

Jacek IWKO ¹⁾, R. STELLER ²⁾, R. WRÓBLEWSKI ¹⁾

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Odlewnictwa, Tworzyw Sztucznych i Automatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; email: jacek.iwko@pwr.edu.pl

²⁾ Wydziałowy Zakład Inżynierii i Technologii Polimerów, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Doświadczalna weryfikacja komputerowego modelu procesu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu. Część 1. Stanowisko badawcze

Streszczenie. Przedstawiony artykuł dotyczy komputerowego modelowania procesu uplastyczniania polimerów w procesie wtryskiwania. Kilka lat temu stworzono pełną wersję modelu matematycznego tego procesu. Na bazie modelu matematycznego stworzony został program komputerowy, a na jego podstawie wykonane zostały symulacje procesu wtryskiwania, obrazujące wpływ warunków technologicznych procesu i geometrii ślimaka na przebieg procesu uplastyczniania polimerów. W dalszej kolejności należy przeprowadzić badania doświadczalne, oceniające model teoretyczny z punktu widzenia jego dokładności i przydatności. Ważne wielkości wyjściowe, którymi są profile temperatury oraz ciśnienia, jak również pobór mocy przez układ uplastyczniający, moment obrotowy ślimaka i czas rotacji ślimaka są wielkościami, które można zmierzyć i w ten sposób określić poprawność oraz dokładność pracy modelu symulacyjnego. Pomiary te powinny się odbyć na specjalnie do tego celu stworzonym stanowisku pomiarowym, złożonym z odpowiednio oprzyrządowanej wtryskarki, połączonej z rejestratorem zapisującym wszystkie dane pomiarowe odczytywane z zamontowanych we wtryskarce czujników i elementów pomiarowych. Celem niniejszego artykułu jest omówienie wykonanego stanowiska pomiarowego oraz analiza wyników wstępnych badań doświadczalnych przeprowadzonych z wykorzystaniem tego stanowiska.

Słowa kluczowe: polimery, wtryskiwanie, model matematyczny, uplastycznianie, symulacja

EXPERIMENTAL VALIDATION OF A COMPUTER MODEL OF POLYMER PLASTICIZING IN INJECTION MOLDING PROCESS. 1 TESTING POSITION

Abstract. The article presents study on computer modeling of polymer plasticizing in injection molding. Several years ago, the complete version of the mathematical model of this process had been created. According to the mathematical model, a computer program was developed. Based on the computer program, simulation studies of injection molding process, showing the impact of the technological process and the geometry of the screw on the process of polymers plasticizing, have been made. In a further step, there is need to perform experimental research, evaluating the theoretical model in terms of its accuracy and usefulness. Important output quantities, which are profiles of temperature and pressure, as well as the power consumption of the plasticizing system, the torque of the screw and the screw rotation time can be measured and thus determine the correctness and accuracy of the simulation model. These measurements should be done on a specially designed measuring position, consisting of a suitably instrumented injection machine, connected with a recording system, which saves all measurement data read from the injection molding machine. The aim of this article is discuss of such position and analysis of results of preliminary experimental research made on this position.

Keywords: polymers, injection molding, mathematical model, plastication, simulation

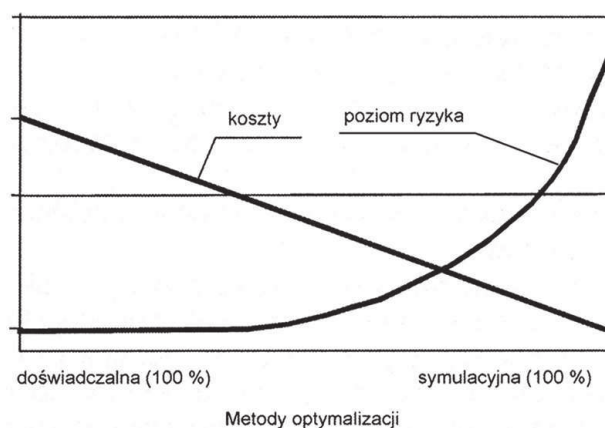
Wstęp

Jednym z czynników wpływających na obniżenie kosztów wytwarzania jest właściwy wybór konstrukcji maszyn i oprzyrządowania oraz warunków przetwarzania. Dotyczy to też metod przetwórczych opartych na procesach transportu ślimakowego, w tym zwłaszcza procesach wytłaczania oraz wtryskiwania ślimakowego, które pod względem ilości przerabianych tworzyw są liderami wśród wszystkich metod przetwórstwa tworzyw polimerowych. Zarówno wytłaczanie, jak i wtryskiwanie obejmują dwa etapy, tj. uplastycznianie oraz właściwe formowanie, które mają decydujący wpływ na jakość oraz koszty wytwarzania wyrobów. Podstawowym zadaniem uplastyczniania jest otrzymanie z dużą wydajnością i przy małym nakładzie energii tworzywa w postaci stopionej o dużej jednorodności materiałowej i termicznej.

W przypadku wytłaczania, procesu ciągłego, uplastycznianie przebiega w warunkach równowagi dynamicznej. W przypadku cyklicznego procesu wtryskiwania uplastycznianie zachodzi w warunkach nierównowagi dynamicznej. Oznacza to, że w trakcie jednego cyklu wtryskowego parametry procesu podlegają zmianom w czasie, abstrahując od możliwych fluktuacji o charakterze losowym, które mogą także występować podczas wytłaczania [1].

