

УДК 685.34.023.4

Т.І. КУЛІК, Б.М. ЗЛОТЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Стаття присвячена дослідженню процесу лиття полімерів під тиском. Розроблено математичну модель процесу заповнення прес-форми, що встановлює зміну температури та тиску розплаву полімерного матеріалу в процесі формування виробу. Проведено експериментальні дослідження, що підтверджують правомірність розроблених теоретичних положень. Розроблено рекомендації щодо проектування технологічної оснастки.

Ключові слова: взуття, лиття під тиском, технологічні параметри лиття, температура розплаву полімеру.

T.I. KULIK, B.M. ZLOTENKO

Kyiv National University of Technology and Design

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNOLOGICAL PROSESS OF INJECTION MOLDING OF PRODUCTS FROM POLYMERIC MATERIALS

The article deals with the technological process of polymer casting under pressure. The mathematical model of the process of the mold filling is evolved, which establishes the changes in temperature and pressure of the polymer material melt in the making of the products. Experimental studies confirming the correctness of the developed theoretical positions are performed. The recommendations for the design of technological equipment are proposed.

Keywords: footwear, injection molding, molding process parameters, temperature, pressure, polymer melt.

Вступ

Сучасне взуття виготовляється переважно з литою полімерною підошвою. Незалежно від способу кріплення полімерної підошви до заготовки верху взуття, технологія її виготовлення передбачає такі етапи: підготовка порції розплаву полімеру, упорскування його до прес-форми та охолодження до температури теплостійкості, після чого готовий виріб видаляється із прес-форми.

Постановка завдання

При недостатньо високій температурі лиття розплав полімеру може охолоджуватися до температури теплостійкості раніше, ніж відбудеться повне заповнення прес-форми. У випадку ж перевищення температури відбувається термічна деструкція матеріалу. В обох випадках вироби, що виготовляються, будуть бракованими. Особливі проблеми виникають при виготовленні виробів складної конфігурації – великої довжини, тонкостінних, багатоелементних.

Отже, визначення та підтримання необхідних температурних параметрів у процесі заповнення прес-форми при формуванні полімерних виробів є актуальним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню якості готових виробів.

Аналіз досліджень та публікацій

Якість виробу, виготовленого методом лиття під тиском, багато в чому визначається відповідністю умов переробки властивостям матеріалу, з якого даний виріб виготовлено. Температура переробки полімерного матеріалу визначає його в'язкість, а отже, й здатність рівномірно заповнювати прес-форму, утворюючи якісний міцний виріб з однорідною структурою [1–3].

Формулювання цілей

Метою даного дослідження є розроблення математичної моделі процесу заповнення прес-форми, яка встановлюватиме зміну температури та тиску розплаву полімерного матеріалу в процесі формування виробу та проведення експериментальних досліджень, які підтверджуватимуть достовірність отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу

При заповненні закритої прес-форми (рис. 1) розплав проходить через канал в насадці та ливникові канали в прес-формі. Приймаючи до уваги малу довжину цих каналів, можна вважати течію розплаву в них ізотермічною.

Напруження в розплаві залежать від швидкості зсуву:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

де τ – напруження зсуву, Па;
 μ – коефіцієнт консистенції, Па·с;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, 1/с;
 n – індекс течії розплаву.

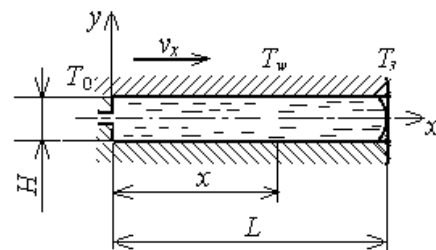


Рис. 1. Схема заповнення прес-форми в процесі інжекційного формування

Вихідна система рівнянь руху та напружень для циліндричного каналу має вигляд [4]:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{r} \frac{d(r\tau)}{dr}, \quad (2)$$

$$\tau = \mu \left(\frac{dV_x}{dr} \right)^n, \quad (3)$$

де P – тиск, Па;
 v – швидкість течії розплаву, м/с;
 x, y, r – поточні координати.

Вирішення цієї системи рівнянь може бути представлено у вигляді [4]:

$$\frac{dP}{dx} = 2\mu \left[\frac{Q \left(\frac{1}{n} + 3 \right)}{\pi R_K \frac{1}{n} + 3} \right]^n, \quad (4)$$

де Q – об’ємна швидкість заповнення прес-форми, м³/с;
 R_K – радіус каналу, м.

