

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Стаття присвячена дослідженню процесу лиття під тиском полімерних взуттєвих виробів складної конфігурації.

У роботі розглянуто процес лиття у відкриту форму та у закриту з нижнім положенням пуансона. Після заповнення відкритої чи закритої форми розплав підпресовується за рахунок переміщення пуансона, рівномірно заповнюючи оформлюючі порожнини прес-форми. Розроблено математичну модель процесу, у результаті дослідження якої встановлені залежності витрати розплаву полімеру від кута підйому черв'яка у матеріальному циліндрі з урахуванням геометричних параметрів екструзійної головки та прес-форми при литті у форму з підйомом пуансона. З отриманих залежностей можна визначити необхідний час заповнення прес-форми та частоту обертання черв'яка для заданої витрати розплаву.

Ключові слова: полімерне взуття, лиття під тиском, інжекційно-пресове формування, технологічні параметри лиття.

Т.І. KULIK

Kyiv National University of Technology and Design

MATHEMATICAL MODELING OF INJECTION MOLDING PROCESS OF POLYMER PRODUCTS OF COMPLEX CONFIGURATION

The article investigates the process of injection molding plastic shoe parts of complex configuration. This article examines the process of casting in open and in closed form at the bottom position of the punch. After filling the open or closed mold pressurizing of melt is carried out by moving the punch thus uniformly filling the cavity of the mold. The mathematical model of the process is developed, on the basis of which are established the dependencies of the volumetric speed of the polymer melt on the slope angle of worm in the cylinder considering the geometric parameters of the extrusion head and the mold when casting in the mold with lifting the punch. From these dependencies can be determined the required filling time of the mold and the worm rotational speed for a given volumetric speed of melt.

Keywords: polymeric footwear, injection molding, injection-pressing formation, molding process parameters.

Вступ

Полімери широко використовуються при виробництві різних деталей, особливо у легкій промисловості. Взуттєва галузь, як і інші галузі легкої промисловості, споживає великі обсяги полімерних матеріалів. Перевагами їх використання є: економія дорогої натуральної сировини; створення безвідходного або маловідходного виробництва; зниження трудових затрат за рахунок скорочення основних та допоміжних операцій; підвищення якості виробів за рахунок уніфікації деталей та вузлів; автоматизація виробництва; підвищення продуктивності праці та зниження собівартості виробу.

З полімерних матеріалів виготовляють деталі верху взуття та переважну більшість деталей низу: підошву і каблук та їх вузли. До вузла підошви відносять з'єднання деталей: підошва, каблук, підметка, декоративний рант, геленок тощо. До вузла каблука належать: каблук, набійка, вкладиш каблука, геленок, рант. Взуттєва промисловість також пропонує широкий асортимент суцільнополімерного взуття – чоботи, чобітки, калоші, пляжне та спортивне взуття та інші вироби.

На сьогоднішній день найбільш поширеним методом формування полімерних взуттєвих виробів є лиття під тиском.

Постановка завдання

Для підвищення конкурентоспроможності взуття необхідно забезпечити його високі експлуатаційні показники. Реалізувати це можна за рахунок включення до конструкції підошви взуття різного роду активних елементів, таких, як антиковзні стрижні, трубчасті або стрижневі амортизатори та інші вставки [1-2]. Ускладнення конструкції підошви вимагає удосконалення технологічного процесу лиття на основі математичного моделювання заповнення прес-форми.

Аналіз досліджень та публікацій

Для полімерних виробів складної конфігурації можна запропонувати метод лиття у відкриту форму з подальшим її закриттям та компресією за рахунок переміщення пуансона [3] (рис. 1). Такий спосіб забезпечує рівномірне заповнення прес-форми із затіканням розплаву в усі ділянки її оформлюючої порожнини. У цьому випадку тиск на розплав у формі створюється не тільки зусиллям інжекції, а й за рахунок пресового механізму вузла змикання.

Якщо ж виріб при складній конструкції не містить високих штирів чи інших подібних елементів, то



Рис. 1. Наповнення відкритої прес-форми

можна рекомендувати лиття у закриту прес-форму з підпресуванням її після заповнення за рахунок підйому пуансона.

У обох випадках необхідно розробити рекомендації щодо параметрів технологічного процесу, які б забезпечили виготовлення рівномірного виробу з високими експлуатаційними показниками.