Różnice w przebiegu procesu uplastyczniania przy wytłaczaniu i wtryskiwaniu znajdują swoje odbicie w odmiennej geometrii układów uplastyczniających, zwłaszcza ślimaków, w wytłaczarkach i wtryskarkach. Przy optymalizacji geometrii tych układów wykorzystywano przez długi czas jedynie duże doświadczenie i intuicję konstruktorów oraz technologów. W ostatnich latach coraz większe znaczenie ma podejście teoretyczne związa-

ne z tworzeniem matematycznych modeli procesu uplastycznienia w oparciu o prawa zachowania masy, pędu i energii oraz o znajomość charakterystyki fizykochemicznej przetwarzanego materiału. Modele te wiążą podstawowe wskaźniki uplastycznienia danego tworzywa, np. wydajność, rozkład temperatury i ciśnienia stopu, z geometrią układu uplastyczniającego i parametrami roboczymi, np. obrotami ślimaka, rozkładem temperatur cylindra, umożliwiając tym samym optymalizację rozwiązań konstrukcyjnych. Należy zaznaczyć, że podejście empiryczne i teoretyczne wzajemnie się inspirują i uzupełniają. Jak widać z rys. 1, modelowa symulacja procesu obniża koszty optymalizacji zwiększając równocześnie ryzyko błędu wskutek istniejących nadal niedoskonałości modeli symulacyjnych. Odwrotne tendencje występują przy podejściu doświadczalnym [2].



Rys. 1. Poglądowa zależność kosztów optymalizacji oraz ryzyka konstrukcyjnego ślimaka wytłaczarskiego od zastosowanej metody optymalizacji [2]

Teoretyczne podejście do uplastycznienia tworzywa poprzez tworzenie komputerowych modeli symulacyjnych tego procesu jest dość szeroko stosowane w przypadku wytłaczania. W literaturze znaleźć można szereg modeli opisujących proces uplastycznienia polimerów przy wytłaczaniu [3-8], które wykorzystują zwykle podobne zasady modelowania różniąc się wieloma założeniami szczegółowymi. Modele matematyczne są podstawą co najmniej kilku programów symulacyjnych o znaczeniu komercyjnym. Obecnie dostępne są na rynku m.in. pakiety: EXTRUD, SSD, REX, SSEM, NEXTRUCAD. Jak już wspomniano, mają one bardzo podobne założenia. Wytłaczarka podzielona jest na 3 strefy – strefę transportu tworzywa stałego, stapienia oraz transportu stopu. Model transportu tworzywa stałego opiera się na mechanizmie tarcia suchego. Do opisu procesu stapienia wykorzystuje się najczęściej model Tadmora i jego modyfikacje [3-5,9]. Zakłada on, że stapienie odbywa się w cienkiej warstwie pomiędzy ogrzewanym cylindrem a warstwą tworzywa stałego, a cyrkulujący stop gromadzi się w ka-

nale przy aktywnej stronie zwoju. Przyjmuje się najczęściej płaski kształt kanału ślimaka oraz jedno- bądź dwuwymiarowy przepływ stopu. Umożliwia to w konsekwencji obliczenie podstawowych charakterystyk procesu.

W kraju powstawały także różne prace opisujące zachowanie się układów uplastyczniających przy wytłaczaniu. Już dość dawno opracowany został przez Wilczyńskiego kompleksowy model matematyczny procesu wytłaczania jednoślindakowego [9], którego efektem był oryginalny program komputerowy pozwalający na pełną symulację tego procesu. Z nowszych polskich produktów wyróżnić można pakiet SSEM wydany przez tą samą grupę z Politechniki Warszawskiej [10]. System umożliwia modelowanie klasycznych układów wytłaczania w różnych warunkach technologicznych procesu, w odniesieniu do różnych tworzyw, w tym również układów z zastosowaniem ślimaków niekonwencjonalnych i głowic o złożonej geometrii. Z nowszych polskich prac wyróżnić można również publikacje dotyczące modelowania uplastycznienia w procesie wytłaczania dwuślindakowego, zarówno przeciwbieżnego, jak i współbieżnego [11, 12].

Mimo widocznego rozwoju programów symulacyjnych wytłaczania do niedawna brak było kompleksowego podejścia do tematyki uplastycznienia polimerów przy wtryskiwaniu. Głównej przyczyny tych dysproporcji należy upatrywać w znacznie bardziej skomplikowanej dynamice tego procesu, wynikającej z jego periodycznego (kwaziustalonego) charakteru, co prowadzi w konsekwencji do zwiększenia problemów opisowych oraz interpretacyjnych. Przed wielu laty w kraju powstała praca dotycząca badań doświadczalnych związanych z uplastycznieniem w procesie wtryskiwania [13], czego pokłosiem była bardzo dobrze wyposażona wtryskarka pomiarowa (np. pomiar momentu obrotowego ślimaka, energii elektrycznej oraz rozkładu ciśnienia i temperatury stopu w cylindrze) w nieistniejącym już ośrodku badawczo-rozwojowym Proplast w Poznaniu. Niestety, prowadzone tam prace nie znalazły większego oddźwięku w literaturze. Praca, dotycząca obliczania mocy jednostek napędowych w układach uplastyczniających wytłaczarek i wtryskarek ukazała się kilka lat temu w Niemczech [14]. Potente i współpracownicy przedstawili również podstawy matematyczne do symulacji procesu uplastycznienia polimerów przy wtryskiwaniu [15]. Model ten, zweryfikowany doświadczalnie na różnych stanowiskach przemysłowych, nie analizuje jednak strefy transportu tworzywa stałego i przejściowej. Wyznacza on ponadto temperaturę stopu dla warunków ustalonych, nie uwzględniając niestabilnego charakteru procesu wtryskiwania. Ukazały się również doniesienia o doświadczalnych badaniach szerokości złoza stałego w układach uplastyczniających wtryskarek [16, 17] za pomocą wykonanych w cylindrze „okien”, przez które obserwowano zachowanie się tworzywa w okładzie uplastyczniającym. Jak z powyższego wynika, prace nad stworzeniem adekwatnych modeli symulacyjnych procesu uplastycznienia przy wtryskiwaniu są jeszcze dość dalekie od zakończenia.

