

УДК 678.025+678.055

Л.Г. Воронін, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок, Л.І. Ружинська

## ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ НА ЧАСТКОВО ЗАНУРЕНОМУ У ВОДЯНУ ВАННУ БАРАБАНИ

In this paper, we develop the design procedure of the polymeric film cooling on the cooled drum partially submerged in a water bath. The process specificity of the process lies in the fact that after the films removal from a drum its surface hasn't time to cool down to its initial temperature. We propose the mathematical model of cooling which allows calculating the film temperature field and the drum shell ring on their thickness depending on the angular coordinates cylindrical. We also study the dependence of average temperature of the polypropylene film when the drum escapes the stationary temperature mode. We show that with the increase in thickness of the cooled film and (or) its speeds it is necessary to consider warming up of the drum shell ring during its previous turns. As the approbation of the developed technique in industrial conditions shows, it is possible to recommend it for the analysis of films manufacturing with high requirements to their operational properties, obtained by the method of polymer melt flowing for a drum.

### Вступ

Полімерні плівки завдяки високим експлуатаційним властивостям отримують все більш широке застосування як у різних галузях промисловості, так і в побуті. Вони успішно замінюють такі традиційні конструкційні, оздоблювальні та пакувальні матеріали, як метали, деревину, папір, скло, тканини. Існує багато методів виготовлення полімерних плівок. Однією зі стадій їх технології є охолодження відформованої плівки від температури розплаву полімеру до температури на холодному кінці технологічної лінії [1].

Одним із найбільш ефективних методів виготовлення плоских полімерних плівок є екструзійний метод з охолодженням плівки на охолоджувальному барабані, частково зануреному у водяну ванну. Плівки, виготовлені в такий спосіб, вирізняються найбільшою прозорістю й високими фізико-механічними властивостями [1].

Нині використовуються два види моделей процесу охолодження плівкового, рулонного або листового матеріалу на охолоджувальному барабані [2–4].

1. За умови гарантованого забезпечення температури на поверхні барабана задаються такі граничні умови: на поверхні плівки, яка стикається з барабаном, – умови першого роду, а на вільній поверхні виробу – умови третього роду. Зазначена модель передбачає наявність надійної системи термостабілізації температури на поверхні барабана. Це можливо лише за умови значної витрати теплоносія в каналах барабана, що часто є економічно недоцільним.

2. Для вибору найбільш ефективного теплоносія та його параметрів, які б забезпечили потрібну температуру на поверхні барабана, необхідно розв'язати задачу охолодження матеріалу з урахуванням параметрів теплоносія. В цьому разі задають такі граничні умови: на внутрішній поверхні обичайки барабана і на вільній поверхні плівки – умови третього роду, а на поверхні плівки, яка стикається з барабаном, – умови четвертого роду.

Обидві моделі, які розглядають задачу охолодження як стаціонарну, прийнятні лише за умови охолодження тонкостінних плівок, що рухаються з невеликою швидкістю. За умови ж охолодження товстостінних плівок і значної продуктивності технологічної лінії, коли барабан під час контакту з охолоджуваною плівкою помітно прогрівається, зазначені методики стають неприйнятними.

### Постановка задачі

Метою досліджень цієї статті є розроблення методики розрахунку процесу охолодження полімерної плівки на барабані, частково зануреному у водяну ванну, коли після знімання плівки з барабана його поверхня не встигає охолонути до початкової температури, тобто коли має місце нестационарна задача теплообміну.

### Фізична й математична моделі процесу

Розплав полімеру з екструзійної плоскощільної головки надходить на приймальний ролик і далі на охолоджувальний барабан, оби-

чайка якого з внутрішнього боку охолоджується водою. Барабан частково занурений у ванну з охолоджувальною водою. Після виходу з водяної ванни плівка контактує з оточуючим повітрям, а після проходження знімального ролика вона сходить з барабана (рис. 1).

Зону охолодження можна поділити на чотири ділянки. В кожній із них теплообмін між вільними поверхнями плівки й барабана відбувається за граничних умов третього роду й залежить від властивостей охолоджувального середовища (вид, температура, режим руху). Контакт же плівки з барабаном відбувається за граничних умов четвертого роду.

