The mixing of polymers is one of the most effective ways to create materials with a given set of properties. The results of studying the interaction of molten thermoplastics with different concentrations in the mixing were offered.
Keywords: *coaxial gap, mixing, polymer.*

Надійшла до редакції 05.05.2012

УДК 678.057

САХАРОВ О. С., д.т.н., проф.; СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.; КУШНІР М. С., магістрант; ІВІЦЬКИЙ І. І., магістрант; ОЛЕКСІШЕН В. О., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРУ В КАНАЛІ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА

Розроблено уточнені моделі плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера, що базуються на поділі процесу на два етапи: руйнування завдяки бародифузії поверхневого шару твердої пробки, що переходить у шар текучої суміші з твердої і рідкої фаз, і плавлення твердої частини в об'ємі суміші під дією дисипативної теплоти.
Ключові слова: *моделювання, плавлення, черв'ячний екструдер.*

Постановка проблеми

Механізм процесу плавлення термопластичних полімерів є багатофакторним і складним та затратним для експериментальних досліджень. Тому існуючі фізичні та математичні моделі не повністю відображають процеси і явища, що відбуваються при плавленні полімерів, не враховують ряд важливих факторів і потребують подальшого уточнення.

Метою статті є уточнення існуючих моделей плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У розрахунках плавлення гранульованого полімеру в каналі черв'ячного екструдера використовують ряд фізичних і математичних моделей, що відрізняються трактуванням процесу, врахуванням різних чинників і точністю розрахунків [1, 2].

Класичним є підхід, згідно з яким плавлення матеріалу починається на поверхні контакту пробки гранул із гарячою стінкою циліндра. Умовою руху матеріалу в зоні плавлення є більше тертя між пробкою й циліндром, аніж тертя між пробкою і черв'яком. Унаслідок тертя й передачі теплової енергії від поверхні стінки циліндра утворюється тонка плівка розплаву. Поступово плівка стовщується і, коли вона стає більшою, аніж радіальний зазор між циліндром і гребенем черв'яка, останній починає зіскрібати шар розплаву, який збирається біля його штовхаючої поверхні. Із просуванням пробки гранул уздовж каналу її ширина зменшується; плавлення закінчується, коли пробка зникає.

Таку модель побудовано на припущенні, що рух матеріалу в зоні плавлення є стаціонарним, поля швидкостей і температур у кожному перерізі каналу є сталими, а полімер має чітко виражену температуру плавлення. Подальші спрощення полягали в тому, що пробку вважали гомогенною, однорідною й неперервною, а поперечний переріз області розплаву й пробки – прямокутним.

Теплота до твердої пробки передається від внутрішньої поверхні циліндра крізь тонку плівку розплаву, що рухається над пробкою. Додаткова теплота генерується в плівці внаслідок роботи в'язкого тертя. Теплопередачею в напрямку осі циліндра та від штовхаючої стінки черв'яка до шару розплаву нехтують, оскільки на більшій частині зони плавлення ширина твердої пробки набагато перевищує її висоту.

Товщину шару гранул в пробці вважають значною, і, оскільки коефіцієнт теплопровідності гранул є малим, температура гранул, що контактують з плівкою, швидко знижується від температури плавлення до температури шарів пробки, досить віддалених від зони контакту. Швидкість плавлення в тонкому шарі на поверхні розділу розплав – пробка в будь-якому поперечному перерізі визначається потужністю теплового потоку, що підводиться до поверхні плавлення.

© Сахаров О. С., Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Івіцький І. І., Олексішен В. О., 2012

У відомих моделях не враховують також пористість пробки, що впливає на термомеханічні властивості полімеру, тепломасоперенесення в ній, особливо внаслідок поступового заповнення пор розплавом, змінення його температури й температури твердих частинок полімеру, що контактують із розплавом, взаємні фазові перетворення тощо.