Формулювання цілей

Метою дослідження є розроблення математичної моделі процесу виготовлення взуттєвих виробів складної конфігурації із активними елементами або суцільно формованого полімерного взуття, який здійснюється шляхом наповнення прес-форми у відкритому або закритому стані при нижньому положенні пуансона, з подальшим підпресуванням за рахунок переміщення останнього.

Виклад основного матеріалу

В роботі [4] було отримано вираз для визначення витрати розплаву в матеріальному циліндрі литтєвої машини (рис. 2):

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{P}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2}, \tag{1}$$

де D – діаметр черв'яка; N – частота обертання черв'яка; H – висота каналу; φ – кут підйому витків черв'яка; n – індекс течії розплаву; μ – коефіцієнт консистенції розплаву; P – тиск лиття; L – довжина матеріального циліндра.

Якщо розплав витікає через насадку з циліндричним каналом, то тиск перед каналом дорівнює перепаду тиску в каналі, оскільки при литті у відкриту форму тиск в кінці каналу дорівнює атмосферному.

Перепад тиску в каналі, згідно [5]:

$$P = \Delta P = 2 \mu \cdot l \cdot \left[\frac{\left(\frac{1}{n} + 3 \right) Q}{\pi R_k^n} \right]^{\frac{1}{n}+3}, \tag{2}$$

де l – довжина ливникового каналу; R_k – радіус ливникового каналу.

Підставляючи (2) в (1), отримаємо:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2} \cdot \frac{Q}{\pi \cdot R_k^{\frac{1}{n}+3}}, \tag{3}$$

звідки витрата розплаву визначиться у вигляді:

$$Q = \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi^3 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot R_k^{\frac{1}{n}+3}}{1 + 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2}}. \tag{4}$$

Якщо отворів у насадці більше одного, то тиск перед насадкою буде:

$$P = \Delta P = 2 \cdot \mu \cdot l \cdot \left[\frac{\left(\frac{1}{n} + 3 \right) \cdot \frac{Q}{k}}{\pi \cdot R_k^n} \right]^{\frac{1}{n}+3}. \tag{5}$$

де k – кількість отворів у насадці.

У такому випадку витрата розплаву дорівнюватиме:

$$Q = \frac{\frac{k}{2} \cdot \pi^3 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot R_k^{\frac{1}{n}+3}}{1 + 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2}}. \tag{6}$$

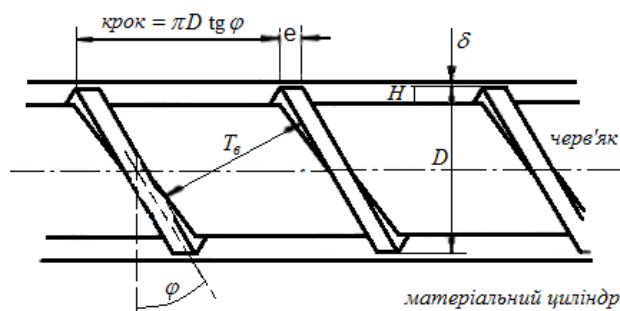


Рис. 2. Геометричні параметри черв'яка литтєвої машини

На рис. 3. наведена залежність об'ємної витрати розплаву від швидкості обертання черв'яка.

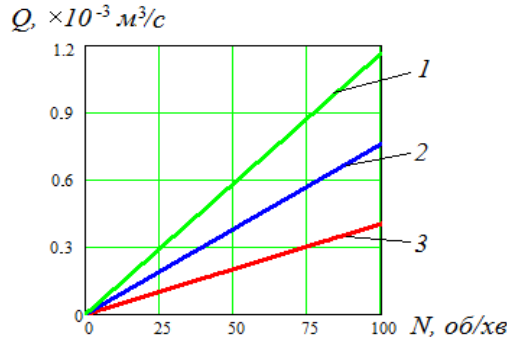


Рис. 3. Залежність об'ємної витрати розплаву від швидкості обертання черв'яка при куті підйому витків черв'яка: 1 – φ = 10°; 2 – φ = 20°; 3 – φ = 40°

З рис. 3 випливає, що витрата розплаву прямо пропорційна швидкості обертання черв'яка.