Model symulacyjny uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu

Stosunkowo niedawno stworzono pełny model procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu [18÷23], który prawidłowo odzwierciedla dynamikę pracy ślimaka wtryskowego i na podstawie danych wejściowych, obejmujących parametry geometryczne układu uplastyczniającego, parametry robocze pracy wtryskarki oraz parametry materiałowe tworzywa polimerowego, pozwala na przewidywanie wszystkich najważniejszych wielkości wyjściowych procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu w odniesieniu do końcowej fazy rotacji ślimaka, takich jak:

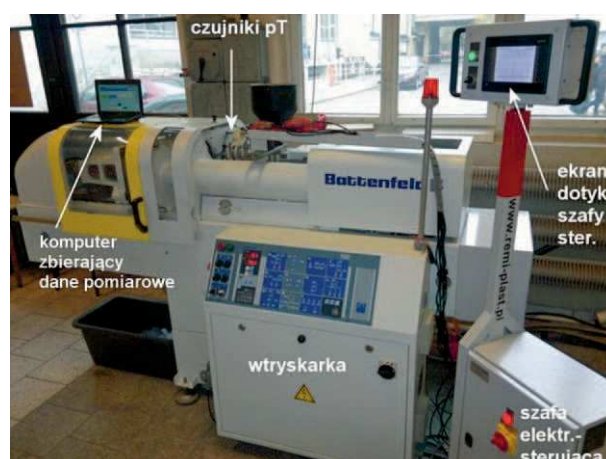
- rozkład względnej szerokości złoża stałego na długości ślimaka,
- rozkład ciśnienia na długości ślimaka,
- rozkład temperatury na długości ślimaka,
- moment obrotowy/pobór mocy ślimaka,
- wydajność masowa procesu uplastyczniania,
- czas rotacji ślimaka.

Opis modelu obejmuje transport materiału stałego począwszy od lejka zasypowego oraz strefę zasilania, a w dalszej kolejności proces stapiania przy obracającym się i nieruchomym ślimaku (tzw. proces stapiania dynamicznego i statycznego) i wreszcie proces transportu stopu. Przy opracowywaniu modelu wykorzystano niektóre, istniejące już rozwiązania związane z opisem transportu masy i ciepła w układzie uplastyczniającym wtryskarki [24÷26]. Wykorzystano też wybrane rozwiązania problemów z istniejących modeli układu uplastyczniającego wytłaczarki [10, 27]. Wiele z opracowanych zagadnień stanowi jednak oryginalne rozwiązania, np. dwuwymiarowy, nieizotermiczny przepływ cieczy potęgowej w kanale ślimaka, różniczkowy bilans masy w złożu stałym oraz przepływu cieczy Ellisa w obszarze stapiania [18, 19, 28, 29].

Stworzony model symulacyjny procesu uplastyczniania ślimakowego przy wtryskiwaniu w zasadzie nie został sprawdzony doświadczalnie. Jego weryfikacja dokonana została w uproszczony sposób jedynie poprzez pomiar czasu ruchu obrotowego cofającego się ślimaka w trakcie procesu wtryskiwania różnych termoplastów. Czas rotacji cofającego się ślimaka jest wielkością dynamiczną, wynikającą z przebiegu całego procesu i będąc wielkością wyjściową, może stanowić w ograniczonym zakresie informację o poprawności wskazań modelu. Jednakże jego podstawowym mankamentem jest brak pełnej weryfikacji, a więc porównania generowanych charakterystyk wyjściowych procesu, wymienionych powyżej, z charakterystykami występującymi w realnej jednostce uplastyczniającej wtryskarki.

