

## KOMPUTEROWA SYMULACJA PROCESU UPLASTYCZNIANIA POLIMERÓW PODCZAS WTRYSKIWIANIA ■ CZ. 2

# Teoria a praktyka

*Opracowanie modelu symulacyjnego procesu uplastyczniania polimerów podczas wtryskiwania to nie wszystko. Należy go jeszcze sprawdzić doświadczalnie i stwierdzić czy zgodziły się wyniki uzyskane jednym i drugim sposobem.*

### Analiza wyników modelu

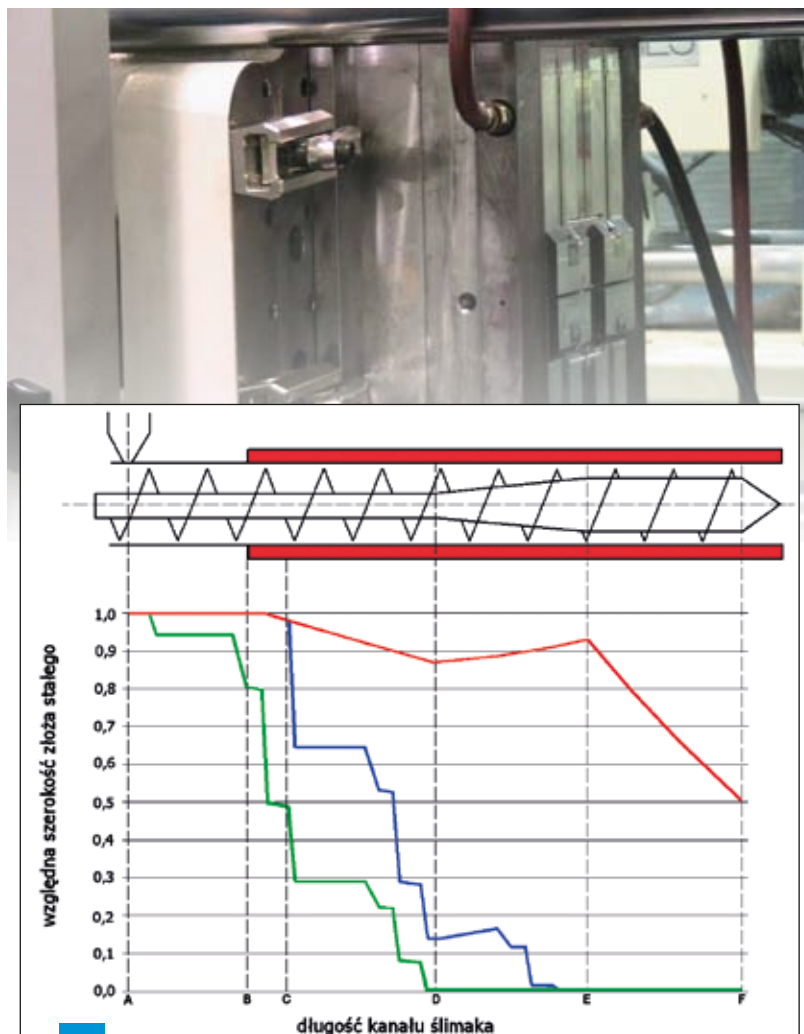
Poniżej zaprezentowane zostaną przykładowe wyniki otrzymane przy zastosowaniu modelu, który posłużył do komputerowej symulacji procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu. Należy raz jeszcze podkreślić, że model ten odnosi się do klasycznego ślimaka trójstrefowego, przy czym długość poszczególnych stref można zmieniać w dowolnych granicach, uzyskując w skrajnych przypadkach ślimak o stałej lub zmiennej głębokości na całej długości kanału, a także dwa różne rodzaje ślimaków dwustrefowych.

Program komputerowy stworzony na podstawie opracowanego modelu matematycznego umożliwia wprowadzenie danych lub wczytanie ich z pliku, przeprowadzenie obliczeń oraz przedstawienie wyników liczbowych wielkości, takich jak profile względnej szerokości złoża stałego, temperatury i ciśnienia, pobór mocy, zużycie energii, moment obrotowy ślimaka, zawartość stopu na końcu ślimaka czy czas rotacji ślimaka, jak również wykresów względnej szerokości złoża stałego, temperatury oraz ciśnienia na długości kanału śli-

maka. Wyniki obliczone przez program można zapisać do pliku lub wydrukować. Istnieje też możliwość załadowania kilku plików z wynikami i porównania odpowiednich charakterystyk na wykresach.

Obliczeń symulacyjnych służących do ilustracji sposobu działania i możliwości programu dokonano na przykładzie symulacji procesu wtryskiwania z zastosowaniem ślimaka trójstrefowego oraz polietylenu dużej gęstości. Wielkości geometryczne ślimaka oraz parametry robocze pracy wtryskarki były identyczne z przedstawionymi na rysunkach 5 oraz 6 (chyba że w opisie zaznaczono inaczej) i charakteryzują one równocześnie wtryskarkę wykorzystaną do badań doświadczalnych. Średnie wartości stałych materiałowych HDPE przedstawiono na rysunku 7 (rys. 5-7 zawarte są w I części artykułu).