Враховуючи, що витрата розплаву $Q = \frac{V}{t}$, з (6) отримаємо вираз для визначення часу заповнення прес-форми:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{2V \cdot \left[1 + 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2} \right]}{k \cdot \pi^3 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot R_K^{\frac{1}{n}+3}} \quad (7)$$

З виразу (6) можна отримати вираз для визначення частоти обертання черв'яка при заповненні прес-форми з усталеною витратою розплаву:

$$N = \frac{2Q \cdot \left[1 + 2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{1+3n}{1+2n} \cdot \left(\frac{2l}{L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2} \right]}{k \cdot \pi^3 \cdot D^2 \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot R_K^{\frac{1}{n}+3}} \quad (8)$$

На рис. 4. наведено залежність швидкості обертання черв'яка від часу заповнення прес-форми:

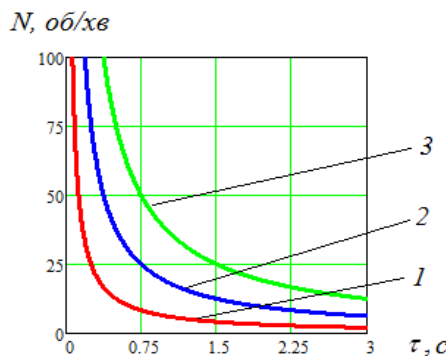


Рис. 4. Залежність швидкості обертання черв'яка від часу заповнення прес-форми при швидкості течії розплаву: 1 – V = 100 · 10⁻⁶ м³; 2 – V = 300 · 10⁻⁶ м³; 3 – V = 600 · 10⁻⁶ м³

Як видно з рис. 4, зменшення швидкості заповнення менше 1 сек. потребує значного підвищення швидкості обертання черв'яка. При цьому, із збільшенням об'єму прес-форми необхідна величина підвищення швидкості обертання черв'яка зростає.

У випадку, коли конфігурація оформлюючої поверхні прес-форми не включає глибокі порожнини для формування складних елементів, доцільно її заповнення здійснювати у закритому стані, з нижнім положенням пуансона, при подальшому підпресуванні розплаву за рахунок підйому пуансона (рис. 5).

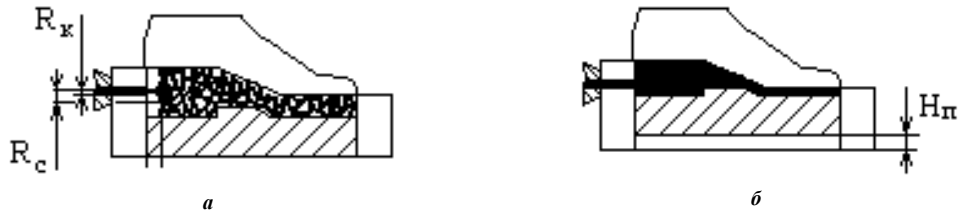


Рис. 5. Схема процесу заповнення прес-форми при литті підшов з гумових сумішей на заготовку верху взуття: а – стадія упорскування; б – стадія витримки під тиском

Витрата неньютонівської рідини під час течії в каналі пов'язана з перепадом тиску:

$$Q = K \cdot (\Delta P)^{\frac{1}{n}}, \tag{9}$$

де K – коефіцієнт, що відповідає каналу радіуса R довжиною L .

Вважаючи, що градієнт тиску в прес-формі $\frac{dP}{dx} = \frac{\Delta P}{l}$, можна отримати:

$$Q = \frac{\pi \cdot R_k^{\frac{1}{n}+3}}{2 \cdot \left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \mu \cdot l^{\frac{1}{n}}} \cdot (\Delta P)^{\frac{1}{n}} \tag{10}$$

або

$$K = \frac{\pi \cdot R_k^{\frac{1}{n}+3}}{2 \cdot \left(\frac{1}{n} + 3\right) \cdot \mu \cdot l^{\frac{1}{n}}}. \tag{11}$$

Для насадки матеріального циліндра:

$$Q = K_d \cdot (P - P_d)^{\frac{1}{n}}. \tag{12}$$

Для прес-форми:

$$Q = K_m \cdot (P - P_m)^{\frac{1}{n}}. \tag{13}$$

У виразах (12) і (13) індекси d і m відносяться до насадки і прес-форми відповідно.