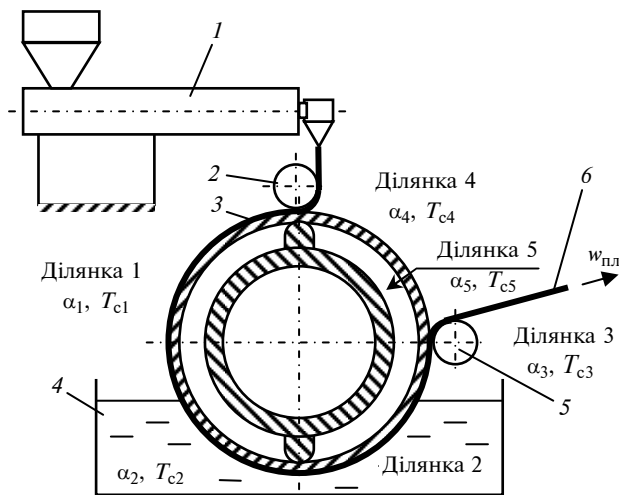


Рис. 1. Схема виготовлення плоскої полімерної плівки екструзією з охолодженням на барабані, частково зануреному у водяну ванну: 1 – екструдер; 2 – приймальний ролик; 3 – охолоджувальний барабан; 4 – ванна охолодження; 5 – знімальний ролик; 6 – полімерна плівка;  $\alpha_i$ ,  $T_{ci}$  – коефіцієнт тепловіддачі й температура середовища на  $i$ -й ділянці;  $w_{пл}$  – швидкість плівки

На першій ділянці охолодження плівки з боку її вільної поверхні відбувається за рахунок контакту плівки з навколишнім повітрям в умовах вільної конвекції за температури  $T_{c1}$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_1$ . На другій ділянці плівка взаємодіє з водою в охолоджувальній ванні в умовах вимушеної конвекції за температури води  $T_{c2}$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$ . Після виходу з води плівка охолоджується на повітрі за температури  $T_{c3}$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_3$  в умовах як вільної, так і вимушеної (для видалення з плівки залишків води) конвекції. На початку четвертої ділянки плівка знімається з барабана, а сам барабан із зовнішньої

поверхні починає охолоджуватися на повітрі за температури  $T_{c4}$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_4$  в умовах вимушеної конвекції (для видалення води з робочої поверхні барабана).

Також виділимо п'яту ділянку, де внутрішня поверхня обичайки барабана охолоджується водою за температури  $T_{c5}$  і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_5$  в умовах вимушеного руху води в спіральних каналах барабана.

При цьому, як свідчить промислова експлуатація таких технологічних ліній, температура зовнішньої поверхні барабана у вихідній точці (у точці потрапляння на барабан плівки з екструзійної головки) не завжди залишається постійною, а, поступово збільшуючись, стабілізується лише через певний час.

Для розрахунку процесу охолодження плівки потрібно розробити математичну модель процесу з урахуванням теплообміну на кожній з ділянок. При цьому зроблено такі припущення: рух шарів плівки один відносно одного відсутній; розміри плівки на барабані залишаються сталими; проковзування плівки по поверхні барабана відсутнє; теплофізичні властивості матеріалів плівки й барабана залежать від температури; перенесенням теплоти вздовж осі барабана нехтуємо.

Математичну модель процесу охолодження плівкового матеріалу на барабані доцільно розглядати в циліндричній системі координат. У цьому разі рівняння нестационарної теплопровідності для плівки та обичайки барабана набувають вигляду

$$\rho_n c_n \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_n \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_n}{r} \frac{\partial T}{\partial r},$$

$$\rho_6 c_6 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_6 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_6}{r} \frac{\partial T}{\partial r},$$

де  $\rho_n$ ,  $c_n$  і  $\lambda_n$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність полімеру як функції температури  $T$  [5];  $\rho_6$ ,  $c_6$  і  $\lambda_6$  – густина, масова теплоємність і теплопровідність матеріалу обичайки барабана як функції температури [6];  $t$  – час;  $r$  – радіус.

Як початкову умову покладемо розподіл температури по товщині плівки та обичайки барабана на початку першої ділянки:

$$T_n \Big|_{t=0} = T_{0n}; \quad T_6 \Big|_{t=0} = T_{06}.$$

Граничні умови третього роду:

на першій ділянці

$$\alpha_1(T - T_{c1}) + \lambda_{\text{п}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_6+\delta} = 0,$$

де  $R_6$  – радіус зовнішньої поверхні обичайки;  
 $\delta$  – товщина плівки;

на другій ділянці

$$\alpha_2(T - T_{c2}) + \lambda_{\text{п}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_6+\delta} = 0;$$

на третій ділянці

$$\alpha_3(T - T_{c3}) + \lambda_{\text{п}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_6+\delta} = 0;$$

на четвертій ділянці

$$\alpha_4(T - T_{c4}) + \lambda_6 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_6} = 0;$$

на п'ятій ділянці

$$\alpha_5(T - T_{c5}) - \lambda_6 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0,$$

де  $R$  – радіус внутрішньої поверхні обичайки.

У промислових умовах зазвичай  $T_{c1} = T_{c3} = T_{c4}$ .