Na rysunku 10 przedstawiono względną szerokość złoża stałego odpowiadającą momentowi rozpoczęcia rotacji ślimaka (początek stapienia dynamicznego – krzywa zielona), momentowi zakończenia rotacji (początek stapienia statycznego – krzywa niebieska) oraz ustalonemu wytlaczaniu tzn. sytu-



Rys. 10. Przykładowa zależność względnej szerokości złoża stałego w procesie uplastyczniania HDPE przy wtryskiwaniu (oznaczenia w tekście)

acji, kiedy ślimak o założonej geometrii i parametrach roboczych pracowałby w warunkach charakterystycznych dla wytłaczania (stała rotacja – krzywa czerwona). Liniami przerywanymi zaznaczono położenie granic poszczególnych stref geometrycznych oraz dynamicznych ślimaka w chwili zakończenia jego rotacji. Położenia A, B oraz C oznaczają odpowiednio początek dynamicznych stref trans-

portu tworzywa stałego (położenie leja zasypowego), uplastyczniania wstępnego (początek strefy przejściowej) oraz uplastyczniania właściwego (koniec strefy przejściowej), natomiast D, E i F – odpowiednio położenie końca geometrycznych stref zasilania, sprężania i dozowania.

Z rysunku powyższego widać, że ślimak pracujący w warunkach wytłaczania (krzywa

czzerwona) byłyby na końcu prawie w połowie wypełniony tworzywem stałym. Obecność fazy stapania statycznego powoduje jednak na tyle znaczne zmniejszenie zawartości tworzywa stałego, że stan po fazie stapania dynamicznego (krzywa niebieska) charakteryzuje się o wiele większym stopniem uplastycznienia w porównaniu ze stanem ustalonym.

Widoczny wzrost wypełnienia kanału ślimaka tworzywem stałym pomimo postępującego uplastycznienia, który występuje w geometrycznej strefie sprężania ślimaka (obszar pomiędzy prostymi D oraz E) spowodowany jest tym, iż ubytek objętości fazy stałej, wywołany uplastycznieniem, jest wolniejszy od zmniejszania się objętości kanału.

Zwraca ponadto uwagę dość złożony profil szerokości złoza przed i po okresie stapania statycznego, w porównaniu do niemal gładkiego profilu opisującego stan ustalony. Jest to obraz „historii” przesuwania się złoza stałego przez ogrzewaną część cylindra wtryskarki. Złoże to tworzą partie tworzywa pochodzące z kilku kolejnych cykli wtryskowych. W wyniku ruchu posuwisto-zwrotnego ślimaka część wprowadzonego tworzywa stapania jest statycznie tylko w czasie  $t_d$ , a inna – w czasie  $(t_d + t_w)$ . Partie wcześniejsze stapanie są statycznie w czasach odpowiednio dłuższych. Ponadto wszystkie partie podlegają stapaniu dynamicznemu w czasie rotacji ślimaka zależnym od warunków procesu.

Na rysunku 11 przedstawiono profil temperatury tuż po okresie stapania dynamicznego, czyli chwili tuż po zakończeniu obrotów ślimaka.

Widoczny nieznaczny wzrost temperatury jest typowy dla zwykle stosowanych parametrów roboczych i ślimaka o niewielkiej

średnicy. Profil temperatury w strefie przejściowej ma charakter paraboliczny.

Na rysunku 12 przedstawiono profil ciśnienia odpowiadający momentowi zakończenia obrotów ślimaka. Oznaczenia A-F są analogiczne jak na rysunku 10.

Wykładniczy wzrost ciśnienia widoczny szczególnie pod koniec strefy transportu tworzywa stałego jest zgodny z wynikami badań doświadczalnych. W strefie przejściowej (pomiędzy położeniami B oraz C) widoczne jest wyhamowanie trendu wykładniczego narastania ciśnienia. Strefa stapania charakteryzuje się liniowym narastaniem ciśnienia, występujące maksimum ma miejsce pod koniec geometrycznej strefy sprężania, a występujący w końcowej części kanału ślimaka liniowy, ujemny gradient ciśnienia przyjmuje taką wartość, aby ciśnienie na końcu ślimaka (położenie F) było równe założonemu ciśnieniu uplastycznienia. Taki przebieg zmian ciśnienia wynika z charakterystyki geometrycznej ślimaka oraz warunków technologicznych procesu.

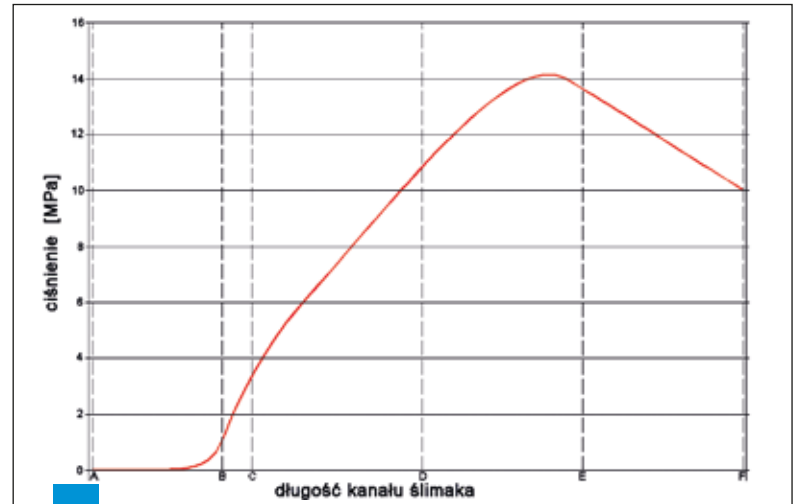
Generowane są również wyniki liczbowe innych wielkości wyjściowych. Oprócz wyników liczbowych profili względnej szerokości złoza stałego, temperatury oraz ciśnienia, dostępne są także wartości wielkości wyjściowych, takich jak maksymalna temperatura stopu, pobór mocy przez ślimak, wydatek masowy uplastycznionego tworzywa, czas rotacji ślimaka i inne (rys. 13).

