

Jacek IWKO¹⁾, R. STELLER²⁾

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

²⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Zakład Inżynierii i Technologii Polimerów, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Doświadczalna weryfikacja komputerowego modelu procesu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu – część 2. Badania porównawcze

Wstęp

Programy komputerowe służące do szeroko pojętego modelowania stają się narzędziami coraz częściej i chętniej wykorzystywanymi nie tylko przez naukowców, lecz przede wszystkim przez konstruktorów i technologów. Przyczyniają się one przede wszystkim do znacznych oszczędności ekonomicznych przedsiębiorstwa, eliminując zarówno nakłady finansowe na budowę prototypów maszyn czy urządzeń, jak również oszczędzając czas pracowników. W dzisiejszych czasach komercyjne programy symulacyjne są jednym z podstawowych narzędzi projektowych i konstrukcyjnych, umożliwiając zarówno przewidywanie zachowania się materiałów czy konstrukcji w określonych warunkach, jak również analizę zjawisk zachodzących podczas przebiegu różnych procesów przemysłowych. Znajdują one również szerokie zastosowanie w przetwórstwie tworzyw sztucznych i są pomocne w konstruowaniu maszyn i narzędzi, jak i w przewidywaniu właściwości wyrobów polimerowych.

Pakiety programowe służące do komputerowego modelowania procesów przetwórstwa można najogólniej podzielić na 2 grupy [1]:

1. Systemy ogólnie zorientowane,
2. Systemy zorientowane na określoną technikę przetwórstwa.

W pierwszej grupie programów, zwanej systemami CFD (*Computational Fluid Dynamics*) znajdują się np. takie pakiety programowe jak: POLYFLOW czy POLYCAD. Zastosowanie systemów ogólnie zorientowanych nie jest ograniczone do konkretnego procesu lub zagadnienia. Stanowią one narzędzia do rozwiązywania równań zachowania masy, pędu i energii dla różnych materiałów i w odniesieniu do różnych warunków przepływu. Podstawą tego typu modelowania jest każdorazowe zdefiniowanie analizowanego problemu. Zakres zagadnień, które można rozwiązać przy pomocy tych pakietów jest bardzo szeroki i obejmuje np. zagadnienia, takie jak: analizę przepływów w kanałach dowolnej geometrii, rozwiązywanie zagadnień powierzchni swobodnych, analizę przepływów wielowarstwowych czy procesów mieszania.

W drugiej grupie pakietów znajdują się programy, których działanie dotyczy zagadnień wyraźnie sformułowanych, najczęściej przepływów. W przeciwieństwie do pakietów z pierwszej grupy, są one ograniczone do określonej metody przetwórstwa. Modelowanie za pomocą tych systemów ma za każdym razem podobny charakter. Polega ono na wprowadzeniu do programu danych opisujących

geometrię układu przepływowego (np. geometrię ślimaka lub głowicy), regulowane warunki przepływu (tzw. parametry robocze) oraz fizykochemiczną, cieplną i reologiczną charakterystykę materiału (tzw. parametry materiałowe), a następnie wykonaniu obliczeń i prezentacji wyników. W tej grupie programów plasuje się również model, który jest przedmiotem niniejszych rozważań. Jego bardziej szczegółową charakterystykę przedstawiono w poprzedniej części artykułu, jak również w literaturze [2-5].

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż symulacji pełnego procesu uplastyczniania polimerów w dowolnym procesie przetwórczym nie da się wykonać wykorzystując system o przeznaczeniu ogólnym, gdyż w szczególności nie będzie on w stanie modelować transportu tworzywa stałego czy działania strefy stapiania. Do tego celu muszą być wykorzystane programy symulujące określony proces przetwórczy, czyli systemy z drugiej grupy programów omówionych powyżej.

