

WYKORZYSTANIE ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY CIŚNIENIEM, OBJĘTOŚCIĄ WŁAŚCIWĄ I TEMPERATURĄ DO STEROWANIA PROCESEM WTRYSKIWANIA

Beata Kowalska*, Bronisław Samujło**

*Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 40b, 20-618 Lublin, b.kowalska@pollub.pl

**Katedra Procesów Polimerowych, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, b.samujlo@pollub.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania zmierzające do wykorzystania zależności pomiędzy ciśnieniem, objętością właściwą a temperaturą do sterowania ciśnieniem docisku podczas wtryskiwania tworzyw termoplastycznych na przykładzie polipropylenu izotaktycznego.

Słowa kluczowe: zależność p-v-T, sterowanie ciśnieniem docisku, proces wtryskiwania

WSTĘP

Głównym celem sterowania procesem wtryskiwania jest zapewnienie jego dużej wydajności, przy odpowiedniej jakości wyprasek. Ze względu na złożony charakter tego procesu, a zatem trudny do opisu matematycznego, istotne jest właściwe sklasyfikowanie czynników mających wpływ na właściwości wyprasek. W procesie wtryskiwania następuje przemiana wielkości bezpośrednich, ustalanych i następnie nastawianych na wtryskarce i ewentualnie formie wtryskowej, w wielkości pośrednie i dalej w wielkości pośrednie stanu polimeru w gnieździe formującym formy wtryskowej. Teoretycznie im bliżej miejsca, w którym są konstituowane cechy wypraski, tym większe jest prawdopodobieństwo uzyskania danych obarczonych mniejszym błędem. Stan polimeru w formie jest określany przez ciśnienie, objętość właściwą, temperaturę oraz rodzaj i prędkość przepływu, istotną w fazie wypełniania gniazda polimerem w stanie ciekłym. Faza docisku charakteryzuje się bardzo małą prędkością przepływu, określaną przez zmiany objętości spowodowane ściśliwością i ochładzaniem polimeru ciekłego [Kennedy 1995, Kazmer i Barkan 1997]. Zależność p-v-T może być zatem efektywnie wykorzystana do sterowania procesem, szczególnie w fazie docisku.

CEL BADAŃ

Celem pracy było wykorzystanie zależności p-v-T do sterowania procesem wtryskiwania, szczególnie w fazie docisku. Działanie takie jest podstawą sterowania skurczem pierwotnym wyprasek i określane w literaturze [Kennedy 1995, Rosato 1995, Kazmer i Barkan. 1997] jako optymalizacja p-v-T. Aby uzyskać zamierzony przebieg ciśnienia w gnieździe formy wtryskowej przy wykorzystaniu zależności p-v-T, konieczna jest znajomość krzywej ochładzania polimeru znajdującego się w gnieździe formującym w czasie trwania procesu. Na podstawie tej krzywej oraz naniesionej na wykres p-v-T krzywej charakteryzującej proces wtryskiwania można wykreślić zależność ciśnienia w gnieździe formy w funkcji czasu. W tym celu wykonano pomiary ciśnienia i temperatury polimeru w gnieździe formującym formy wtryskowej w czasie trwania procesu. Uzyskane w tym samym czasie wartości ciśnienia i temperatury umożliwiły naniesienie przebiegu procesu na wykres p-v-T.

METODYKA

W badaniach wykorzystano polipropylen o nazwie handlowej Malen P typ J-400 firmy Basell Orlen Polyolefins, charakteryzujący się następującymi podstawowymi właściwościami: gęstość $905 \div 917 \text{ kg/m}^3$, masowy wskaźnik szybkości płynięcia $\text{MFR}_{230; 2,16} = 2,5 \div 3,5 \text{ g/10 min}$, naprężenie zrywające 32 MPa, granica plastyczności przy rozciąganiu 30 MPa, wydłużenie przy zerwaniu $\geq 600\%$, ciepło właściwe w temperaturze $230^\circ\text{C} = 1900 \text{ J/(kg K)}$, temperatura mięknięcia według Vicata 148°C , wskaźnik izotaktyczności 95%. Pomiary p-v-T zostały wykonane przy szybkości ochładzania 5°C/min za pomocą urządzenia pvT 100 firmy SWO Polymertechnik. Urządzenie to oraz metoda pomiarowa zostały scharakteryzowane bliżej w literaturze [Kowalska i Sikora 2003, Sikora 2006]. Proces wtryskiwania przeprowadzono wykorzystując wtryskarkę CS-88/63, której charakterystyczne dane techniczne zamieszczono w tabeli 1. Zamontowana w układzie narzędziowym wtryskarki forma wtryskowa ma gniazda formujące odwzorowujące kształt i wymiary próbek do badań właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu typu 2 według PN-EN ISO 572:1998. Do gniazd formujących tworzywo jest doprowadzane jednostronnie wzdłuż osi podłużnej próbki.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne wtryskarki CS-88/63
Table 1. Basic technical data of the injection molding machine CS-88/63