W dalszej kolejności przedstawione zostaną wyniki modelowania wpływu niektórych parametrów roboczych procesu wtryskiwania oraz wymiarów geometrycznych ślimaka na kształtowanie się różnych charakterystyk pracy wtryskarki.

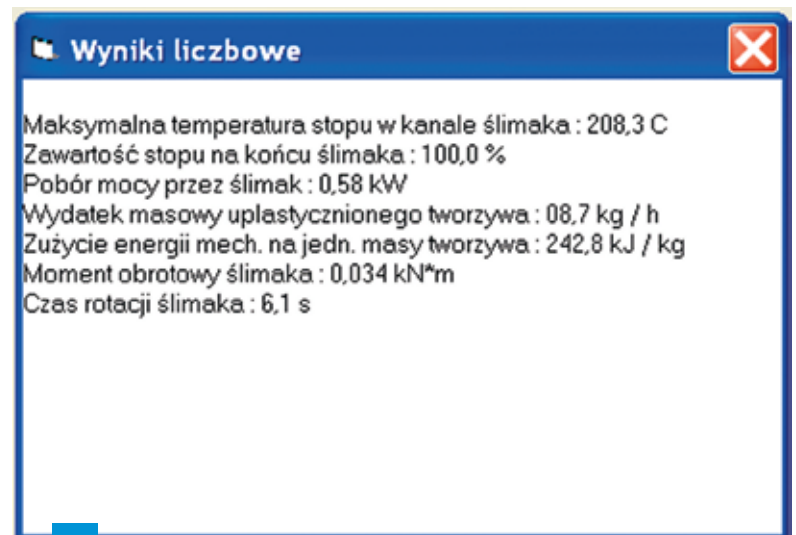
Na rys. 14, gdzie przedstawiono wpływ prędkości obrotowej ślimaka na szybkość uplastycznia-



Rys. 11. Przykładowy profil temperatury w procesie uplastycznienia HDPE przy wtryskiwaniu



Rys. 12. Profil ciśnienia w procesie uplastycznienia przy wtryskiwaniu (oznaczenia w tekście)

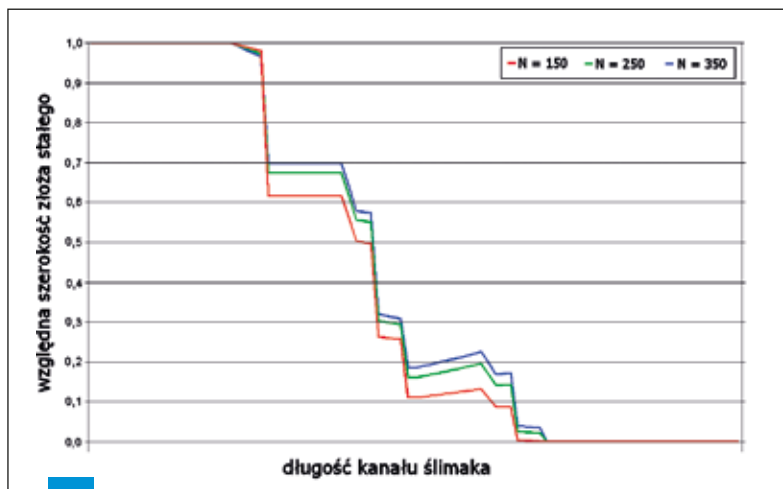


Rys. 13. Pozostałe charakterystyki wyjściowe procesu uplastycznienia

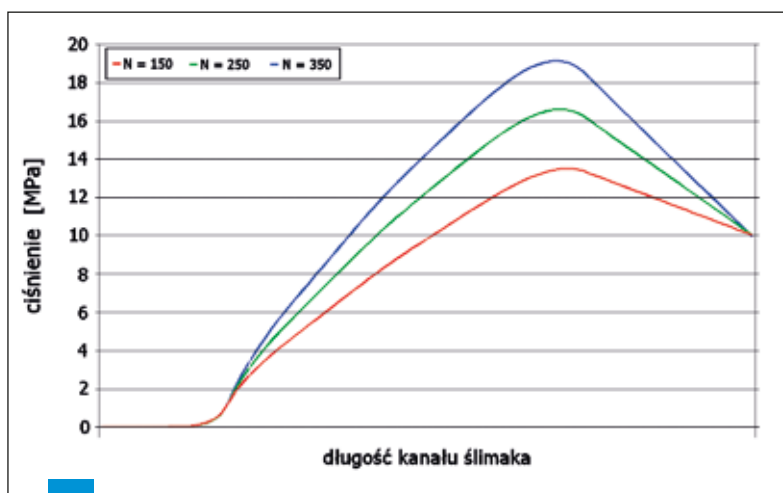
nia, zaobserwować można wzrost względnej szerokości złoza stałego tuż po zakończeniu rotacji ślimaka wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej ślimaka. Wytlumaczyć to można faktem, iż

zwiększeniu prędkości obrotowej towarzyszy skrócenie czasu stapania dynamicznego (przy stałym ciśnieniu uplastycznienia).