З огляду на наведене, основними задачами дослідження плавлення гранульованого полімеру в каналі черв'ячного екструдера є визначення:

розподілу швидкостей і температури матеріалу в каналі черв'яка з врахуванням впливу бародифузії, конвекції та руйнування пробки;

поведінки суміші розплаву з твердими залишками гранул із врахуванням фазових перетворень;

умов взаємодії розплаву з металевими поверхнями обладнання (пригранічних ефектів, що вливають на рух розплаву та його деформації);

впливу теплоємкості полімерів, інтенсивності дисипативного теплоутворення, теплообміну між розплавом і твердими частинками полімеру під час його поступового проникнення в пори, а також між полімером, що перебуває в різному фазовому стані, і стінками, що обмежують канал і які охолоджують чи нагрівають.

Уточнена фізична модель плавлення

Автори вважають, що в зоні живлення з гранул полімеру формується тверда пориста пробка, яка під час стиснення й розігріву внаслідок тертя поверхнею розігрітого циліндра й теплообміну з ним покривається плівкою розплаву, що герметизує масив пробки. Потрапляючи в область великого тиску (на початку зони плавлення), гранули сприймають майже все навантаження, оскільки повітря (чи газ) у порах є легко стискним і сприймає набагато менший тиск, аніж поверхня пробки.

Область, де проміжки між гранулами починають заповнюватися розплавом, є перехідною областю між зонами живлення і плавлення.

У зоні плавлення рух пробки вздовж каналу завдяки дисипації й теплопровідності зумовлює зростання температури плівки розплаву над пробкою та пригранічним із плівкою шаром гранул, які розм'якшуються, а плівка втрачає міцність. Внаслідок великого перепаду тиску в розплаві й порах розплав прориває плівку, наявну на поверхні гранул, і заповнює пори між ними, змішуючись із поровим газом, тобто відбувається бародифузія (поступове проникнення розплаву в пористий масив гранул). Сили, що притискали гранули до масиву пробки зменшуються, а останні під дією дотичних напружень відриваються від пробки і потрапляють в рідкий шар розплаву з твердими частинками полімеру. Частина розплаву, що потрапила в пори, віддає теплоту гранулам пробки, частково твердне, а потім знову утворює плівку розплаву, що тимчасово перешкоджає фільтрації розплаву вглиб пробки. Після надходження нової порції теплоти до плівки процес повторюється.

Принциповою відмінністю наведеної фізичної моделі є те, що майже все плавлення відбувається в межах суміші твердої й рідкої фаз, де розплав є диспергуючим, а тверді залишки гранул і газ – диспергованими середовищами. Теплова ж енергія, що підводиться до поверхні поділу суміші і пробки, витрачається на бародифузійне руйнування пробки.

Такий підхід дозволяє пояснити більшу, порівняно з розрахунковою за класичними моделями, швидкість плавлення за реальних умов експлуатації черв'ячних машин. Дійсно, інтенсивне теплоутворення завдяки дисипації й передача теплоти твердій фазі відбувається в одному об'ємі шару суміші, причому загальна площа поверхні теплообміну частинок твердої фази в суміші з проникненням розплаву в поровий простір є набагато більшою, аніж плоска площа поверхні теплообміну між твердою пробкою й розплавом крізь полімерну плівку.

Пропонована фізична модель базується на таких припущеннях:

термопласт є матеріалом аморфним, і перехід від твердого стану до розплаву відбувається поступово (хоча й нерівномірно) і з неперервною зміною фізико-механічних і теплофізичних властивостей;

між твердою пористою пробкою і плівкою розплаву наявна поверхня поділу, що перешкоджає рухові розплаву до пор;

у зоні плавлення взаємодіють три фази: тверде пористе тіло (пробка); суміш розплаву, твердих залишків гранул і газу; повністю розплавлений матеріал.

Модель можна спростити, якщо вважати розплав високов'язкою рідиною, а відносною швидкістю руху вкраплень твердої й газоподібної фаз у плівці розплаву над пробкою можна знехтувати.

Для опису властивостей суміші використовують зведені теплофізичні й фізико-механічні характеристики як функції концентрації твердої фази в суміші $n_{тв}$ чи температури T_c. Наприклад, для в'язкості суміші частинок твердої фази полімеру в його розплаві:

$$\mu_c = \frac{\mu_т \mu_р}{\mu_р n_т + \mu_т (1 - n_т)},$$

де $\mu_т$ і $\mu_р$ – в'язкість твердої й рідкої фаз полімеру; $n_т$ – об'ємна частка твердої фази в пористій пробці.