Stanowisko badawcze do doświadczalnej weryfikacji modelu matematycznego

W celu dokładnej weryfikacji stworzonego modelu komputerowego wykonano stanowisko badawcze do pomiarów parametrów wyjściowych procesu uplastycznia-



Rys. 2. Wtryskarka wraz z układem pomiarowo-kontrolnym

nia polimerów przy wtryskiwaniu. Stanowisko to, przedstawione na rys. 2, zbudowane jest ogólnie z odpowiednio oprzyrządowanej wtryskarki ślimakowej, połączonej z modulem zbierającym i przetwarzającym dane oraz z komputerem umożliwiającym zapis i wyświetlanie w czasie rzeczywistym zebranych wyników pomiarowych. Stanowisko składa się z:

- wtryskarki ślimakowej Battenfeld Plus 350/70,
- czterech czujników ciśnienia i temperatury (analogowy czujnik CDTAI200-1/2-1500-1-1-1J prod. Bagsik Sp. z o.o., zakres 0-150 MPa, 0-300°C, błąd całk. $\pm 0,5\%$ FS),
- sprzęgła pomiarowego momentu obrotowego (analogowy czujnik DMF2X-250 prod. MEGATRON Elektronik GmbH & Co. KG, zakres 0-250 Nm, błąd całk. $\pm 1\%$ FS),
- czujnika indukcyjnego mierzącego szybkość obrotową ślimaka (czujka indukcyjna E2A-S08KS02-WP-B1 prod. Omron Corp.),
- czujnika przesunięcia liniowego ślimaka (analogowy czujnik LWH 0150 prod. Novotechnik U.S. Inc., zakres 0-150 mm, błąd liniowości $\pm 0,08\%$),
- szafy elektryczno-sterującej wraz z ekranem dotykowym.

Układ uplastyczniający wtryskarki składa się z cylindra i umieszczonego w nim ślimaka, wykonującego ruch postępowy (tłoczny) oraz wsteczno-obrotowy. W cylindrze, w odpowiednich miejscach na jego długości, licząc od zasobnika, zostały wykonane otwory pod czujniki pT. Wykonano łącznie 16 otworów w dwóch liniach, umożliwiając montaż czujników w jednej lub w dwóch liniach na tworzącej cylindra, z zamocowaniem czujników w cylindrze na obu liniach na przemieszczaniu w kształcie litery „V” (rys. 3). Do badań wykorzystuje się cztery czujniki pT, pozostałe otwory w cylindrze wykorzystywane zaślepione zostały śrubami.

Na cylindrze zamontowano grzałki otokowe o budowie umożliwiającej umieszczenie czujników pT w cylindrze. Pomiar momentu obrotowego na ślimaku w trakcie uplastyczniania jest dokonywany za pomocą momento-



Rys. 3. Czujniki pT umieszczone w cylindrze wtryskarki

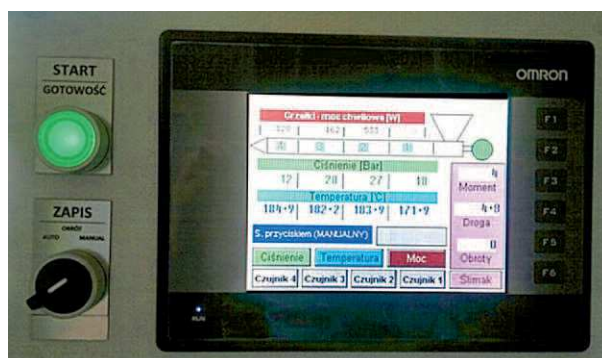


Rys. 4. Momentomierz wbudowany w układzie napędowym wtryskarki

mierza, zamocowanego bezpośrednio w układzie napędowym ślimaka pomiędzy silnikiem a pasem przenoszenia napędu na ślimak (rys. 4). Umieszczono tam również czujnik indukcyjny mierzący rzeczywistą prędkość obrotową ślimaka.

Odpowiedni układ elektryczny mierzy średnią moc zużywaną przez elementy grzejne na cylindrze. W układzie napędowym wtryskarki zamontowano ponadto dodatkowy liniał mierzący precyzyjnie przesunięcie ślimaka (położenie czoła ślimaka).

Układ pomiarowy ma za zadanie zebrać i przetworzyć sygnały wygenerowane przez elementy pomiarowe. Chwilowa wartość każdego z mierzonych parametrów jest wyświetlana na ekranie synoptycznym (wyświetlacz z możliwością dotykowego sterowania – rys. 5) umieszczonym na froncie szafki sterującej bezpośrednio przy wtryskarce. Niezależnie od chwilowego odczytu, układ sterownika (PLC CJ z Ethernetem, dwa moduły AI oraz moduł DI) dokonuje rejestracji i archiwizacji powyższych parametrów. Stworzone oprogramowanie umożliwia dla każdego z parametrów pomiarowych odczyt chwilowy, rejestrację i archiwizowanie oraz przedstawienie na bieżąco na wykresach oraz w sposób liczbowy wartości mierzonych parametrów w funkcji czasu.



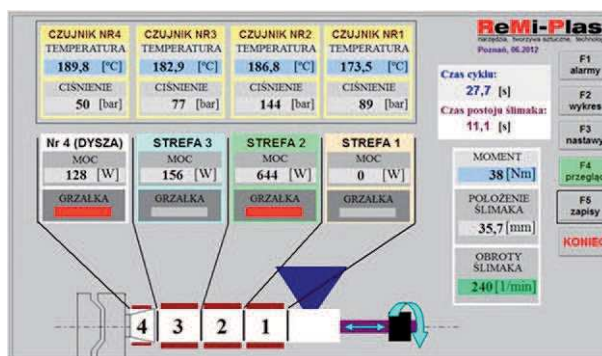
Rys. 5. Synoptyczny ekran kontrolny, umożliwiający podgląd w czasie rzeczywistym najważniejszych parametrów wyjściowych procesu

Otrzymane wyniki są eksportowane do programu MS Excel.