Na rysunku 15 przedstawiono wpływ prędkości obrotowej śli-



Rys. 14. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka  $N$  na profil względnej szerokości złoza stałego tuż po zakończeniu rotacji ślimaka (prędkości obrotowe  $N$  podano w obr/min)



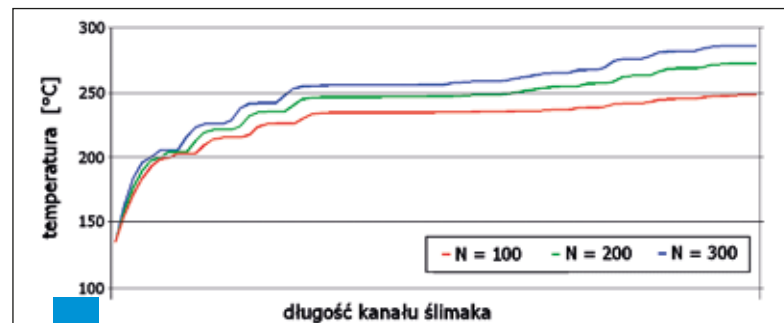
Rys. 15. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka  $N$  na profil ciśnienia na długości kanału tuż przed zakończeniem rotacji ślimaka (prędkości obrotowe  $N$  podano w obr/min)

maka na kształtowanie się profilu ciśnienia. Zwiększanie prędkości obrotowej w przyjętym zakresie prowadzi do wzrostu ciśnienia stopu na skutek wzrostu intensywności przepływu, bez istotniejszych zmian jakościowych w przebiegu samego profilu. Należy zwrócić uwagę, że odpowiednio mała wartość prędkości obrotowej ślimaka mogłoby spowodować, że obserwowane maksimum ciśnienia może w ogóle nie wystąpić.

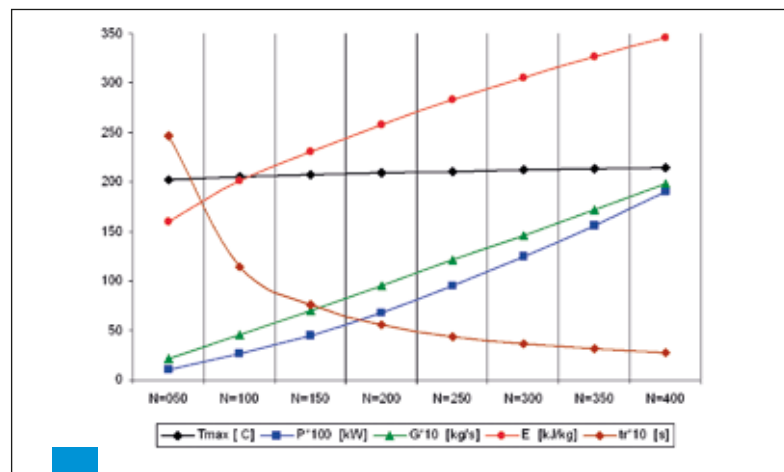
Na rysunku 16 zaprezentowany został wpływ szybkości rotacji ślimaka na temperaturę stopionego tworzywa wyznaczoną dla ślimaka o większej średnicy ( $D = 60$  mm) i w warunkach in-

nych niż wcześniej założone ( $H_z = 12$  mm,  $H_z/H_d = 3$ ,  $N_5 = 4$ ,  $T_b = 200^\circ\text{C}$ ,  $t_w = 3$  s,  $p_p = 20$  MPa,  $N_4 = 3$ ,  $m_0 = 50$  000). Wyraźnie widoczny duży wzrost temperatury stopu spowodowany jest przede wszystkim większym stopniem sprężania, dużym skokiem ślimaka przy wtrysku oraz wysokim ciśnieniem uplastycznienia, czyli ogólnie mówiąc wzrostem intensywności warunków przepływu.

Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na kształtowanie się innych charakterystyk procesu przedstawiono na rysunku 17. Przebieg zmian zaprezentowanych powyżej charakterystyk jest zgodny z oczekiwaniami. Zaob-



Rys. 16. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka  $N$  na profil temperatury na długości kanału tuż po zakończeniu rotacji ślimaka (prędkości obrotowe  $N$  podano w obr/min, średnia temp. cylindra  $T_b = 200^\circ\text{C}$ )



Rys. 17. Wpływ prędkości obrotowej  $N$  ślimaka na kształtowanie się różnych charakterystyk procesu (prędkości obrotowe  $N$  podano w obr/min, oznaczenia w legendzie:  $T_{max}$  – maksymalna temperatura uplastycznionego tworzywa w kanale ślimaka,  $P$  – pobór mocy przez ślimak,  $G$  – wydatek masowy stopionego tworzywa,  $E$  – zużycie energii mechanicznej na jednostkę masy tworzywa,  $t_r$  – czas rotacji ślimaka)

serwować można wzrost mocy, wydatku masowego stopu oraz energii, asymptotyczny spadek czasu rotacji oraz niewielki wzrost maksymalnej temperatury stopu.

Na rysunku 18 przedstawiono wpływ czasu  $t_w$  wystoju ślimaka w położeniu tylnym (czasu chłodzenia wyrobu w formie) na profil względnej szerokości złoza tuż po zakończeniu rotacji ślimaka. Wyraźnie widoczny jest wpływ fazy stapiania statycznego na szybkość uplastycznienia materiału objawiający się wzrostem szerokości złoza ze skróceniem czasu chłodzenia.

Rysunek 19 przedstawia zależność względnej szerokości złoza stałego od skoku ślimaka pod-

czas wtrysku. Ma tu miejsce spodziewany wzrost stopnia uplastycznienia tworzywa w przypadku zmniejszania skoku ślimaka, tzn. przy mniejszej objętości dozowania kanał ślimaka jest w mniejszym stopniu wypełniony tworzywem stałym.