Jest oczywiste, iż użycie modeli komputerowych do symulacji procesów przemysłowych, w tym również przetwórczych będzie uzasadnione i wskazane wyłącznie wtedy, gdy modele te zostaną zweryfikowane doświadczalnie, co zapewnia ich adekwatność. Doświadczalna weryfikacja takich modeli jest zwykle kosztowna czasowo i ekonomicznie, lecz jest niezbędną częścią pracy nad modelem w ujęciu całościowym. Polega ona ogólnie na stworzeniu stanowiska badawczego, złożonego z maszyny wraz z narzędziami umożliwiającymi prowadzenie analizowanego procesu. W układzie tym należy umieścić odpowiednie elementy mierzące wielkości bądź charakterystyki wyznaczone przez badany model. Po uruchomieniu maszyny i zebraniu odpowiedniej ilości danych pomiarowych należy porównać dane pomiarowe z odpowiednimi wartościami generowanymi przez analizowany model. W dalszej części badań nad modelem następuje, jeśli jest to wymagane, modyfikacja założeń modelu w kierunku poprawy zgodności jego przewidywań z dynamiką pracy rzeczywistych maszyn lub urządzeń. Po kolejnym etapie porównania charakterystyk teoretycznych i rzeczywistych badanego układu następuje, jeśli to konieczne, ponowna modyfikacja modelu i proces ten jest powtarzany aż do momentu osiągnięcia założonej dokładności wskazań modelu.

Model symulacyjny uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu

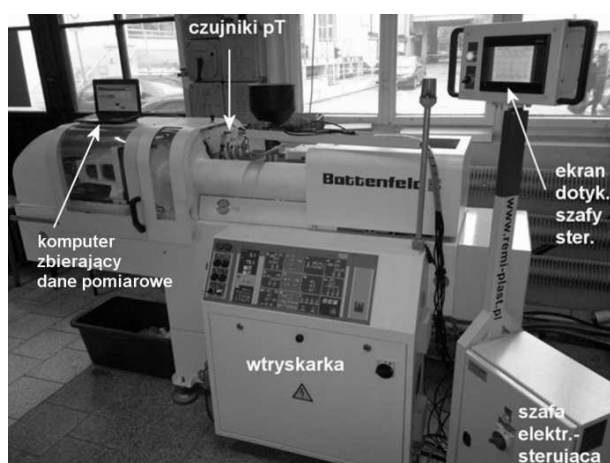
W wyniku badań nad procesem uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu autorzy stworzyli model kom-

puterowy opisany w poprzedniej części artykułu oraz w literaturze [2-5], który w sposób kompleksowy opisuje uplastycznianie przy wtryskiwaniu. Model opisuje strefę transportu tworzywa stałego począwszy od zasobnika, następnie strefę stapiania wstępnego oraz właściwego. Model ten stał się podstawą do stworzenia programu komputerowego, który wykorzystano do badań porównawczych, przedstawionych w niniejszym artykule.

Stworzony model symulacyjny procesu uplastyczniania ślimakowego przy wtryskiwaniu nie został dotychczas w pełni sprawdzony doświadczalnie ze względów finansowych. Jego weryfikacja dokonana została w uproszczony sposób 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 z tego względu może stanowić istotną chociaż wycinkową informację o poprawności przewidywań modelu. Nie zmienia to jednak faktu, że podstawową wadą stworzonego modelu jako ewentualnego narzędzia do optymalizacji procesu wtryskiwania ślimakowego na etapie uplastyczniania był brak jego pełnej weryfikacji. Wymaga ona porównania generowanych charakterystyk wyjściowych procesu, takich jak profile ciśnienia i temperatury na długości ślimaka, pobór mocy przez ślimak, wydajność uplastyczniania, itp., z odpowiednimi charakterystykami pracy realnej jednostki uplastyczniającej wtryskarki. Temu zagadnieniu poświęcony jest niniejszy artykuł.