Stworzony układ pomiarowy mierzy temperaturę i ciśnienie wewnątrz cylindra wtryskarki, ponadto rejestruje przesunięcie liniowe i czas rotacji ślimaka, jak również moment obrotowy ślimaka podczas jego ruchu wsteczno-obrotowego oraz moc pobieraną przez grzałki. Poszczególne moduły układu pomiarowego umieszczone są wewnątrz wtryskarki. Mierzone parametry procesu uplastyczniania wyświetlane są w czasie rzeczywistym zarówno na ekranie synoptycznym szafki kontrolnej, jak również na ekranie komputera rejestrującego dane.

Wyniki pomiarów zapisywane są na komputerze wyposażonym w odpowiedni program komputerowy, który został wykonany w ramach tworzonego stanowiska pomiarowego. Program ten posiada moduły służące do wprowadzania danych oraz zapisu danych z układu pomiarowego do komputera i obserwacji bieżącej wyników. Przykładowy kadr działania programu przedstawiającego w czasie rzeczywistym wszystkie mierzone parametry pokazano na rys. 6.

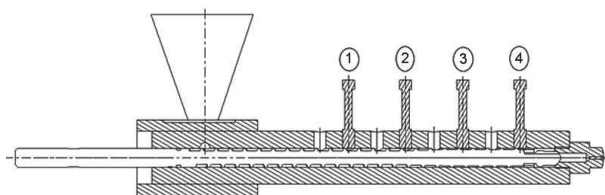
Po uruchomieniu stanowiska badawczego przeprowadzono badania testowe układu z wykorzystaniem polimerów LDPE, HDPE, PP, PS oraz POM, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 1. Badania potwierdziły poprawność montażu układu pomiarowego, który za-



Rys. 6. Kadr z programu współpracującego z układem pomiarowo-kontrolnym umożliwiającego podgląd oraz zapis zbieranych danych pomiarowych

Tab. 1. Polimery wykorzystane do badań

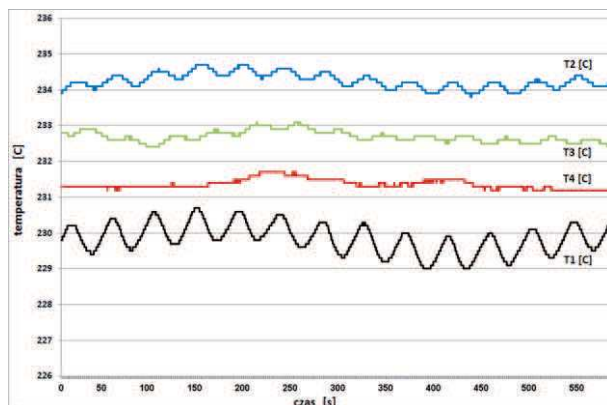
Polimer	Typ	Producent	MFI [g/10 min]
LDPE	Malen E FABS 23D022	Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.	2,0 (190/2,16)
HDPE	Hostalen GC 7260	Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.	8,0 (190/2,16)
PP	Moplen HP548R	Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.	23 (230/2,16)
PS	Krasten 154	SYNTHOS Kralupy a.s.	10 (200/5)
POM	Schulaform 9A	A Schulman GmbH	10 (190/2,16)



Rys. 7. Schemat układu uplastyczniającego wtryskarki wykorzystanej do badań z zaznaczonymi czujnikami pT; ślimak znajduje się w skrajnym położeniu przednim

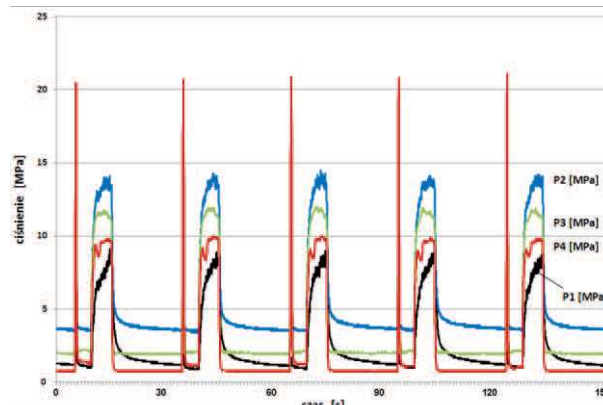
pisuje dane z 15 linii pomiarowych z częstotliwością do 50 Hz.