Charakterystyki wyznaczone przez model oraz kierunek ich zmian związanych ze zmianami warunków pracy lub geometrii ślimaka można uznać za jakościowo poprawne. Szybkości zmian względnej szerokości złoza stałego, jak również zmiany profilu ciśnienia są zgodne z obserwowanymi w rzeczywistości przebiegami tych charakterystyk. Zastanawiać może niewielki

wzrost temperatury, której przebieg przedstawiono na rysunku 11. Należy jednak pamiętać, że do obliczeń modelowych przyjęto pewną średnią temperaturę cylindra, stąd przebiegi temperatur wyznaczone z modelu dla typowych warunków przetwórstwa będą miały najczęściej charakterystykę płaską, wykazując bardzo niewielki, rzędu kilku stopni, monotoniczny wzrost. W rzeczywistości, uwzględniając dość znaczne zróżnicowanie temperatur kolejnych stref grzejnych, funkcja ta może wykazywać nieco większą szybkość narastania.

Podsumowując, model komputerowy poprawnie reaguje na zmiany charakterystyk wejściowych, co przejawia się poprawną zmianą dynamiki procesu, natomiast ilościowa ocena tych zmian zostanie zaprezentowana poniżej.

## Doświadczalna weryfikacja modelu

W części tej przedstawiona zostanie doświadczalna weryfikacja komputerowego modelu uplastyczniania ślimakowego w procesie wtryskiwania. Ważniejsze wielkości wyjściowe, którymi są profile względnej szerokości złoza stałego, temperatury oraz ciśnienia, jak również wartości poboru mocy przez układ uplastyczniający, masowego natężenia przepływu uplastycznionego materiału i czasu rotacji ślimaka są wielkościami, które można zmierzyć i w ten sposób określić poprawność oraz dokładność pracy modelu symulacyjnego.

Określenie profilu względnej szerokości złoza stałego związane jest ze znacznymi trudnościami technicznymi, gdyż wymaga bardzo szybkiego, częściowego wysunięcia ślimaka z cylindra oraz bezpośredniego pomiaru szerokości złoza stałego. Wyznaczenie profili temperatury i ciśnienia wymaga zainstalowania w cylindrze wtryskarki dodatkowego oprzyrządowania, takiego jak czujniki ciśnie-

nia oraz temperatury. Pomiaru mocy zużywanej przez ślimak w trakcie procesu uplastyczniania oraz momentu obrotowego można za pomocą odpowiednich mierników sprzężonych bezpośrednio z układem napędowym ślimaka. Określenie sprawności energetycznej procesu umożliwia pomiar mocy elektrycznej pobieranej przez silnik i grzałki. Generalnie, opisane powyżej pomiary muszą być przeprowadzone na specjalnie stworzonym stanowisku pomiarowym, w którym głównym elementem jest odpowiednio oprzyrządowana jednostka uplastyczniająca wtryskarki.

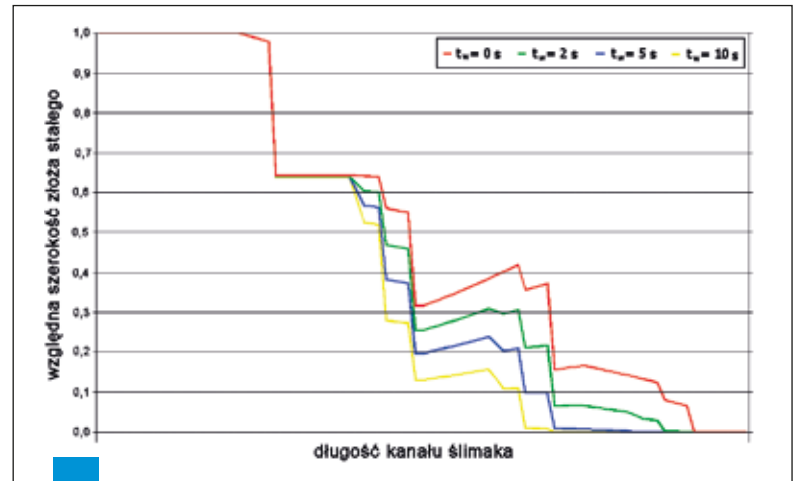
Autorzy nie dysponowali taką jednostką. Pomimo wysiłków nie uzyskano również żadnych informacji o istnieniu takiego oprzyrządowania w kraju lub zagranicą. W związku z tym jedyną wielkością, którą można było zmierzyć i w prosty sposób pośrednio określić poprawność i dokładność modelu, był czas rotacji cofającego się ślimaka. Należy pamiętać, że wielkości wyjściowe omawianego procesu są wzajemnie powiązane, zatem pomiar jednej z nich, z racji wzajemnego ich sprzężenia, może dostarczyć wymiernych informacji o jakościowym i ilościowym przebiegu procesu.

## Stanowisko badawcze

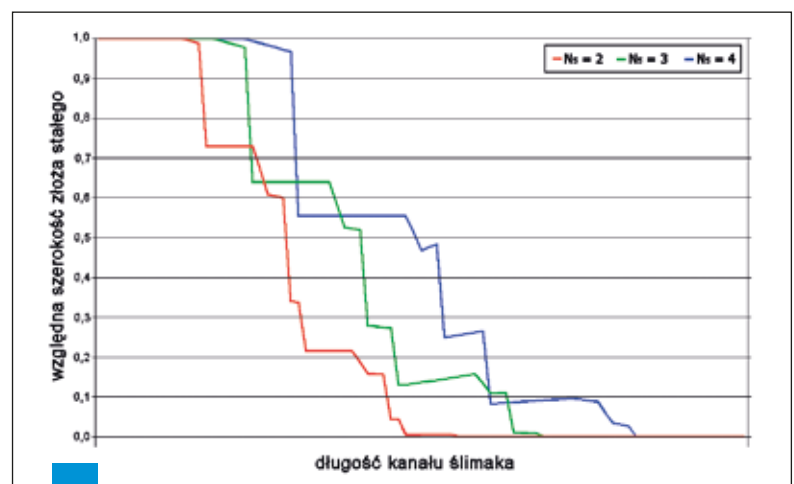
Pomiarów czasu rotacji ślimaka dokonano na wtryskarce Arburg 221M Allrounder 250-55, przedstawionej na rysunku 20. Najważniejsze parametry geometryczne ślimaka i wtryskarki przedstawiono na rysunku 5 oraz 6. Pomiar czasu rotacji przeprowadzany był poprzez jego odczyt z wyświetlacza szafy sterującej.