Układ uplastyczniający	
Średnica ślimaka	36 mm
Stosunek L/D	20
Objętość skokowa	73,5 cm ³
Ciśnienie wtryskiwania	120 MPa
Największa masa wypraski (PS)	88 g
Układ narzędziowy	
Siła zamykania formy	650 kN
Powierzchnia płyty mocowania formy	455 mm ²
Skok stołu	250 mm

Warunki procesu wtryskiwania były określone na podstawie zaleceń podanych przez producenta oraz danych zaczerpniętych z literatury [Smorawiński 1989, Sikora 1993, Zawistowski i Zięba 1995]. Stałe parametry procesu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Stałe wielkości procesu wtryskiwania

Table 2. Values of injection molding parameters

Wielkość	Wartość
Temperatura wzdłuż układu uplastyczniającego $T_1, T_2, T_3, ^\circ\text{C}$	210, 220, 230
Temperatura dyszy $T_d, ^\circ\text{C}$	240
Temperatura formy $T_f, ^\circ\text{C}$	40
Ciśnienie wtryskiwania p_w, MPa	80
Ciśnienie docisku p_d, MPa	70
Czas wtrysku t_w, s	1
Czas docisku t_d, s	10
Czas ochładzania t_2, s	20
Czas uplastyczniania t_{up}, s	2

Do pomiaru ciśnienia w gnieździe formującym wykorzystano przetwornik ciśnienia DAIV2 firmy Gneuß Kunststofftechnik GmbH. Zmiany ciśnienia w gnieździe oraz zmiany ciśnienia hydraulicznego rejestrowano za pomocą programu komputerowego [Płaska i in. 2000, Stączek 2004]. Punkt przełączenia na ciśnienie docisku następował po wypełnieniu gniazda formy przy ciśnieniu hydraulicznym o wartości 10 MPa.

Temperaturę polimeru mierzono za pomocą termopary miedź–konstantan o oznaczeniu TP-391T-1,5 firmy Czaki Thermo-Product. Dokładność deklarowana przez producenta wynosiła 1°C przy pomiarze temperatury w zakresie od -44 do 133°C oraz $0,75^\circ\text{C}$ w zakresie $133\div 350^\circ\text{C}$. Termopara była podłączona do wielokanałowego psychrometru PS/1 firmy Easy Test. Termoparę umieszczono 10 mm za przewężką, w odległości około 2 mm od ścianki gniazda (w środku wypraski). Dodatkowo mierzono temperaturę polimeru wtrysniętego przy otwartej formie, a także przeprowadzono obliczenia krzywej ochładzania polimeru w różnych jego punktach.

W obliczeniach wykorzystano równanie opisujące jednowymiarowe przewodzenie ciepła w stanie nieustalonym, w płycie nieskończonej (szerokość i długość płyty są znacznie większe od jej grubości s , $x = 0$ oraz $x = s$ są współrzędnymi powierzchni zewnętrznej), bez wewnętrznych źródeł ciepła, przy założeniu stałej temperatury powierzchni zewnętrznych i stałej średniej dyfuzyjności cieplnej a , w następującej postaci [Staniszewski 1980, Wunderlich 1980, Wiśniewski i Wiśniewski 1997]:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie t – czas.

Równanie (1) w ogólnym przypadku można przedstawić w postaci następującego szeregu nieskończonego [Gissing i Knappe 1983]:

$$T = T_w + \frac{4}{\pi} (T_s - T_w) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2n+1} e^{-a(2n+1)^2 \pi^2 t / s^2} \sin \frac{(2n+1)\pi x}{s} \right] \quad (2)$$

gdzie:

