

О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ» Київ;
М. А. РОМАНЧЕНКО, студент, НТУУ «КПІ» Київ;
К. Г. КОВАЛЕНКО, аспірант, НТУУ «КПІ» Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ РОЗБУХАННЯ ПРИ ЕКСТРУЗІЙНОМУ ФОРМУВАННІ ПОЛІМЕРНИХ ПРОФІЛІВ

Проведені дослідження ефекту розбухання при екструзійному формуванні полімерних профілів, визначено залежності розподілу швидкостей зсуву та лінійних швидкостей по довжині профілю, проаналізовано залежність коефіцієнта розбухання від коефіцієнта тертя.

Ключові слова: полімери, екструзія, ефект розбухання, в'язко-пружність.

Вступ. У виробництві полімерних виробів методом екструзії поперечний переріз екструдованого струменя полімеру виявляється збільшеним в порівнянні з перерізом профілюючого каналу [1], що впливає на остаточні розміри і форму виробу. У технологічній практиці ефект розбухання оцінюють відношенням діаметра екструдату до діаметру формуючого каналу. При екструзії складних профілів неоднорідність розбухання різних елементів їх перетину обумовлена тим, що в різних ділянках формуючих каналів діють різні напруження, які є причиною виникнення в'язкопружної деформації різної величини. Це може призводити до спотворення профілю аж до повної неможливості отримання виробів заданої конфігурації при використанні формуючого інструменту з певною конфігурацією формуючих каналів.

Огляд стану досліджень явища екструзійного розбухання. Явище екструзійного розбухання полягає в розширенні струменя розплаву полімеру при виході з формуючого інструменту. Розширення струменя може бути обумовлене двома факторами. Перший полягає в прояві пружних властивостей рідини. Другий – це перебудова профілю швидкостей при переході рідини з режиму течії Пуазейля до течії з вільною поверхнею. Таннер [2] показав, що розширення струменя відбувається при взаємодії обох механізмів.

Експериментальні дослідження розширення потоку при екструзії поліцукриду з великою молекулярною масою і ксантану, який виявляє властивості ступеневої рідини, проводили Аллайн зі співробітниками [3]. Вони визначили відстань від виходу з формуючого інструменту екструдера до ділянки, на якій відбувається стабілізація екструдованого профілю.

Для моделювання течії неньютонівських рідин, що проявляють пружні властивості, Берадо і Фортин [4] використовували багатопараметричну модель Фан-Тьєн-Таннера. Результати досліджень профілів вільної поверхні для довгих і коротких насадок екструдера показали, що для коротких формуючих каналів спостерігалось розбіжності з експериментальними даними, а для довгих формуючих каналів результати моделювання показали досить добру збіжність з експериментами.

У ряді робіт проводилися дослідження неньютонівських рідин з використанням умов проковзування в області виходу екструдату з формуючого отвору [5, 6].

Фан-Тьєн [7] досліджував залежність коефіцієнта проковзування для різних рідин, ґрунтуючись на даних експериментів Рамамурті [8]. Він показав, що

проковзування виникає, коли напруження на стінках досягають певної критичної величини, а наявність проковзування призводить до зменшення ефекту розбухання потоку.

Панов [9] досліджував неоднорідність розбухання екструдату при виході з формуючого інструменту, яке призводить до спотворення форми виробу, що особливо важливо враховувати при виробництві виробів складного профілю. Він зробив висновок про те, що коефіцієнти розбухання екструдатів, отриманих при витіканні розплавів з каналів складного поперечного перерізу, більші, ніж екструдатів, отриманих в циліндричних каналах. Крім того, коефіцієнти розбухання екструдатів більші в тих випадках, коли у поперечного перерізу каналу, в якому вони були отримані, малися виступаючі кути. При напірній течії розплаву полімеру виникають концентрації напруження і при виході струменя розплаву вони збільшують поперечне розбухання екструдату, так що нерівномірність напружень по перерізу в цілому для некруглого екструдату більша, ніж для струменя циліндричної форми.

Постановка завдання. При проектуванні формуючих головок для виробництва профільно-погонажних виробів необхідно враховувати закономірності прояву пружного відновлення розплавів полімерів і ступінь їх проковзування по стінках формуючого інструменту.

Метою дослідження є врахування впливу в'язкопружних властивостей розплавів полімерів на зміну структури їх потоку після виходу з формуючого каналу, що, в свою чергу, призводить до необхідності зміни як технологічних параметрів процесу екструзії, так і конструктивних розмірів формуючого інструменту.