Stanowisko badawcze i metodyka badań

W celu dokładnej weryfikacji stworzonego modelu komputerowego wykonano stanowisko badawcze do pomiarów parametrów wyjściowych procesu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu. Stanowisko to, przedstawione na rys. 1, opisane zostało szczegółowo w pierwszej części artykułu [6]. Jest ono zbudowane z odpowiednio oprzyrządowanej wtryskarki ślimakowej, połączonej



Rys. 1. Wtryskarka wraz z układem pomiarowo-kontrolnym wykorzystana w badaniach

z modułem zbierającym i przetwarzającym dane oraz z komputerem umożliwiającym zapis i obrazowanie zebranych danych pomiarowych. W tabeli 1 przedstawiono najważniejsze cechy wtryskarki użytej w badaniach. Podano też wartości stałych parametrów roboczych.

Tab. 1. Podstawowe dane wtryskarki wykorzystanej do badań oraz najważniejsze niezmiennic parametry procesu wtryskiwania

Cecha	Wartość
Producent wtryskarki	Battenfeld
Typ wtryskarki	Plus 350/70
Średnica ślimaka	25 mm
L / D	17
Ilość zwojów	22
Siła zamykania formy	350 kN
Maks. obj. wtrysku	49 cm ³
Maks. ciśnienie wtrysku	157,5 MPa
Stałe parametry procesu	
Ciśnienie wtrysku	63 MPa
Ciśnienie docisku	33 MPa
Czas docisku	4 s
Temperatura formy	40°C

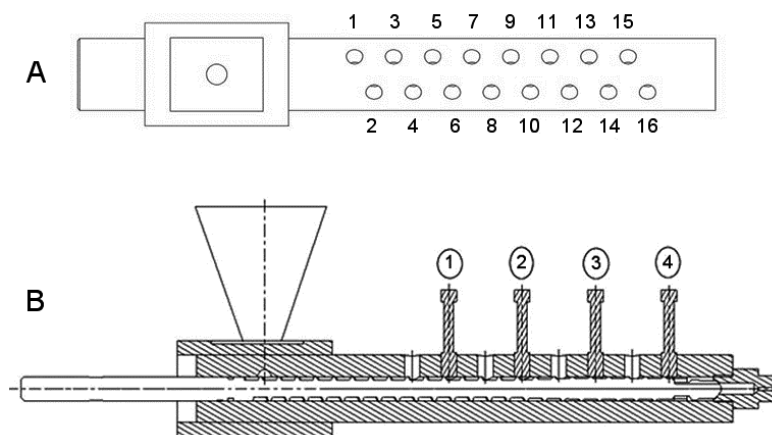
Do pomiaru najważniejszych charakterystyk uplastyczniania, wtryskarkę wyposażono w następujące elementy pomiarowe (scharakteryzowane szczegółowo w pierwszej części artykułu):

- cztery czujniki pT (ciśnienia i temperatury),
- sprzęgło pomiarowe momentu obrotowego,
- czujnik indukcyjny mierzący rzeczywistą szybkość obrotową ślimaka,
- czujnik przesunięcia liniowego ślimaka.

Badania doświadczalne uplastyczniania przy wtryskiwaniu przeprowadzono z użyciem pięciu różnych polimerów scharakteryzowanych w tabeli 2, odznaczających się łatwością przetworstwa wtryskowego. Było to istotne z punktu widzenia znacznej liczby i dużej rozpiętości parametrów procesu wtryskiwania zmienianych podczas badań, które przedstawiono w tabeli 3. Zmiennymi parametrami były:

1. Ciśnienie uplastyczniania (wartości od 4 – 24 MPa),
2. Prędkość obrotowa ślimaka (zmienna w zakresie 30-70% prędkości maksymalnej ślimaka),
3. Czas postoju ślimaka w położeniu tylnym (liczony od momentu zakończenia fazy rotacji do rozpoczęcia fazy wtrysku, zmienny w przedziale 8-50 s),
4. Temperatura cylindra (stała dla obu występujących we wtryskarce stref grzejnych, ustawiana na pięciu poziomach tak, aby środkowa wartość była wartością „typową”; najczęściej była to wartość, przy której mierzono katalogową wartość wskaźnika MFR, pozostałe wartości temperatury zmieniano kolejno o 15-20°C).