Граничні умови четвертого роду на межі контакту плівки з барабаном такі:

$$T_{\text{п}} \Big|_{r=R_6} = T_6 \Big|_{r=R_6}; \quad \lambda_{\text{п}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_6} = \lambda_6 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_6}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_5$  від внутрішньої поверхні обичайки до води в барабані визначається за рівняннями руху рідини в каналах [7], а коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha_1$ – $\alpha_4$  від вільних поверхонь плівки й барабана до повітря – за рівняннями від обертового циліндра [8].

Розв'язання наведеної математичної моделі було здійснене методом скінченних різниць за неявною схемою [9].

Для визначення моменту виходу процесу на стаціонарний режим (у певній точці барабана в нерухомій системі координат) потрібно розрахувати розподіл температури як по полімеру, так і по обичайці, після чого порівняти з відповідним розподілом температури в початковій точці першої ділянки. При цьому процес вважали таким, що стабілізувався, якщо відхи-

лення температури в певній точці по радіусу барабана в зазначеному місці на поточному й попередньому обертах не перевищувало  $0,1$  °С.

Як приклад на рис. 2 наведено розподіл середньої температури поліпропіленової плівки по дузі її контакту з охолоджувальним барабаном за різної швидкості плівки ( $R_6 = 0,5$  м;  $\delta = 1$  мм;  $T_{0\text{п}} = 300$  °С). На третій ділянці спостерігається деяке підвищення температури плівки, спричинене перерозподілом температури між обичайкою й полімером після виходу плівки з ванни охолодження.

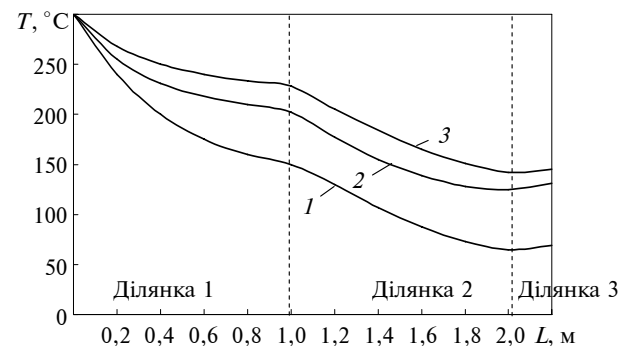


Рис. 2. Залежність середньої температури  $T$  поліпропіленової плівки по дузі її контакту ( $L$  – довжина шляху контакту) з охолоджувальним барабаном за швидкості плівки  $w_{\text{пл}}$ : 1 –  $0,1$  м/с; 2 –  $0,2$  м/с; 3 –  $0,3$  м/с

Під час проведення процесу потрібно, щоб у точці відриву плівки від барабана її температура була нижчою від температури склування полімеру, яка для поліпропілену залежно від його марки становить  $140$ – $170$  °С. Таким чином, режими охолодження 2 і 3 (див. рис. 2) можуть не забезпечити потрібних властивостей виготовленої плівки.

## Висновки

Як показує апробація в промислових умовах розробленої методики розрахунку процесу охолодження полімерної плівки на частково зануреному у водяну ванну барабані, цю методику можна рекомендувати для аналізу процесу виготовлення плівок з підвищеними вимогами до їхніх експлуатаційних властивостей.

Беручи до уваги широку номенклатуру полімерів і пластмас, які використовуються для виготовлення плівок, доцільно провести відповідні теоретичні та експериментальні дослідження для кількох матеріалів.

1. *Гуль В.Е., Дьяконов В.П.* Физико-химические основы производства полимерных пленок. – М.: Высш. шк., 1978. – 279 с.
2. *Лукач Ю.Е., Доброногова С.И., Ружинская Л.И.* Алгоритм расчета устройств для термообработки изделий из термопластов: Учеб. пособие. – К.: КПИ, 1984. – 84 с.
3. *Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимеров / Ю.Е. Лукач, Л.Г. Воронин, Л.И. Ружинская и др.* – К.: Техніка, 1988. – 208 с.
4. *Мікульонок І.О., Радченко Л.Б., Ружинська Л.І.* Моделювання термообробки погонних композитних матеріалів // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2005. – № 2. – С. 66–71.
5. *Пивень А.Н., Гречаная Н.А., Чернобыльский И.И.* Теплофизические свойства полимерных материалов: Справ. – К.: Выща шк., 1976. – 180 с.
6. *Андреев І.А., Зубрій О.Г., Мікульонок І.О.* Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни. – К.: ІЗМН, 1999. – 148 с.
7. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
8. *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справ. / Пер. с англ. В.В. Яковлева и В.И. Колядина. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
9. *Мікульонок І.О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: Монографія. – К.: ІВЦ “Вид-во “Політехніка”, 2009. – 265 с.

Рекомендована Радою  
інженерно-хімічного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
25 лютого 2011 року