## Plan badań

Weryfikacja zaproponowanego modelu symulacyjnego procesu uplastyczniania ślimakowego



Rys. 18. Wpływ czasu  $t_w$  wystojenia ślimaka na profil względnej szerokości złoza stałego tuż po zakończeniu rotacji ślimaka (czas  $t_w$  podano w sekundach)



Rys. 19. Wpływ skoku ślimaka przy wtrysku  $N_s$  na profil względnej szerokości złoza stałego tuż po zakończeniu rotacji ślimaka ( $N_s$  podano w liczbie zwojów)



Rys. 20. Stanowisko pomiarowe

przy wtryskiwaniu dokonana została poprzez pomiar czasu ruchu obrotowego cofającego się ślimaka (czasu dozowania) podczas procesu wtryskiwania różnych termoplastów: LDPE, HDPE, PP,

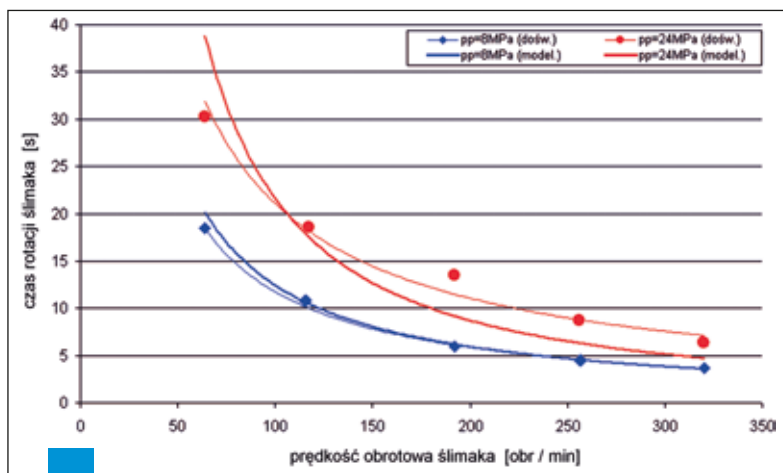
PS, PA6 oraz POM. Pomiarów czasu rotacji dokonano po ustaleniu się kwazirównowagi procesu, tzn. gdy po kilku cyklach wtryskowych mierzonych od momentu rozpoczęcia wtryskiwania war-

**Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne wybranych tworzyw**

| TWORZYWO<br>WŁAŚCIWOŚĆ           | LDPE | HDPE | PP   | PS   | HIPS | PVC  | PC   | PMMA | POM  | PA6  | SAN  | ABS  |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T_m$<br>[°C]                    | 115  | 135  | 165  | 130  | 130  | 135  | 230  | 160  | 180  | 215  | 130  | 130  |
| $f_c$                            | 0,40 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,50 | 0,30 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| $f_s$                            | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,45 | 0,40 | 0,35 | 0,45 | 0,20 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| $\rho_0$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 550  | 550  | 550  | 600  | 600  | 600  | 650  | 650  | 700  | 650  | 600  | 600  |
| $\rho_s$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 915  | 955  | 905  | 1055 | 1055 | 1275 | 1240 | 1200 | 1410 | 1150 | 1080 | 1040 |
| $\rho_m$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 780  | 780  | 750  | 955  | 955  | 1100 | 850  | 1100 | 1100 | 950  | 950  | 950  |
| $k_s$<br>[J/(m s deg)]           | 0,34 | 0,42 | 0,19 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,19 | 0,15 | 0,29 | 0,35 | 0,16 | 0,18 |
| $k_m$<br>[J / (m s deg)]         | 0,25 | 0,26 | 0,21 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,26 | 0,19 | 0,35 | 0,21 | 0,20 | 0,25 |
| $\lambda$<br>[kJ/kg]             | 138  | 245  | 234  | -    | -    | 20   | -    | -    | 236  | 230  | -    | -    |
| $c_s$<br>[kJ/(kg deg)]           | 2,4  | 2,7  | 2,0  | 1,3  | 1,3  | 1,0  | 1,4  | 1,4  | 1,5  | 1,8  | 1,1  | 0,9  |
| $c_m$<br>[kJ/(kg deg)]           | 2,4  | 3,3  | 2,5  | 2,2  | 2,0  | 1,9  | 2,2  | 2,3  | 2,3  | 2,8  | 2,1  | 2,2  |

**Tabela 2. Wielkości reologiczne wyznaczone doświadczalnie dla badanych polimerów**

| POLIMER | $T_m$<br>[°C] | $m_0$<br>[Pa*s <sup>n</sup> ] | n     | a<br>[deg <sup>-1</sup> ] |
|---------|---------------|-------------------------------|-------|---------------------------|
| LDPE    | 110           | 137700                        | 0,275 | 0,015                     |
| HDPE    | 135           | 19490                         | 0,476 | 0,019                     |
| PP      | 165           | 9940                          | 0,443 | 0,010                     |
| PS      | 130           | 696000                        | 0,267 | 0,038                     |
| POM     | 180           | 17700                         | 0,723 | 0,010                     |
| PA6     | 220           | 3800                          | 0,650 | 0,038                     |



Rys. 21. Porównanie czasów rotacji dla PP

tości czasów rotacji ustaliły się, nie różniąc się od siebie więcej niż o kilka procent.