W tabeli 3 przedstawiono zmiennic parametry procesu wtryskiwania dla polipropylenu. Dla pozostałych czterech polimerów były one bardzo podobne za wyjątkiem



Rys. 2. Rozmieszczenie otworów w cylindrze wtryskarki pod czujniki pT (A) oraz poglądowy widok rozmieszczenia czterech czujników pT w cylindrze (B)

temperatur cylindra, które były dobierane odpowiednio dla każdego materiału i różniły się od tych przedstawionych dla PP.

Tab. 2. Polimery wykorzystane do badań

Polimer	Typ	Producent	MFR [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)

Tab. 3. Parametry procesu wtryskiwania zmieniane podczas badań

	Parametr / wartości				
parametr	Ciśnienie uplastyczniania [MPa]				
wartość	4	7	10	16	24
parametr	Prędkość obrotowa ślimaka [obr/min]				
wartość	154	200	240	286	333
parametr	Czas postoju ślimaka [s]				
wartość	8	12	20	30	50
parametr	Temperatura cylindra [°C]				
wartość	200	215	230	245	260

Badania procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu dla danego polimeru prowadzono, zmieniając we wskazanym zakresie jeden z parametrów podanych w tab. 3. i utrzymując pozostałe parametry procesu na stałym poziomie, równym środkowej wartości spośród wymienionych.

Cylinder wtryskarki posiada nawierconych 16 otworów pod czujniki, których położenie schematycznie przedstawiono na rys. 2a. W cylindrze umieszczono cztery czujniki pT o numeracji odpowiednio od 1 do 4 w położeniach 4, 8, 12 i 16 z rys. 2a. Poglądowy obraz rozmieszczenia czujników pokazano na rys. 2b.

Poniżej przedstawione zostaną wyniki porównania różnych charakterystyk uplastyczniania przy wtryskiwaniu dla polipropylenu, którego podstawowe dane przedstawiono w tabeli 4. Wyniki pomiarów charakterystyk dla pozostałych polimerów wymienionych w tab. 2, dla których również przeprowadzono podobne badania, są jakościowo podobne, a średnie różnice w ich wartościach są zbliżone do różnic, które obserwowano dla polipropylenu. Stąd też wobec dużej ilości danych pomiarowych zdecydowano się na przedstawienie wyników wyłącznie dla PP.

Tab. 4. Podstawowe dane polipropylenu wykorzystanego do badań

Cecha	Wartość
Typ	Moplen HP548R
Producent	Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.
MFI (230/2.16)	23 g/10min
Moduł Younga (ISO 527-2)	1 650 MPa
Udarność z karbem (ISO 179/1eA)	2.5 kJ/m ²
Twardość (ISO 2039-1)	78.0 MPa
Temp. ugięcia (ISO 75-2/B)	95°C

Porównanie wyników modelu z charakterystykami doświadczalnymi

Na rysunkach 3-10 przedstawiono porównanie modelowych charakterystyk procesu uplastyczniania PP z charakterystykami pracy rzeczywistej wtryskarki. Z uwagi na cykliczny (a więc nieustalony/kwazi-ustalony) przebieg procesu wtryskiwania wyniki odnoszą się do mo-

mentu cyklu wtryskowego, który występuje tuż przed zakończeniem obrotów ślimaka, czyli do chwili zakończenia stapienia dynamicznego. Ten moment odpowiadający maksymalnemu wypełnieniu kanału ślimaka tworzywem stałym jest krytyczny z punktu widzenia wartości podstawowych charakterystyk procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu i ma decydujące znaczenie dla takich procesów, jak: kształtowanie się profili ciśnienia i temperatury na długości ślimaka, pobór mocy przez ślimak, wielkość momentu obrotowego ślimaka czy wydajność uplastyczniania.

1. Zmienne ciśnienie uplastyczniania

W pierwszej części badań zmieniano ciśnienie uplastyczniania w układzie uplastyczniającym wtryskarki. Pozostałe parametry procesu utrzymywano na stałym poziomie, tj. prędkość obrotowa ślimaka $v = 240$ obr/min, czas postoju ślimaka w położeniu tylnym $t_p = 20$ s oraz temperatura cylindra $T_b = 230^\circ\text{C}$.