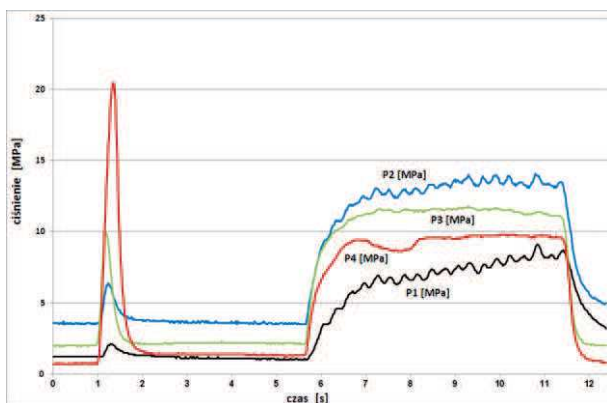
Na rys. 8-14 przedstawiono przykładowe wyniki otrzymane w procesie wtryskiwania PP przy wykorzystaniu zbudowanego stanowiska pomiarowego. Symbole 1-4 na rysunkach 8-10 oznaczają kolejne czujniki, których rozmieszczenie w cylindrze wtryskarki przedstawiono na rys. 7. Ślimak wtryskowy w badanym układzie uplastyczniającym o długości względnej $L/D=17$ posiada 22 zwoje (skok zwoju różny od średnicy), czujniki umieszczone są co cztery zwoje, przy czym ostatni czujnik (nr 4) znajduje się nad ostatnim zwojem ślimaka dla ślimaka w skrajnym położeniu przednim. Skok ślimaka przy wtrysku ustalono na 45 mm (2,5 zwoju). Zmiennymi parametrami były średnia temperatura cylindra T_b , ciśnienie uplastyczniania p_p (ciśnienie przed ślimakiem obracającym się w czasie pobierania tworzywa), czas postoju (bezruchu) ślimaka w położeniu tylnym t_p oraz prędkość obrotowa ślimaka v .

Rys. 8. Temperatura tworzywa w cylindrze podczas wtryskiwania PP ($T_b=230$ °C, $p_p=1,5$ MPa, $t_p=20$ s, $v=60$ obr/min)

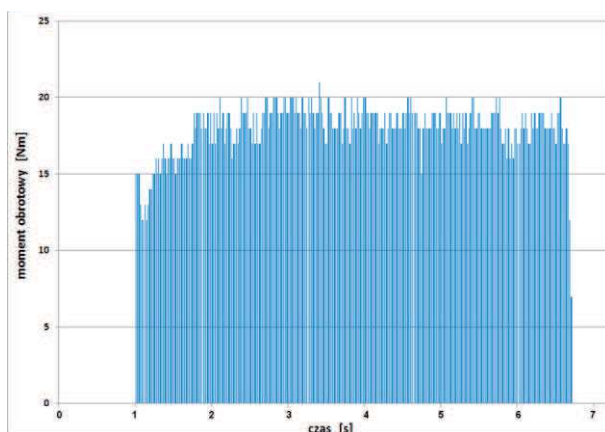
Na rysunku 8 przedstawiono wykres zmian temperatury uplastycznionego PP w cylindrze w procesie wtryskiwania w czasie kolejnych cykli wtryskiwania. Widoczne wahania temperatury stopu w jednym cyklu wtryskiwania spowodowane są pobraniem chłodniejszego materiału z początkowej części cylindra (czujnik 1 oraz 2), jak również wzrostem temperatury stopu w wyniku tarcia lepkiego (czujnik 3). Widoczne są również bardziej długoczasowe wahania temperatury stopionego polimeru, których okres wynosi ok. 10-20 cykli wtryskowych, które należy przypisać wspomnianym niestabilnościom o charakterze losowym, na co nakłada się również pewna inercja systemu regulacji temperatury cylindra.

Na rysunkach 9 oraz 10 przedstawiono wyniki pomiarów ciśnienia stopionego PP w cylindrze podczas procesu wtryskiwania. Rys. 9 przedstawia wyniki pomiaru ciśnienia w okresie pięciu cykli wtryskowych, natomiast na rys. 10 przedstawiono wartości ciśnienia stopionego polimeru na poszczególnych czujnikach dla jednego cyklu wtryskowego. Widoczny najwyższy pik ciśnienia odpowiada etapowi wtrysku, a następnie przebiegi odpowiadają procesowi rotacji ślimaka, podczas którego ciśnienie w poszczególnych punktach cylindra ulega zmianom. Ciśnienie na czujniku nr 4 w czasie rotacji jest stałe i równe ciśnieniu uplastyczniania, wynoszącemu w tym przypadku 10 MPa. Nieliniowość krzywych ciśnienia rejestrowanego przez czujniki, widoczna przede wszystkim na czujnikach 1 oraz 2, która przejawia się występowaniem niewielkich, naprzemiennych, bardzo szybkich wzrostów i spadków ciśnienia, spowodowana jest przemieszczaniem się ślimaka pod danym czujni-

Rys. 9. Ciśnienie tworzywa w cylindrze podczas wtryskiwania PP ($T_b=230$ °C, $p_p=10$ MPa, $t_p=20$ s, $v=240$ obr/min)



Rys. 10. Ciśnienie tworzywa w cylindrze (jeden cykl wtryskowy) podczas wtryskiwania PP ($T_b=230$ °C, $pp=10$ MPa, $tp=20$ s, $v=240$ obr/min)

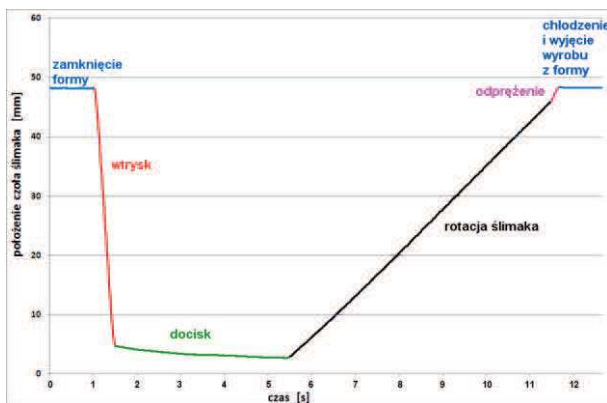


Rys. 12. Moment obrotowy ślimaka w trakcie rotacji ślimaka podczas wtryskiwania PP ($T_b=230$ °C, $pp=10$ MPa, $tp=20$ s, $v=240$ obr/min)