Уточнена математична модель плавлення

Математичну модель, частинним випадком якої є плавлення, та її дискретизацію методом скінченних елементів (МСЕ) наведено в праці [3].

Під час плавлення великого значення набуває теплообмін. Тому до рівнянь руху рідини слід долучити рівняння збереження енергії [4]: $c_V v^j \nabla_i T - \nabla_i \left(\lambda_T \nabla_j T\right) g^{ij} = \sigma^{ij} \xi_{ij} + Q_{(V)}$, де C_V – питома об'ємна теплоємність; λ_T – коефіцієнт теплопровідності; $\sigma^{ij} \xi_{ij}$ – потужність дисипативної роботи внутрішніх сил; $Q_{(V)}$ – питома об'ємна потужність внутрішнього теплового джерела немеханічного походження.

На зовнішній поверхні тіла мають бути задані межові умови першого ($T = T_0$) чи третього роду: $\vec{q} \cdot \vec{n} = \alpha(T - T_s) - Q_{(F)}$, $\lambda_T \partial T / \partial n = -\alpha(T - T_s) + Q_{(F)}$, де $\partial T / \partial n$ – похідна температури вздовж зовнішньої нормалі до поверхні; α – коефіцієнт тепловіддачі; T_s – температура зовнішнього середовища; $Q_{(F)}$ – тепловий потік уздовж зовнішньої нормалі, обумовлений неконвективним теплообміном.

Дискретизацію теплообміну здійснюють, спільно розв'язуючи рівняння руху й збереження енергії:

$$\int_V \lambda_T \vec{\nabla} T \cdot \vec{\nabla}(\delta T) dV + \int_V c_T \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \delta T dV - \int_V D_T \delta T dV + \int_S \alpha_T (T - T_s) \delta T dV = 0, \qquad (1)$$

де $D_T = \hat{\sigma} \cdot\cdot \hat{\varsigma} + Q_{(v)}$ – швидкість надходження теплоти в одиницю об'єму тіла завдяки дисипації енергії руху та зовнішньому джерелу теплоти; α_T – коефіцієнт тепловіддачі (що може залежати від температури) на зовнішній поверхні тіла S.

Рівняння МСЕ для теплопередачі будуються на основі матриць скінченних елементів (СЕ), що характеризують перенесення теплоти температурною дифузією й рухом середовища. Розподіл температури в межах СЕ для шестигранного криволінійного елемента на базі полілінійних функцій форми:

$$T = T^{(1)} N_{(1)} + T^{(2)} N_{(2)} + T^{(3)} N_{(3)} + T^{(4)} N_{(4)} + T^{(5)} N_{(5)} + T^{(6)} N_{(6)} + T^{(7)} N_{(7)} + T^{(8)} N_{(8)},$$

чи в матричному вигляді:

$$\{T\} = [L]\{T^{(i)}\}, \qquad [L] = [N_{(1)} \quad N_{(2)} \quad N_{(3)} \quad N_{(4)} \quad N_{(5)} \quad N_{(6)} \quad N_{(7)} \quad N_{(8)}].$$

Вектор-градієнт температури:

$$\{\nabla T\} = [\nabla][L]\{T^{(i)}\} = [G]\{T^{(i)}\}, \quad [\nabla] = \left[\frac{\partial}{\partial \xi^{1'}} \quad \frac{\partial}{\partial \xi^{2'}} \quad \frac{\partial}{\partial \xi^{3'}}\right]^T, \quad [G] = [\nabla][L].$$

Матриця теплопередачі СЕ $[K_T] = [\Pi_T] + [\Xi_T]$, де матриці теплопровідності й конвекції визначають із першого й другого членів рівняння (1) і наводять у матричному вигляді:

$$[\Pi_T] = \int_{V_{CE}} [G]^T [g^*][G] \lambda_T dV = \int_{-0.5}^{0.5} [G]^T [g^*][G] \lambda_T \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3,$$

$$[\Xi_T] = \int_{V_{CE}} [L]^T [J^*]^T \{v\}^T [G] c_T dV = \int_{-0.5}^{0.5} [L]^T [J^*]^T \{V\}^T [N]^T [G] c_T \sqrt{g} d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3,$$