Результати досліджень. З метою дослідження ефекту розбухання в'язкопружних рідин, розглянемо наступні умови витікання ступеневої рідини з формуючого отвору круглого перетину за умов розширення потоку. Розрахункова область течії в'язкопружної рідини в зоні виходу з формуючого отвору обмежена

відношенням z його довжини до діаметру від -3 до 3. Від'ємні значення z означають область формуючого отвору перед виходом з нього. У позиції „0” знаходиться вихід з формуючого отвору насадки екструдера.

Схема течії з граничними умовами представлена на рис. 1.

Для дослідження умов розширення потоку в'язкопружної

рідини на виході з формуючого отвору проаналізуємо напруження, що виникають в екструдаті в області виходу за наступних граничних умовах: при $z < 0$ виконується умова повного прилипання, а при $z > 0$ напруження зсуву дорівнюють нулю; на вході в розрахункову область аксіальна складова швидкості є функцією радіуса: $V_z(r)$, а радіальна складова швидкості $V_r = 0$; на стінках виконується умова прилипання

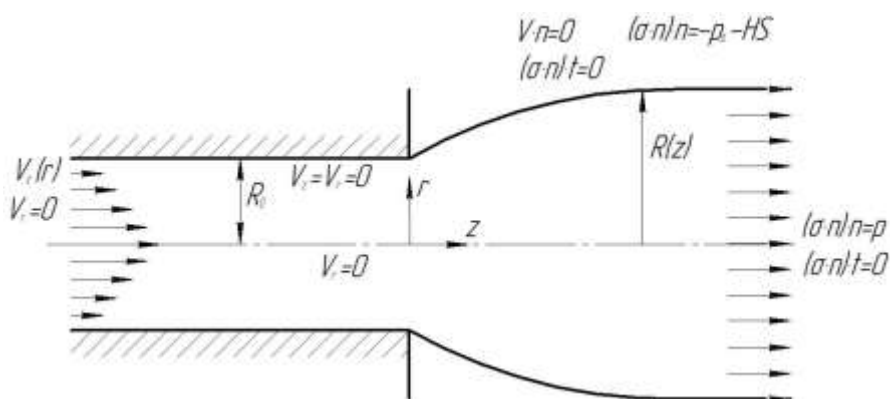


Рис. 1 – Схема течії з граничними умовами: r – радіальна координата, z – аксіальна координата; V_z , V_r – аксіальні та радіальні швидкості відповідно; n – нормаль до поверхні; σ – напруження; t – час; p – тиск; p_a – Лапласівський тиск; $H\bar{S}$ – нормальні напруження

($V_z = 0, V_r = 0$); умова симетрії відносно осі ($V_r = 0$); рівність нулю дотичних напружень на виході з формуючого отвору ($(\sigma \cdot n) \cdot t = 0, (\sigma \cdot n) \cdot n = -p$); вільна границя характеризується відсутністю тангенціальних напружень, нормальні напруження збалансовані Лапласівським тиском, границя непроникна ($(\sigma \cdot n) \cdot t = 0, V \cdot n = 0, (\sigma \cdot n) \cdot n = -p_a - H\bar{S}$).

В даній роботі моделювання течії вязкопружної рідини при виході з формуючого інструменту екструдера здійснено з використанням програмного комплексу ANSYS Academic Teaching POLYFLOW. В якості реологічної моделі вибрана модель Фан-Тьєн-Таннера. Вона є однією із найбільш реалістичних диференціальних вязкопружних моделей [10].

Розрахунки виконувалися для квадратного пустотілого полімерного профілю шириною 30·30 мм, з товщиною стінки 1,7 мм. Розрахункова область обрана довжиною 100 мм, де довжина формуючого каналу екструзійної головки 40 мм, а 60 мм – довжина вільного кінця, тобто екструдованого профілю після виходу із головки.

По координаті z було використано згущення сітки в області виходу з формуючого інструменту екструдера, тобто поблизу координати $z = 0$. Це пов'язано з тим, що, як показано в роботі [11], найбільші стрибки тиску і напружень відбуваються поблизу вільної поверхні після виходу з формуючого отвору. Таке згущення розрахункової сітки дозволяє точніше дослідити геометрію вільної поверхні екструдату на виході з формуючого отвору і зміну розподілу тиску і напружень в екструдованому профілі.

Розглянемо графіки розподілу швидкостей зсуву та лінійних швидкостей руху екструдату по довжині досліджуваної області. Вони представлені на рис. 2 та 3.