Nastawiane parametry robocze podczas pomiarów obejmowały:

- temperatury poszczególnych

stref grzejnych układu uplastyczniającego wtryskarki (typowe dla danego polimeru),

- czas wystoju w położeniu tylnym  $t_w$  (czas chłodzenia),
- czas docisku  $t_d$ ,

- ciśnienie uplastyczniania  $p_p$  (dwie wartości, 8 i 24 MPa),
- szybkość obrotową N ślimaka wtryskowego (pięć wartości: 64, 128, 192, 256 i 320 obr/min).

Średnia temperatura cylindra wyznaczona była jako średnia temperatur wszystkich pięciu stref grzejnych, natomiast skok ślimaka przy wtrysku limitowany był objętością detalu w formie i wynosił 19 cm<sup>3</sup>. Stała jest również odległość początku strefy grzejnej od zasobnika, wynosząca (w ilościach zwojów)  $N_4 = 4$ .

Omawiając wcześniej model stwierdzono, że wymaga on wprowadzenia dosyć szerokiej charakterystyki materiałowej obejmującej w szczególności dane fizykochemiczne (m.in. temperaturę płynięcia, gęstości i właściwości cieplne polimeru w stanie stałym i stopionym) oraz dane reologiczne opisujące zależność lepkości stopu od warunków przepływu. Można przyjąć, że wymienione właściwości fizykochemiczne zależą głównie od charakteru struktury fizycznej i chemicznej polimeru, podczas gdy na właściwości reologiczne znaczny wpływ wywierają na-

wet niewielkie różnice w wielkości średniego ciężaru cząsteczkowego polimeru i jego rozkładu. Z tego też względu charakterystyka reologiczna, w przeciwieństwie do fizykochemicznej, może podlegać znacznym wahaniom nawet dla różnych gatunków jednego rodzaju polimeru. W tej sytuacji zdecydowano, że dane fizykochemiczne dla różnych termoplastów wykorzystywane w obliczeniach stanowiąc będą uśrednione wartości pobrane z różnych pozycji literaturowych, podczas gdy charakterystyka reologiczna oparta zostanie na bezpośrednich pomiarach lepkości polimerów stosowanych w badaniach doświadczalnych. Wobec powyższego, przed dokonaniem odpowiednich obliczeń symulacyjnych, przeprowadzono pomiary lepkości w różnych temperaturach tworzyw użytych do doświadczalnej weryfikacji modelu, wyznaczając z nich stałe  $m_0$  oraz n, jak również współczynnik temperaturowy lepkości a, po czym wprowadzono je jako dane wejściowe do modelu symulacyjnego.

## Porównanie wyników symulacji i doświadczeń

W celu oceny przydatności zaproponowanego modelu do symulacji procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu zmierzono czasy rotacji cofającego się ślimaka przy określonych parametrach pracy wtryskarki i porównano je z czasami rotacji wyznaczonymi przez model symulacyjny. Poniżej przedstawiono rezultaty badań dla trzech wybranych polimerów z sześciu, dla których przeprowadzono doświadczenia. Wybrano wyniki, które najlepiej oddają rzeczywiste warunki pracy wtryskarki oraz te, w których błąd był największy, jak również wyniki, które w pewien specyficzny sposób potwierdziły prawidłowość zachowania się modelu. Pominęto wyniki, które cha-

rakteryzowały się średnim błędem, a przy przebiegach jakościowych podobnych do przedstawionych poniżej nie wносиłyby niczego nowego do analizy modelu symulacyjnego.

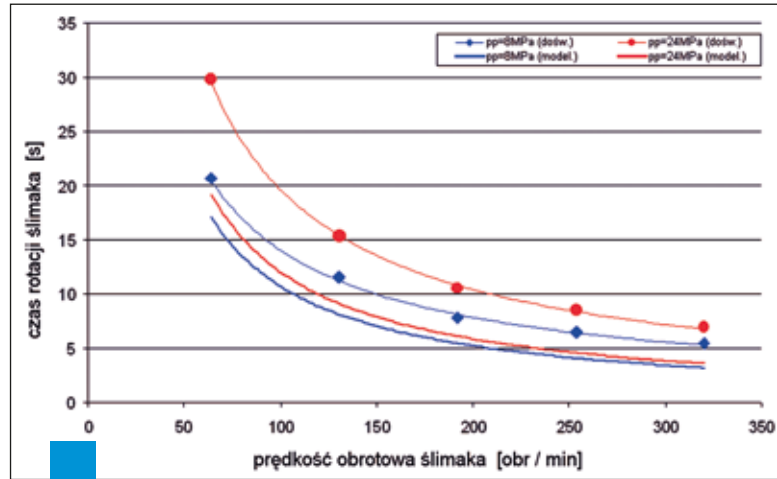
Na rysunku 21 zaprezentowano porównanie czasów rotacji wyznaczonych z modelu oraz doświadczalnie dla PP.

Zaobserwować można bardzo dobrą zgodność obu czasów, przy czym dla ciśnienia uplastyczniania równego 8 MPa zgodność jest idealna, natomiast dla  $p_p$  równego 24 MPa różnice przy skrajnych wielkościach prędkości obrotowych sięgają 25%, przy czym czasy rotacji wyznaczone z modelu są większe od rzeczywistych dla mniejszych prędkości obrotowych, natomiast dla prędkości dużych występuje sytuacja odwrotna.