Перепад тиску у щільному каналі визначається рівнянням руху [4]:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d\tau}{dz}. \quad (5)$$

Напруження в розплаві:

$$\tau = \mu \left(\frac{dV_x}{dz} \right)^n. \quad (6)$$

Вирішення рівнянь (5) в (6) для каналу ширини B_K і висоти H_K дає:

$$\frac{dP}{dx} = 2\mu \left[\frac{2 \left(\frac{1}{n} + 2 \right) Q}{B_K H_K \frac{1}{n} + 2} \right]^n, \quad (7)$$

Скористаємось відомою [4] температурною залежністю:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (8)$$

де R – універсальна газова стала;
 μ_0, E – реологічні параметри потоку.

Для рухомої частинки розплаву у щільному оформлюючому елементі, площа якої визначається поперечним перетином каналу, а довжина дорівнює dx , рівняння теплопровідності набуде вигляду [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t_x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (9)$$

де t_x – час течії частинки, який визначається середньою швидкістю потоку, с.

Вирішення рівняння (9) відоме [5]:

$$T \approx \frac{4}{\pi} \cos\left(\pi \frac{y}{H}\right) \exp(-gt_x)(T_0 - T_w) + T_w, \quad (10)$$

де $g = \frac{10a}{H^2}, c^{-1}$.

Середня швидкість потоку буде:

$$\bar{V} = \frac{Q}{HB}, \quad (11)$$

$$t_x = \frac{HBx}{Q}, \quad (12)$$

де Q – витрата потоку, м³/с;
 H, B – відповідно висота та ширина каналу, м.

З рівнянь (10) і (12), одержимо:

$$T = \frac{4}{\pi} \cos\left(\pi \frac{y}{H}\right) \exp\left(-\frac{gBH}{Q}x\right)(T_0 - T_w) + T_w. \quad (13)$$

Середня температура по висоті каналу дорівнюватиме:

$$\bar{T} = \frac{2}{H} \int_0^{\frac{H}{2}} T = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{gBH}{Q}x\right)(T_0 - T_w) + T_w. \quad (14)$$

Підставляючи (14) в (8), отримаємо:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{E}{R \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{gBH}{Q}x\right)(T_0 - T_w) + T_w}\right). \quad (15)$$

Після підстановки (15) в (7), маємо:

$$\frac{dP}{dx} = 2\mu_0 \exp\left(\frac{E}{R \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{gBH}{Q}x\right)(T_0 - T_w) + T_w}\right) \left[\frac{2\left(\frac{1}{n} + 2\right)Q}{B_\kappa H_\kappa \frac{1}{n} + 2}\right]^n. \quad (16)$$

Інтегрування (16) дає:

$$P = 2\mu_0 \left[\frac{2\left(\frac{1}{n} + 2\right)Q}{B_\kappa H_\kappa \frac{1}{n} + 2}\right]^n \int_0^L \left(\frac{E}{R \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{gBH}{Q}x\right)(T_0 - T_w) + T_w}\right) dx. \quad (17)$$

Для порожнистих стрижнів B – довжина середнього периметра перетину. Для круглих:

$$B = 2\pi\bar{r}, \quad (18)$$

де \bar{r} – середній радіус периметра.

Підставляючи (18) в (17), маємо:

$$P = 2\mu_0 \left[\frac{2\left(\frac{1}{n} + 2\right)Q}{2\pi\bar{r}H_\kappa \frac{1}{n} + 2}\right]^n \int_0^L \exp\left(\frac{E}{R \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{g2\pi\bar{r}H}{Q}L\right)(T_0 - T_w) + T_w}\right) dx. \quad (19)$$

Для прямокутних стрижнів ширина каналу:

$$B = 2(\bar{a} + \bar{b}). \quad (20)$$

Підставляючи (20) в (17), отримаємо:

$$P = 2\mu_0 \left[\frac{2\left(\frac{1}{n} + 2\right)Q}{2(\bar{a} + \bar{b})H_\kappa \frac{1}{n} + 2}\right]^n \int_0^L \exp\left(\frac{E}{R \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{g2(\bar{a} + \bar{b})H}{Q}L\right)(T_0 - T_w) + T_w}\right) dx. \quad (21)$$

Експериментальні дослідження проводилися на реальному виробничому обладнанні – машині литтєвій вертикальній МЛВ-32 (рис. 2).