Вважаючи, що в процесі наповнення форми у випадку лиття з підйомом пуансона $P_m = 0$, з (12) і (13) отримаємо:

$$K_d \cdot (P - P_d)^{\frac{1}{n}} = K_m \cdot P^{\frac{1}{n}}. \tag{14}$$

і

$$P_d = \frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n} \cdot P. \tag{15}$$

Тоді (12) і (13) набудуть вигляду:

$$Q = K_d \cdot \left(1 - \frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot P^{\frac{1}{n}}. \tag{16}$$

$$Q = K_m \cdot \left(\frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot P^{\frac{1}{n}}. \tag{17}$$

Отже, отримаємо:

$$K_m \cdot \left(\frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot P^{\frac{1}{n}} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \frac{2\pi D}{\frac{1}{n} + 2} \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \left(\frac{P}{\mu L}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}+2}, \tag{18}$$

звідки тиск в матеріальному циліндрі:

$$P = \left[\frac{\frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot N \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{K_m \cdot \left(\frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n} \right)^{\frac{1}{n}} + \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \cdot \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2}}{\left(\frac{1}{n} + 2 \right) \cdot (\mu \cdot L)^{\frac{1}{n}}} \right]^n \quad (19)$$

Підставляючи (19) в (1) отримаємо витрату розплаву:

$$Q = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N H \sin \varphi \cos \varphi - \frac{\pi^3 D^3 N H \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2} \cos \varphi (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+2}}{\left(\frac{1}{n} + 2 \right) K_m (\mu L)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{K_d^n}{K_m^n + K_d^n} \right)^{\frac{1}{n}} + 2 \pi D (\sin \varphi)^{\frac{1}{n}+1} \left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}+2}} \quad (20)$$

Висновки

Розроблена математична модель процесу виготовлення взуття з активними елементами та суцільно формованого полімерного взуття, який здійснюється шляхом наповнення прес-форми у відкритому стані при нижньому положенні пуансона, з подальшим підпресуванням за рахунок переміщення останнього.

У результаті дослідження отриманої математичної моделі встановлені залежності витрати розплаву від кута підйому черв'яка у матеріальному циліндрі з урахуванням геометричних параметрів екструзійної головки та прес-форми при литі у форму з підйомом пуансона.

Література

1. Hennig E. M. The influence of soccer shoe design on playing performance: a series of biomechanical studies / Hennig E. M., Sterzing, T. // *Footwear Science*. – 2010. – Vol. 2, No. 1 – P. 3–11.
2. Hilgers M. P. Evolution of Soccer Shoe Design / Hilgers M. P., Walther M. // *International Journal of Athletic Therapy & Training*. – 2011. – Vol. 16 – P. 1–4.
3. Основы технологии переработки пластмасс : учебник для вузов / [С. В. Власов, Л. Б. Кандырин, В. Н. Кулезнев и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Химия, 2004. – 600 с.
4. Кулік Т. І. Математичне моделювання процесу течії розплаву полімерного матеріалу в матеріальному циліндрі інжекційної машини / Т. І. Кулік, Б. М. Злотенко // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. – 2016. – № 6(104). – С. 11–17.
5. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров / Торнер Р. В. – М. : Химия, 1977. – 464 с.

References

1. Hennig E. M. The influence of soccer shoe design on playing performance: a series of biomechanical studies / Hennig E. M., Sterzing, T. // *Footwear Science*. – 2010. – Vol. 2, No. 1 – P. 3–11.
2. Hilgers M. P. Evolution of Soccer Shoe Design / Hilgers M. P., Walther M. // *International Journal of Athletic Therapy & Training*. – 2011. – Vol. 16 – P. 1–4.
3. Osnovy tekhnolohyy pererabotky plastmass : uchebnyk dlia vuzov / [S. V. Vlasov, L. B. Kandyryn, V. N. Kuleznev y dr.]. – 2-e yzd., yspr. y dop. – M. : Khymyia, 2004. – 600 s.
4. Kulik T. I. Matematychnе modeliuvannia protsesu techii rozplavu polimernoho materialu v materialnomu tsylindri inzhektsiinoi mashyny / T. I. Kulik, B. M. Zlotenko // *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*. – 2016. – # 6(104). – S. 11–17.
5. Torner R. V. Teoretycheskye osnovy pererabotky polymerov / Torner R. V. – M. : Khymyia, 1977. – 464 s.

Рецензія/Peer review : 21.04.2017 р.

Надрукована/Printed : 20.08.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Зенкін М. А.