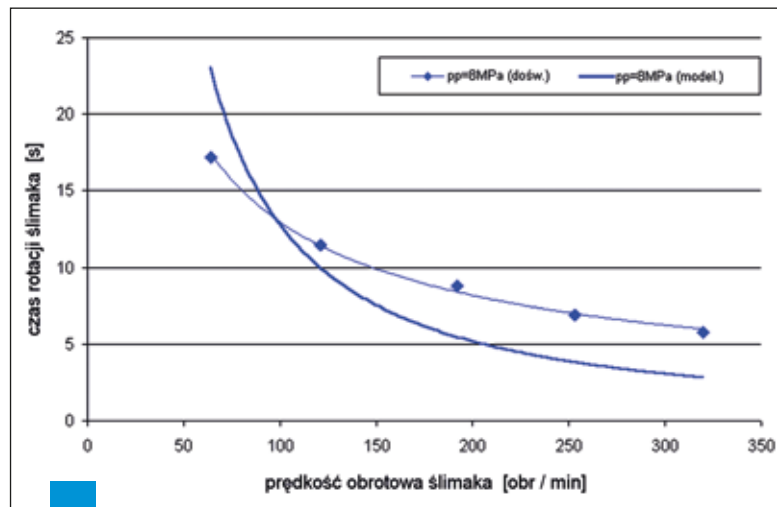
Rysunek 22 przedstawia porównanie czasów rotacji dla PS. W tym przypadku różnice czasów wyznaczonych oraz zmierzonych doświadczalnie są największe dla wszystkich badanych polimerów i dla  $p_p$  równego 24 MPa oraz dużych szybkości obrotowych sięgają 50%. Dla ciśnienia uplastyczniania równego 8 MPa widoczne jest przesunięcie krzywej teoretycznej o mniej więcej stałą wartość równą ok. 3 s w kierunku wartości mniejszych.

Na rysunku 23 przedstawiono porównanie czasów rotacji dla PA6. Zauważyć tu można przecięnię się krzywych gdzieś w zakresie mniejszych prędkości obrotowych, a różnice w przypadku dużych prędkości nie przekraczają 50%.

Z przyczyn technologicznych zbadano zachowanie się tworzywa tylko przy ciśnieniu uplastyczniania równym 8 MPa. Dla  $p_p$  równego 24 MPa stwierdzono doświadczalnie, że osiągnięcie założonego ciśnienia uplastyczniania jest niemożliwe niezależnie od stosowanych prędkości obrotowych ślimaka (czas rotacji



Rys. 22. Porównanie czasów rotacji dla PS



Rys. 23. Porównanie czasów rotacji dla PA6

ślimaka wydłużał się do nieskończoności).

Co ciekawe, model komputerowy również nie był w stanie zakończyć obliczeń dla ciśnienia uplastyczniania równego 24 MPa, symulując ciągły ruch obrotowy ślimaka ( $t_r \rightarrow \infty$ ) w momencie osiągnięcia na jego końcu wartości ciśnienia ok. 15 MPa, potwierdzając rzeczywiste zachowanie się układu uplastyczniającego wtryskarki.

## Podsumowanie

Na podstawie powyższych faktów stwierdzić można ogólnie dobrą zgodność pomiędzy wynikami doświadczalnymi a symulacjami modelowymi. Obserwowane różnice ilościowo nie przekraczają średnio 25% przy dobrej zgodności jakościowej wyrażają-

cej kształt i przebieg teoretycznych i doświadczalnych charakterystyk dla różnych tworzyw. Obserwowane różnice ilościowe tłumaczyć można koniecznymi uproszczeniami niektórych założeń modelu symulacyjnego. Do podstawowych tego typu założeń upraszczających zliczyć można:

- Przyjęcie stałej prędkości U ruchu wstecznego wycofującego się ślimaka. Jak wiadomo, w rzeczywistości prędkość ta ulega zmianie w zależności od zmieniającej się w trakcie ruchu obrotowego względnej szerokości złoza stałego.
- Obliczanie profili ciśnienia oraz temperatury na podstawie względnej szerokości złoza stałego wyznaczonej w momencie tuż po zakończeniu

rotacji ślimaka. Moment ten odpowiada jednemu z dwóch stanów cyklu wtryskowego, z którym związane są pewne chwilowe wartości charakterystyk procesu uplastyczniania. W rzeczywistości wiele charakterystyk procesu (w tym np. pobór mocy czy czas rotacji ślimaka) stanowi wypadkową (średnią całkową) wszystkich stanów chwilowych położonych między obydwoma stanami skrajnymi i stąd mogą różnić się od wartości wynikających z symulacji.

- W symulacji wykorzystywano, jako model stopionego polimeru, model cieczy lepkiej. Być może lepsze efekty dałoby wprowadzenie do programu modelu lepkosprężystego, co wiązałoby się jednak ze znacznym skomplikowaniem programu bez gwarancji sukcesu, gdyż modelowanie przepływu cieczy lepkosprężystych w procesach transportu ślimakowego ma dotychczas charakter bardzo ograniczony.

- Do obliczeń przyjęto stałą, średnią temperaturę cylindra  $T_b$  oraz średnie wartości współczynników charakteryzujących właściwości stałych i stopionych tworzyw. W rzeczywistości, zmienna temperatura cylindra na jego długości oraz zależność parametrów materiałowych od ciśnienia i temperatury może prowadzić do pewnych różnic pomiędzy wartościami wielkości wyjściowych obliczanych przy zmiennych i stałych wielkościach tych parametrów.

Jacek Iwko,  
Ryszard Steller  
Politechnika Wrocławska