Температура розплаву в матеріальному циліндрі 2 преса l задається і контролюється за допомогою електронного приладу 5 марки ЭВ 3000К з термопарою типу ТХК. Тиск в циліндрі вузла впорскування задається за допомогою дроселя гідросистеми литтєвого преса l і контролюється манометром марки МПЗ-У.

У прес-формі виконані отвори у верхній та нижній частинах для закріплення термопар ТР-01А. Термопари під'єднуються до автоматичного самопишучого потенціометра ПС1-04. Дана конструкція дозволяє слідкувати за зміною температури у визначених точках в процесі заповнення та охолодження прес-форми. Нагрів прес-форми відбувається за допомогою нагрівального приладу та контролюється мультиметром DT-838 із термопарою.

У результаті обробки експериментальних даних вдалося встановити залежності, що описують зміну температури у прес-формі залежно від вихідних технологічних параметрів тиску лиття:

Температура у кінці прес-форми:

$$T_\kappa = 0,613 \cdot T_\phi + 2,125 \cdot T - 124,75. \quad (22)$$

де T_κ – температура розплаву в кінці заповнення, °С;

T – температура лиття, °С;

T_ϕ – температура стінок прес-форми, °С.



Рис. 2. Експериментальна литвева установка:
1 – литвєвий прєс МЛВ-32; 2 – матерiальний цилiндр; 3 – прєс-форма; 4 – блок керування;
5 – прилад ЭВ для контролю температури; 6 – самопишущий потенцiометр ПС1-04

На рис. 3 представленi графiчнi залежностi температури розплаву в кiнцi течiї вiд температури розплаву на початку течiї, розрахованi за виразами (14) i (22).

Висновки

iз побудованих графiкiв видно, що температура на входi в прєс-форму суттєво вiдрiзняється вiд температури в кiнцi заповнення. На вiдстанi 60 мм при товщинi виробу 5 мм спостерiгалося падiння температури на 25 °С. При цьому експериментальнi данi добре узгоджуються iз теоретичними, що пiдтверджує правомiрностi отриманої моделi.

Встановивши закономірності зниження температури розплаву по довжині течії, можна прогнозувати, у якій частині виробу почнеться склування полімеру. Це дозволить спроектувати оптимальну конструкцію прєс-форми, визначивши необхідну кількість впускних отворів, та розташувати їх таким чином, щоб забезпечити рівномірне заповнення прєс-форми для отримання якiсних виробiв.

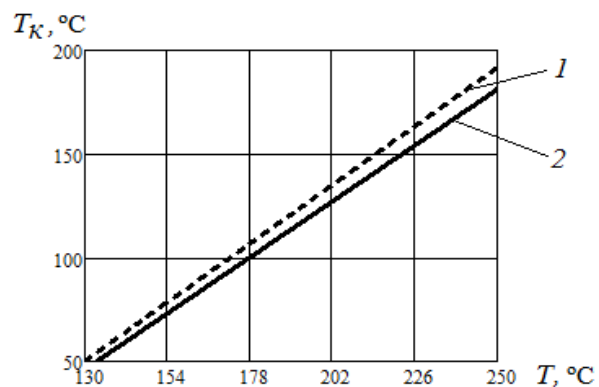


Рис. 3. Залежностi температури розплаву в кiнцi течiї вiд температури розплаву на початку течiї:
1 – аналітична; 2 – експериментальна

Лiтература

1. Пахаренко В. А. Переработка полимерных композиционных материалов / В. А. Пахаренко, Р. А. Яковлева, А. В. Пахаренко. – К. : Воля, 2006. – 552 с.
2. Суберляк О. В. Технология переработки полимерных та композиционных материалов : підруч. / О. В. Суберляк, П. І. Баштанник. – Львів : Растр-7, 2007. – 307 с.
3. Тхiр І. Г. Фiзико-хімія полімерiв : навч. посiб./ І. Г. Тхiр, Т. В. Гуменецький. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
4. Торнер Р. В. Теоретические основi переработки полимеров (механика процессов) / Торнер Р. В. – М. : Химия, 1977. – 464 с.
5. Басов Н. И. Литьевое формование полимеров / Басов Н. И., Казанков Ю. В. – М. : Химия, 1984. – 248 с.