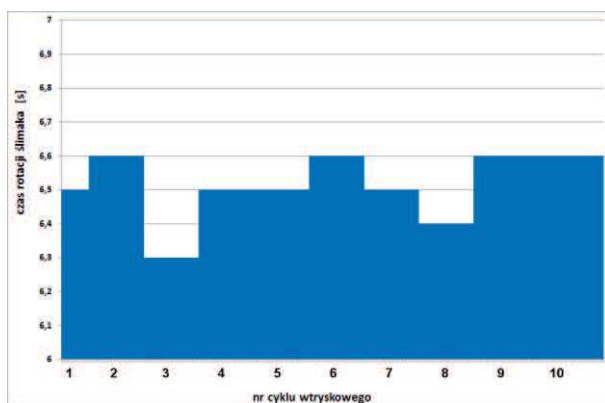
kiem. Czujniki te znajdują się naprzemiennie nad zwojem ślimaka oraz nad jego kanałem, co skutkuje zmiennym ciśnieniem sygnalizowanym przez te czujniki.

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki pomiaru położenia ślimaka (czoła ślimaka) podczas jednego cyklu wtryskowego w procesie wtryskiwania PP. Zaznaczono na nim kolejne etapy cyklu, przy czym widoczne są etapy wtrysku, docisku, rotacji oraz odprężenia.

Na rysunku 12 przedstawiono wyniki pomiarów momentu obrotowego ślimaka w procesie wtryskiwania PP w czasie jednego cyklu wtryskowego. Widoczny jest niewielki wzrost, a następnie spadek momentu obrotowego podczas rotacji. Warto zaznaczyć, iż dla innych, zbadanych polimerów obserwuje się, oprócz zmiennych wartości średnich momentu, także różne przebiegi tej wielkości. Np. dla LDPE obserwuje się spadek momentu podczas rotacji, dla HDPE w przybliżeniu stałą jego wartość. Dla PS, podobnie jak dla POM, występuje znaczny wzrost momentu obrotowego podczas rotacji ślimaka. Zachowanie takie wymaga odrębnej interpretacji na gruncie modelu.



Rys. 11. Położenie czoła ślimaka podczas wtryskiwania PP z zaznaczonymi etapami cyklu wtryskowego ($T_b=230$ °C, $pp=10$ MPa, $tp=20$ s, $v=240$ obr/min)

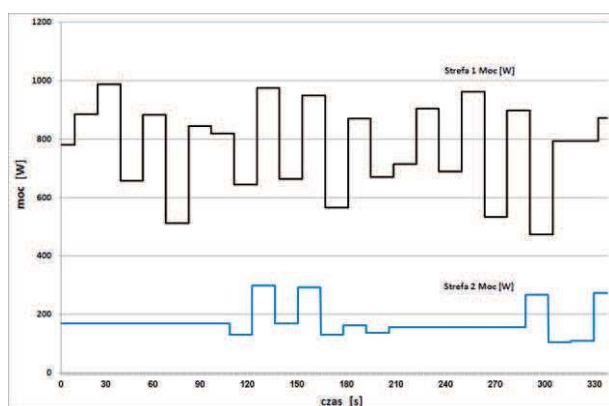


Rys. 13. Czas rotacji ślimaka w kolejnych cyklach wtryskiwania PP ($T_b=230$ °C, $pp=10$ MPa, $tp=20$ s, $v=240$ obr/min)

Na rys. 13 przedstawiono wyniki pomiaru czasu rotacji ślimaka dla kolejnych cykli wtryskowych w procesie wtryskiwania PP. Widać, iż różnice czasów rotacji w kolejnych cyklach wtryskiwania są bardzo niewielkie i nie przekraczają 5%. Generalnie, podczas badań procesu wtryskiwania różnych polimerów nie obserwowano dużych rozrzutów tej wartości za wyjątkiem PS, którego proces wtryskiwania trudno było ustabilizować i gdzie obserwowano znaczne wahania ciśnienia, temperatury i innych parametrów wyjściowych w czasie kolejnych cykli wtryskowych.

Jest to być może związane z amorficzną naturą tego polimeru (jako jedyny badany).

Na rysunku 14 przedstawiono wyniki pomiaru średniej mocy pobranej przez elementy grzejne na cylindrze podczas procesu wtryskiwania PP. Wtryskarka wykorzystana do badań wyposażona była tylko w dwie strefy grzejne, w związku z czym zamieszczone zostały tutaj tylko dwa przebiegi. Widoczne jest znaczne zróżnicowanie mocy pobieranej przez pierwszą oraz drugą grzałkę. Pierwsza strefa grzejna pobiera znacznie większą moc, podczas gdy na drugiej strefie grzewczej element grzejny



Rys. 14. Pobór mocy przez grzałki podczas wtryskiwania PP ($T_p=230\text{ }^\circ\text{C}$, $p_p=10\text{ MPa}$, $t_p=20\text{ s}$, $v=240\text{ obr/min}$)

tylko utrzymuje temperaturę uplastycznionego już materiału. Grzałka na dyszy wtryskowej (nieuwzględniona na rysunku) ustawiona była na stałą moc grzania równą 128 W.