T_w – temperatura powierzchni wewnętrznej gniazda formującego,

T_s – temperatura polimeru wtryskiwanego,

s – grubość wypraski,

x – odległość od powierzchni wewnętrznej gniazda formującego,

t – czas

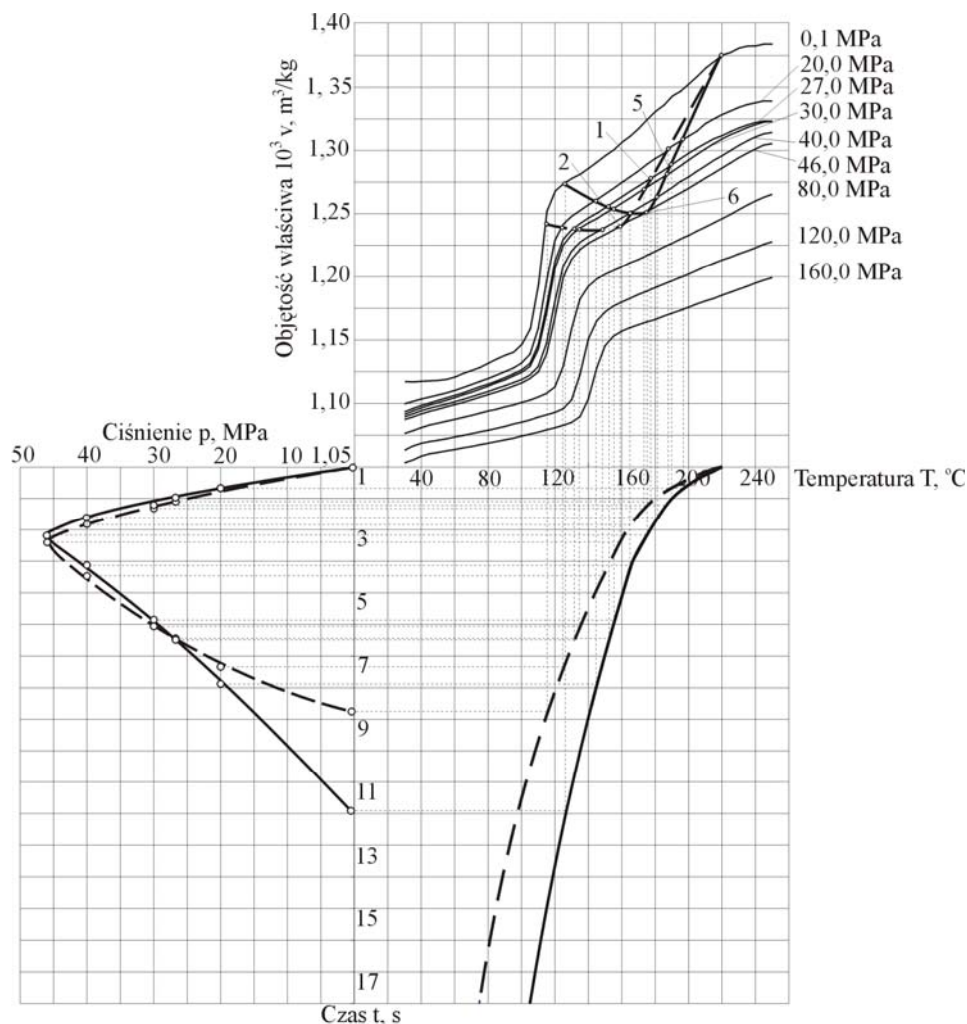
Średnią temperaturę polimeru można określić za pomocą zależności:

$$\bar{T} = \frac{1}{s} \int_0^s T(x, t) dx \quad (3)$$

WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów ciśnienia i temperatury w danym miejscu wypraski w czasie trwania procesu wtryskiwania naniesiono przybliżony przebieg tego procesu na wykres p-v-T i przedstawiono na rysunku 1. Linia przerywana dotyczy miejsca pośredniego pomiędzy środkiem wypraski a ścianką gniazda (1,5 mm od ścianki), linia ciągła – miejsca środkowego (2 mm od ścianki). Punkty 1 oraz 5 odpowiadają wartościom ciśnienia na końcu fazy wypełniania gniazda polimerem w badanych miejscach wypraski, natomiast punkty 2 oraz 6 oznaczają największe ciśnienie w gnieździe formy (ciśnienie sprężania) w tych samych miejscach. Jak można zaobserwować, przebiegi krzywych różnią się między sobą, a dla różnych miejsc pomiaru temperatury polimeru można odczytać różne wartości ciśnienia i różne wartości temperatury im odpowiadające. Dla środka wypraski przy największym ciśnieniu (punkt 6) równym 45,7 MPa temperatura polimeru wynosi 175°C, podczas gdy bliżej ścianki, pod tym samym ciśnieniem temperatura jest równa 159°C.