де $[g^*]$ – матриця контраваріантних компонент метричного тензора; $[J^*] = [J^{-1}]$ – обернена матриця Якобі; $\{V\}$ – вектор вузлових швидкостей СЕ. Внаслідок малих розмірів СЕ, теплотехнічні (λ_T, C_V) і геометричні параметри ($[J^*]$, $[g^*]$, $\sqrt{g}$) вважають сталими, обчислюючи матриці теплопередачі в замкнутому вигляді [5].

Розроблена модель дозволяє суттєво зменшити обсяги обчислень під час проектування екструзійного обладнання.

Висновки

Пропонована модель плавлення гранульованого полімеру в каналі екструдера дозволяє пояснити вищу, порівняно з традиційним розрахунком, швидкість плавлення полімеру за реальних умов і відрізняється від традиційних тим, що розглядає плавлення як процес, що відбувається не на поверхні, а в об'ємі пробки гранул. При цьому теплота дисипації витрачається не на нагрівання полімеру, а руйнування пробки, полімер перебуває у квазідвофазному стані, а його властивості задають зведеними параметрами залежно від концентрації фаз.

Список використаної літератури

1. *Тадмор, З.* Теоретические основы переработки полимеров [Текст] / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. – М. : Химия, 1984. – 632 с.
2. *Торнер, Р. В.* Основные процессы переработки полиеров (теория и методы расчета) [Текст] / Р. В. Торнер; пер. с англ. – М. : Химия, 1972. – 461 с.
3. *Ким, В. С.* Теория и практика экструзии полимеров [Текст] / В. С. Ким. – М. : Колос С, 2005. – 567 с.
4. *Сахаров, О. С.* Моделювання процесів плавлення та гомогенізації полімерних композицій в черв'ячному устаткуванні [Текст] / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський. – К. : НТУУ «КПІ», 2012.
5. *Сахаров, О. С.* Розробка скінченно-елементної математичної моделі руху неньютонівських слабостисливих та нестисливих рідин [Текст] / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, В. Ю. Щербина // Наук. вісті НТУУ «КПІ». – 2004. – № 2. – С. 56-65.

The specified physical and mathematical models of polymers melting in a screw channel of extrusion equipment were created. They allow setting more exact parameters of process of melting comparatively with calculations by means of classic models.

Keywords: *design, melting, extruder.*

Надійшла до редакції 03.05.2012

УДК 678.057

САХАРОВ О. С., д.т.н., проф.; СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.; КУШНІР М. С., магістрант; ІВІЦЬКИЙ І. І., магістрант; ОЛЕКСІШЕН В. О., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРУ В КАНАЛІ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЕКСТРУДЕРА

Шляхом числового моделювання одержано розподіли температури та в'язкості матеріалу в зоні плавлення гранульованого полімеру. Досліджено еволюцію руйнування й плавлення пробки гранул і визначено основні фактори впливу на ці процеси.

Ключові слова: *плавлення полімеру, черв'ячний екструдер.*

Постановка проблеми

Аналітичні моделі неізотермічного руху полімерів у робочих каналах полімерного обладнання є достатньо точними [1–2], але не врахують тривимірність і локальні зміни фізико-механічних властивостей полімерів, що можуть суттєво впливати на реальну картину плавлення.

Під час руху гранульованого полімеру в каналі черв'ячного екструдера відбувається інтенсивне розігрівання полімеру, обумовлене внутрішнім тертям і теплообміном зі стінкою. Біля стінки розігрів є найбільшим і залежить від фазового стану й температури полімеру, його фізико-механічних властивостей і режиму руху [3]. При цьому максимальні температури спостерігають на деякій відстані від стінки, тому, вимірюючи температуру розплаву поверхневими термопарами за великих швидкостей зсуву, можна отримати велику помилку. Більш коректні розподіли температури можна одержати лише числовим моделюванням.

© Сахаров О. С., Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Кушнір М. С., Івіцький І. І., Олексішен В. О., 2012