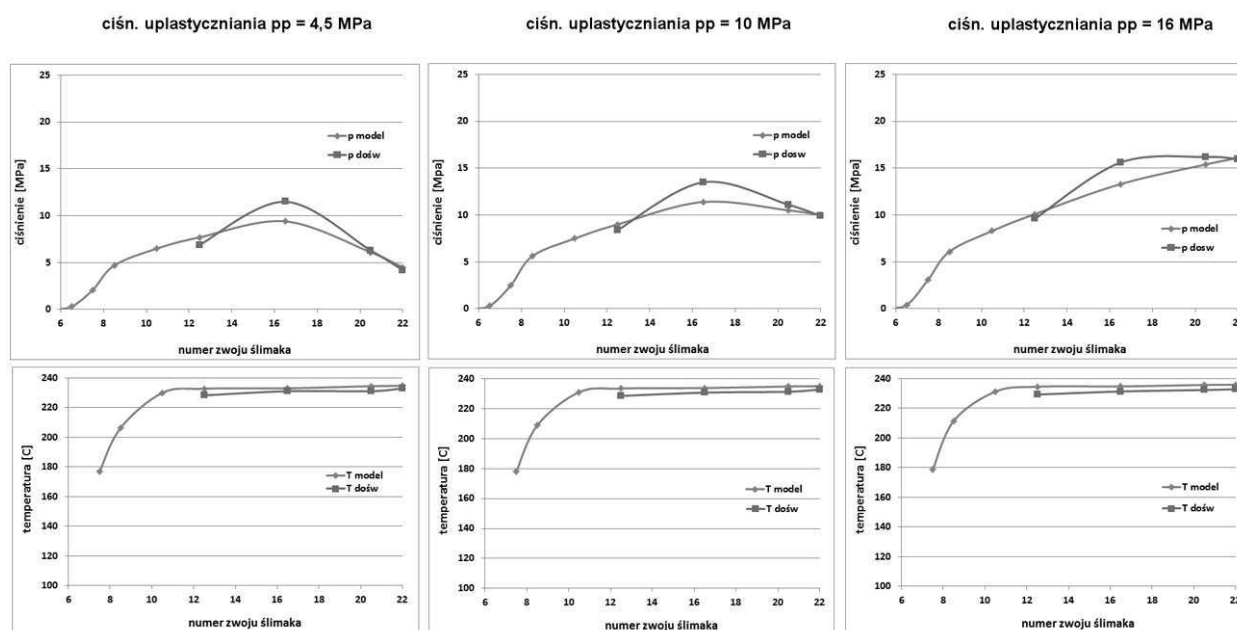
Na rysunku 3 przedstawiono porównanie profili ciśnienia i temperatury na długości ślimaka dla ciśnienia uplastyczniania równego odpowiednio 4,5, 10 oraz 16 MPa.

Porównanie modelowych i pomiarowych profili ciśnienia wskazuje na różnice rzędu 20% w maksimum wartości ciśnienia. Model wyznacza zbyt niskie wartości ciśnienia w tym obszarze. Z kolei ekstrapolacja krzywej doświadczalnej ciśnienia w kierunku mniejszych numerów zwojów wskazuje, iż w początkowej części ślimaka model nieco zawyża wartości ciśnienia. Porównanie charakterystyk profili ciśnienia dla innych polimerów daje zróżnicowane wyniki – dla LDPE model przeszacowuje wartości