Podsumowanie

W wyniku prac nad weryfikacją poprawności komputerowego modelu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu stworzone zostało nowe stanowisko do pomiaru parametrów wyjściowych tego procesu. Stanowisko umożliwi odczyt tych parametrów i zostanie w najbliższym czasie wykorzystane do ilościowej weryfikacji komputerowego modelu uplastyczniania polimerów w procesie wtryskiwania.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr wniosku N N519 651840

Bibliografia

- [1] Noriega M.: Rauwendaal Ch., *Troubleshooting the extrusion process*, Carl Hanser Verlag, Munich 2010.
- [2] Stasiek J.: *Wytłaczanie Tworzyw Polimerowych – Zagadnienia Wybrane*, Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2007.
- [3] Tadmor Z., Klein I.: *Computer Programs for Plastic Engineers*, Reinhold Book Corp., New York 1968.
- [4] Agur S., Vlachopoulos J.: *Numerical simulation of a single-screw plasticating extruder*, Polym. Eng. Sci., 1982, 22, 1084.
- [5] Zavadsky E., Karnis J.: *Mathematical model of a single-screw plasticating extruder*, Rheol. Acta, 1985, 24, 556.
- [6] Rao N.: *Computer Aided Design of Plasticating Screws*, Hanser Verlag, Munich 1986.
- [7] Wilczyński K.: *Komputerowa symulacja uplastyczniania polimerów w wytłaczarce jednoślismakowej na przykładzie HDPE*, Polimery, 1986, 31, 264.
- [8] Lai E., Yu D.W.: *Modeling of the plasticating process in a single-screw extruder: a fast-track approach*, Polym. Eng. Sci., 2000, 40, 1074.
- [9] Wilczyński K.: *Teoria wytłaczania jednoślismakowego tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
- [10] Wilczyński K.: *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2001.
- [11] Wilczyński K., White J.: *A global model for counter-rotating twin screw extrusion of polymers*, Technical Transactions Mechanics, 2006, 6-M, 511.
- [12] Wilczyński K., Olszewski S.: *Komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa tworzyw sztucznych. Wytłaczanie dwuślismakowe współbieżne*, Mechanik, 2012, 5-6, 472.
- [13] Chwalisz L.: *Wpływ podstawowych parametrów technologicznych na zużycie energii elektrycznej w procesie wtrysku tworzyw termoplastycznych przy użyciu wtryskarki Formoplast 498/165*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1984.
- [14] Potente H., Bornemann M.: *Non-isothermal Model for the Drive Power Calculation of Single-screw Plasticating Units*, Int. Polym. Process., 2008, XXIII, 345.
- [15] Potente H., Schulte H., Effen N.: *Simulation of Injection Molding and Comparison with Experimental Values*, Int. Polym. Process., 1993, VIII, 224.
- [16] Gao F., Jin Z., Chen X.: *A visual barrel system for study of reciprocating screw injection molding*, Polym. Eng. Sci., 2000, 40, 1334.
- [17] Pham T.L. i in.: *In-Line Visualisation of Polymer Plastication in an Injection Moulding Screw*, Key Eng. Mat., 2013, 554-557, 1683.
- [18] Steller R., Iwko J.: *Simulation of polymer plasticization in injection molding: Part 1 Mathematical model*, Int. Polym. Process., 2008, XXIII, 252.
- [19] Iwko J., Steller R.: *Simulation of polymer plasticization in injection molding: Part 2 Simulations and Experiments*, Int. Polym. Process., 2008, XXIII, 263.
- [20] Steller R., Iwko J.: *Modelowanie procesu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu: I – założenia oraz strefa transportu tworzywa stałego*, Polimery, 2008, 11/12, 836.
- [21] Steller R., Iwko J.: *Komputerowa symulacja procesu uplastyczniania polimerów podczas wtryskiwania. Cz. 1, Dążąc do optimum*, PlastNews, 2009, 5, 72.
- [22] Iwko J., Steller R.: *Komputerowa symulacja procesu uplastyczniania polimerów podczas wtryskiwania. Cz. 2, Teoria a praktyka*, PlastNews, 2009, 6, 42.
- [23] Steller R., Iwko J.: *Modelowanie procesu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu: II – strefa stapiania*, Polimery, 2011, 1, 51.
- [24] Basow N.I., Kazankow Yu.W.: *Litjeweje Formowanije Polimierow*, Chimija, Moskwa 1984.
- [25] Donovan R.C.: *The plasticating process in injection molding*, Polym. Eng. Sci., 1974, 14, 101.
- [26] Lipshitz S.D., Lavie R., Tadmor Z.: *A melting model for reciprocating screw injection-molding machines*, Polym. Eng. Sci., 1974, 14, 553.
- [27] Tadmor Z., Klein I.: *Engineering Principles of Plasticating Extrusion*, Wiley-Interscience, New York 1970.
- [28] Steller R., Iwko J.: *Generalized Flow of Ellis Fluid In the Screw Channel: Parallel Plates Model*, Int. Polym. Process., 2001, XVI, 241.
- [29] Steller R., Iwko J.: *Generalized Flow of Ellis Fluid In the Screw Channel: Curved Channel Model*, Int. Polym. Process., 2001, XVI, 249.