Na podstawie krzywych ochładzania oraz przebiegu procesu wtryskiwania naniesionego na wykres p-v-T można określić zależność zmian ciśnienia w gnieździe formującym w funkcji czasu. Sposób konstruowania wykresu zmian ciśnienia w funkcji czasu dla scharakteryzowanych wcześniej dwóch miejsc wypraski jest następujący. Punkty przecięcia krzywej przebiegu procesu wtryskiwania z izobarami na wykresie p-v-T zrzutowano poprzez oś temperatury na krzywą ochładzania, odpowiednio dla poszczególnych miejsc polimeru. Tak otrzymane punkty przecięcia, wiążące odpowiednie wartości temperatury polimeru z czasem cyklu procesu wtryskiwania zostały zrzutowane poprzez oś czasu w powiązane współrzędne p(t). Odnosząc odpowiednio wartości czasu do odpowiadających im wartości ciśnienia z wykresu p-v-T, otrzymano punkty, które po połączeniu utworzyły krzywą zależności ciśnienia polimeru w gnieździe formującym formy wtryskowej od czasu procesu wtryskiwania w różnych miejscach polimeru.



Rys. 1. Związek pomiędzy przebiegiem procesu wtryskiwania naniesionym na wykres p-v-T a krzywą ciśnienia polipropylenu w gnieździe formującym w funkcji czasu [Kowalska 2006]

Fig. 1. The relation between injection molding process marked on the p-v-T graph and the pressure in the mold cavity versus time for iPP

WNIOSKI

Zależności p-v-T mogą być efektywnie wykorzystywane do sterowania i optymalizacji procesu wtryskiwania polimerów przy uwzględnieniu wielkości istotnie wpływających na przebieg tego procesu. Przeprowadzone badania wykazały, że zarówno sposób, jak i miejsce pomiaru temperatury i ciśnienia wpływają na krzywą charakteryzującą ten

proces przedstawiany na wykresach p-v-T. Spotykane w literaturze [Smorawiński 1989, Sikora 1993] wyidealizowane przebiegi wtryskiwania, w których nie uwzględnia się m.in. ochładzania polimeru w stanie ciekłym w czasie wypełniania gniazda formy, a pomiar temperatury często dotyczy tylko zewnętrznego miejsca wypraski, nie odzwierciedlają zadowalająco rzeczywistych zmian termodynamicznych zachodzących w polimerze podczas procesu. Pomiar zależności pomiędzy ciśnieniem, objętością właściwą i temperaturą danego polimeru, na podstawie którego jest sporządzany wykres p-v-T, przeprowadza się w warunkach laboratoryjnych znacznie różniących się od tych, jakie charakteryzują ochładzanie wypraski w czasie procesu wtryskiwania.

PIŚMIENNICTWO

- Gissing K., Knappe W. 1983. Zum optimalen Nachdruckverlauf beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe. *Kunststoffe* 73, 241.
- Kazmer D., Barkan P. 1997. Multi-Cavity Pressure Control in the Filling and Packing Stages of the Injection Molding Process. *Polymer Eng. Sci.* 37, 1865.
- Kennedy P. 1995. *Flow Analysis of Injection Molds*. Hanser Publishers, Munich-Vienna-New York.
- Kowalska B., Sikora R. 2003. Wpływ czasu ochładzania wyprasek wtryskowych na termodynamiczne równanie stanu. *Polimery* 5, 359.
- Kowalska B. 2006. *Przetwórcze aspekty termodynamicznych właściwości polimerów termoplastycznych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- Plaska S., Stączek P., Bogucki M. 2000. Komputerowy system pomiarowo-sterujący dla wtryskarek ślimakowych [w:] *Materiały polimerowe i ich przetwórstwo*. Praca zbiorowa. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 203.
- Rosato D., Rosato D. 1995. *Injection Molding Handbook*. Chapman & Hall, New York.
- Sikora R. 1993. *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. WE, Warszawa.
- Sikora R. (red.) 2006. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- Smorawiński A. 1989. *Technologia wtrysku*. WNT, Warszawa.
- Stączek P. 2004. *Zautomatyzowana metoda diagnozowania i korygowania procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych*. Rozprawa doktorska, Lublin.
- Staniszewski B. 1980. *Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne*. PWN, Warszawa.
- Wiśniewski S., Wiśniewski T. S. 1997. *Wymiana ciepła*. WNT, Warszawa.
- Wunderlich B. 1990. *Thermal Analysis*. Academic Press, Inc. Boston.
- Zawistowski Z., Zięba S. 1995. *Ustawianie procesu wtrysku*. Plastech, Warszawa.

THE APPLICATION OF THE PRESSURE-SPECIFIC VOLUME-TEMPERATURE RELATION TO CONTROL OF THE INJECTION MOLDING PROCESS

Summary. There are presented investigations of the application of the pressure-specific volume-temperature relation to holding pressure control during injection of thermoplastics by the use as an example of isotactic polypropylene.

Key words: p-v-T relation, holding pressure control, injection molding process