проковзування 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 процесом дезорієнтації за умов термічної усадки [1]:

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

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 зсувну 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.

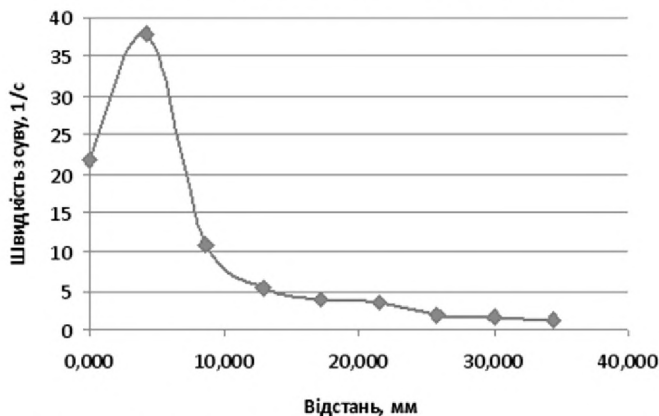


Рис. 2 – Розподіл лінійних швидкостей за довжиною

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.

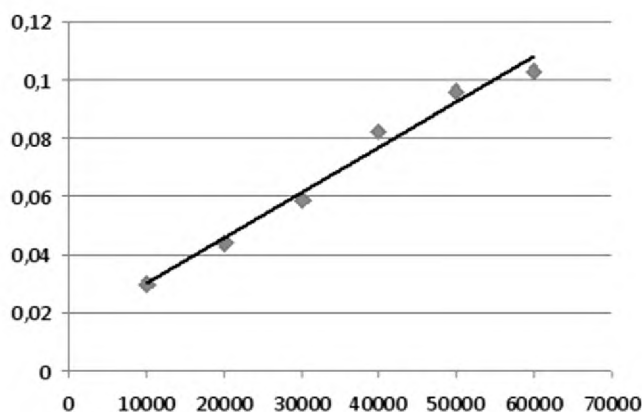


Рис. 3 – Залежність коефіцієнта розбухання від коефіцієнта тертя

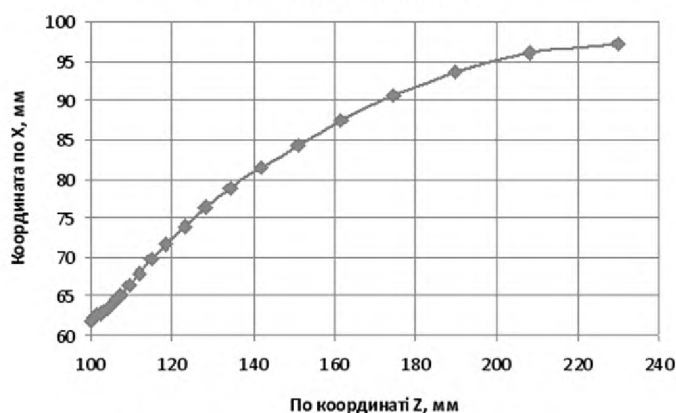


Рис. 4 – Графік деформації екструдату

Список використаної літератури

1. Сівецький В. І. Пристінні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів / В. І. Сівецький, О. С. Сахаров, О. Л. Сокольський, Д. Д. Рябінін. – К. : Принт-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.

Romanchenko M. A., Sokolskyi O. L.

SWELLING EFFECT IN EXTRUSION MOLDING OF POLYMER PROFILE

When designing the forming heads for production of profile-molded products must be considered patterns of manifestation of elastic recovery polymer melt and the degree of slip on the walls of the forming tool.

The study aims to account for the influence of viscoelastic properties of polymer melts at changing the structure of the flow after the forming of the channel, which in turn leads to the need for change as a process of extrusion process parameters and structural dimensions of the forming tool.

When designing extrusion dies the elastic properties of the melt, i.e. the ability of the melt to store an imposed deformation elastically (memory fluid) are generally not considered.

The elastic properties bring about effects, however, that are important for the design of the die.

Neglecting the elasticity of a melt can lead to relatively large errors in the computation of the pressure loss, demonstration this with an example of flow of a high molecular and hence highly elastic PE-HD through a blow molding head.

The effect of viscoelasticity on the results is even more pronounced in the computation of the extrudate swelling.

Extrusion swelling phenomenon is expanding jet of polymer melt exits the forming tool. Expanding the jet may be due to two factors. The first is the manifestation of the elastic properties of the liquid. The second - a restructuring velocity profile in the transition from the regime of fluid flow to Poiseuille flow with a free surface. Tanner showed that the expansion of the jet is the interaction of both mechanisms.

In the production of polymer products by extrusion cross-section extruded polymer jet is increased compared to the channel cross-section profiling, which affects the final size and shape of the product. In technological practice, evaluate the effect of swelling ratio of extrudate diameter to the diameter of the forming channel. In the extrusion of complex profiles heterogeneity swelling of various elements of the intersection due to the fact that in different parts forming channels are different tensions that is the cause of viscoelastic deformation of various sizes. This may lead to a distortion of the profile up to a total inability to obtain the desired product configuration using a forming tool with a specific configuration forming channels.

In this article is shown that viscoelastic properties of polymers in the simulation of the flow at the outlet of the extruder forming tool allows you to calculate the change in cross-section extruded molded products.

Also built graphics of speed, pressure and flow stress viscoelastic fluid at the outlet of the extruder forming tool.

Keywords: polymer, extrusion, swelling effect, viscoelasticity.

References

1. Sivetskiy V. I. Prustinni efektu v procesah pererobku polimernuh materialiv [Near-wall effects during processing of polymer materials] / V. I. Sivetskiy, O. S. Sakharov, O. L. Sokolskiy, D. D. Riabinin. – Kyiv : Printcentr, 2009. – 140 p.
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. Panov A. A. Razrabotka konstrukcy i metoda rascheta mnogoruchevuh extruzionnuh golovok [Development of the construction and the method of calculating the multi-grooved extrusion dies] : dissertation : 05.02.13 / A. A. Panov. – Ufa, 2002. – 165 p.
10. ANSYS POLYFLOW 12.1 User's Guide // ANSYS, Inc., 2009. – 859 p.
11. Gadelshina G. A. Modelirovanie techeniy nenutonovskih gidkosteï na vuhode iz ekstrudera [Simulation of flow of non-Newtonian fluids at the outlet of the extruder] : dissertation : 01.02.05 / G.A. Gadelshina. – Kazan, 1999. – 126 p.