На рис. 2 представлений розподіл швидкості зсуву по довжині моделі, максимальне значення досягається через деяку відстань після виходу з екструзійної головки, тобто з певним запізненням, що пов'язано з явищем релаксації. Коефіцієнт тертя в даному випадку прийнято $k=10000$.

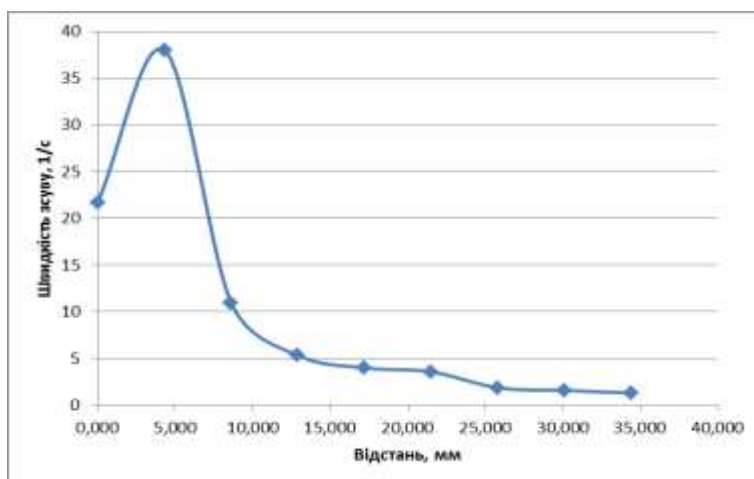


Рис. 2 – Розподіл швидкостей зсуву по довжині

На наведеному графіку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Таким чином, врахування пружних властивостей полімеру показує зростання стрибків тиску і напружень в області виходу з формуючого інструменту екструдера, а також дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

Досліджено залежності швидкості екструзії від коефіцієнту тертя полімеру по стінці формуючого каналу. Для визначення умов тертя полімеру в каналі використано узагальнений закон Нав'є в такому вигляді:

$$f_s = -k \cdot v_s,$$

де v_s – тангенціальна складова швидкості течії; k – коефіцієнт тертя.

При врахуванні умови проковзування екструдату з $k = 10^5$ на стінці формуючого каналу спостерігається розширення потоку на 3%, за умов прилипання екструдату розбухання потоку збільшується до 11%.

Результати проведених чисельних експериментів показані на рис. 4.

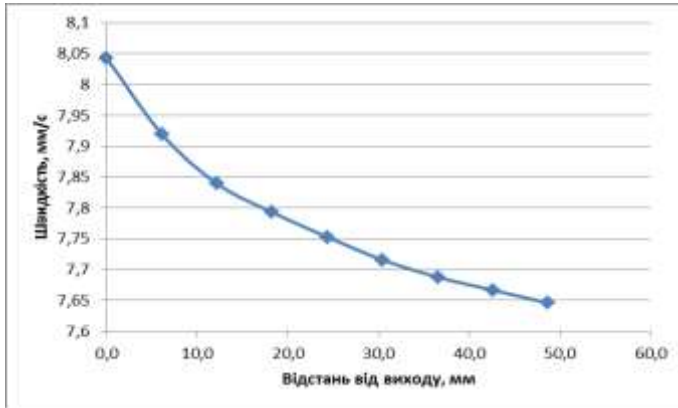


Рис. 3 – Розподіл лінійних швидкостей по довжині

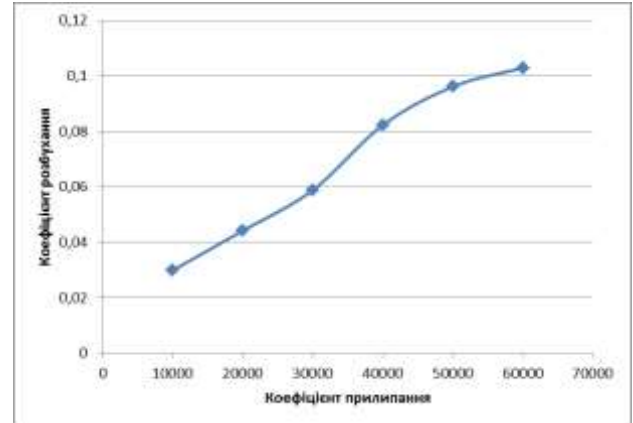


Рис. 4 – Залежність коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя

З графіку на рис. 4 видно, що при збільшенні коефіцієнта тертя коефіцієнт розбухання полімерного профілю збільшується практично лінійно з лінійною залежністю.

Уздовж осі симетрії екструдованого профілю перепад тиску в ньому на виході з формуючого отвору монотонно зменшується до нуля, тоді як на поверхні екструдованого профілю на виході тиск різко змінюється і приймає негативні значення на ділянці з $z = 0 \dots 1$. Причому зі збільшенням пружних властивостей рідини, перепад тиску на поверхні екструдованого профілю на цій ділянці збільшується. Падіння тиску поблизу поверхні відбувається до -5 МПа для в'язкопружної рідини.

Висновки. Показано, що врахування в'язкопружних властивостей полімерів при моделюванні їх течії на виході з формуючого інструмента екструдера дозволяє розрахувати зміну перерізу екструдованого погонажного виробу.

Отримані поля швидкостей, тиску і напружень для течії в'язкопружної рідини на виході з формуючого інструмента екструдера при різних значеннях коефіцієнту тертя екструдованих рідин.

Одержано залежність розбухання екструдованого профілю від умов прилипання матеріалу на стінках формуючого каналу екструдера. Зі збільшенням коефіцієнту тертя, ступінь розбухання збільшується.

Результати проведених чисельних досліджень процесу зміни конфігурації струменя на виході з формуючого інструменту екструдера є основою для уточненого моделювання процесів екструзії розплавів полімерів при проектуванні нових екструзійних головок. Результати також можуть бути застосовані для обґрунтування доцільних режимів процесу екструзії з метою поліпшення якісних характеристик погонажних виробів.

Список літератури: 1. Сівецький, В.І. Пристінні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів [Текст] / В.І. Сівецький, О.С. Сахаров, О.Л. Сокольський, Д.Д. Рябінін // К.: НТУУ „КПІ”, ПП Видавничий центр „Прінт-центр”, 2009. — 140 с. 2. Tanner, R.I. A new inelastic theory of

extrudate swell. [Текст] / *R.I.Tanner*, // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 1980- v.6-p.289. **3. Allain, C.**, Die swell in semi-rigid polymer solutions. [Текст] / *C. Allain, M. Cloitre, P. Perrot* // *Eur. J. Mech, B/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. [Текст] / *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. [Текст] / *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. №74 [Текст] / *T. Liu, Cheng T.* // *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. [Текст] / *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. [Текст] / *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 [Текст] / *А. А. Панов* // Уфа, 2002. – 165с. **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 [Текст] / *Г. А. Гадельшина* // Казань, 1999. – 126с.

Надійшла до редколегії 20.04.2013

УДК 628.027.3

Дослідження ефекту розбухання при екструзійному формуванні полімерних профілів / О. Л. Сокольський, М. А. Романченко, К. Г. Коваленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 26 (999). – С. 84-88. – Бібліогр.: 11 назв.

Проведены исследования эффекта разбухания при экструзионном формировании полимерных профилей; определены зависимости распределения скоростей сдвига и линейных скоростей по длине профиля; проанализирована зависимость коэффициента разбухания от коэффициента трения.

Ключевые слова: полимеры, экструзия, эффект разбухания, вязкоупругость.

Research of the swelling effect in extrusion molding polymer profiles was done; the relationship between the shear rate and linear velocity along the length profile was defined; the dependence of swelling coefficient on friction coefficient was analyzed.

Keywords: polymers, extrusion, swelling effect, viscoelasticity.

УДК 678.057

В. І. СІВЕЦЬКИЙ, канд. техн. наук, проф. каф., НТУУ «КПІ», Київ;

О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ;

М. С. КУШНІР, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ;

О.В. РОСЛОВ, студент, НТУУ «КПІ», Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ГОМОГЕНІЗАЦІЇ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ В ДИНАМІЧНОМУ ЗМІШУВАЧІ ЕКСТРУДЕРА

Проведено чисельне моделювання динамічного змішувача бар'єрного типу при нестационарних умовах з врахуванням ефекту дисипації. Показано результати моделювання, що дозволяють досліджувати динаміку зміни температур та гідравлічного опору при течії полімерних матеріалів в змішувальних елементах та здійснювати вибір оптимальних конструктивних параметрів змішувальних елементів або обирати технологічні режими процесів змішування полімерних композицій.

Ключові слова: динамічний змішувач, моделювання, гомогенізація, змішування.

Вступ. Якість продукції з термопластичних полімерних матеріалів часто залежить від якості змішування базових полімерів з різноманітними інгредієнтами: наповнювачами, стабілізаторами, барвниками та іншими модифікаторами. Особливо в разі використання вторинної полімерної сировини необхідно забезпечити

© В. І. СІВЕЦЬКИЙ, О. Л. СОКОЛЬСЬКИЙ, М. С. КУШНІР, О.В. РОСЛОВ, 2013