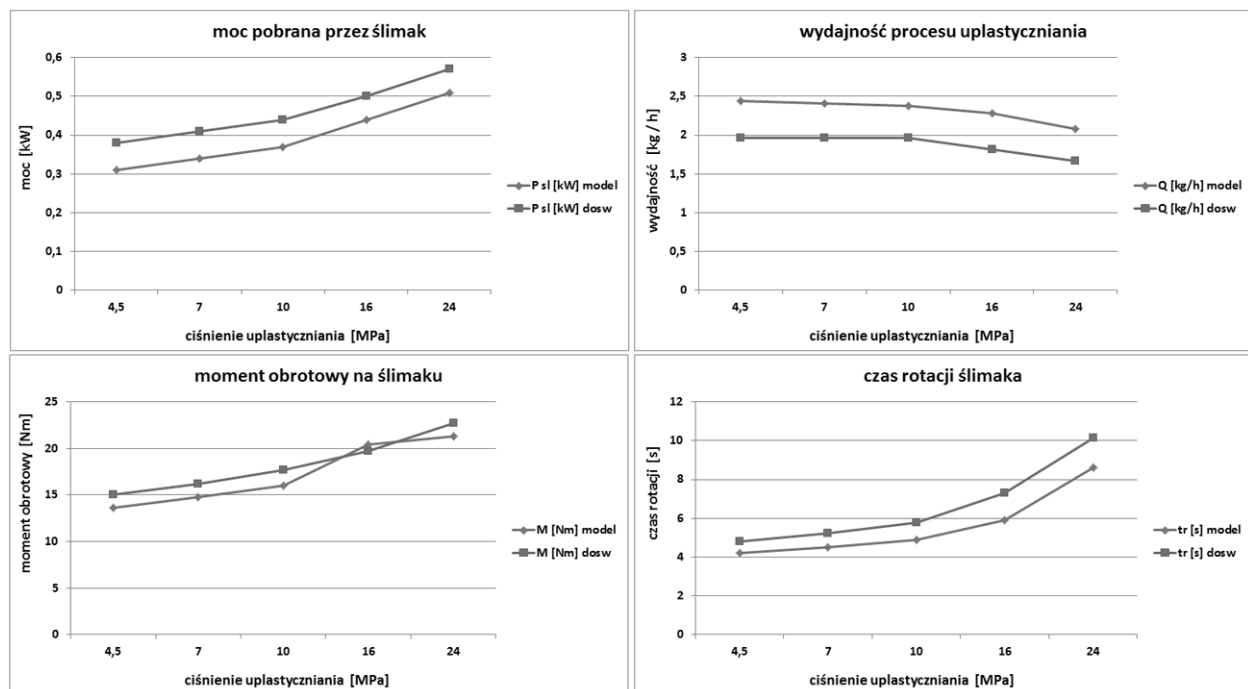
ciśnienia na praktycznie całej długości ślimaka przy różnicach ciśnień rzeczywistym i prognozowanym w miejscu jego maksimum rzędu 20%, natomiast dla HDPE i POM oba profile ciśnienia wykazują dobrą zgodność (różnice ok. 2%) niezależnie od ustawionego ciśnienia uplastyczniania.

Generalnie, widoczna jest zależność różnic w przebiegu profili ciśnienia od lepkości, a tym samym od wskaźnika MFR. Dla LDPE Malen E FABS 23D022 – polimeru charakteryzującego się większą lepkością w stanie płynnym, a tym samym mniejszym wskaźnikiem MFR (p. tab. 2), model przeszacowuje wartości ciśnienia. Z kolei dla PP typu Moplen HP548R, który ma dużą wartość MFR, a więc niewielką lepkość, model niedoszacowuje wartości ciśnienia. Dla polimerów HDPE i POM, dla których MFR jest rzędu 10, model wyznacza poprawne wartości ciśnień na całej długości ślimaka. Problem ten będzie jeszcze przedmiotem dalszych analiz w celu poprawy zgodności przewidywanego przez model profilu ciśnienia z wartościami doświadczalnymi.

Porównanie profili temperatury wskazuje na dobrą zgodność wartości przewidywanych przez model z rzeczywistym zachowaniem układu uplastyczniającego wtryskarki przy różnicach rzędu $2\text{--}3^\circ\text{C}$, praktycznie niezależnie od wartości ciśnienia uplastyczniania. Porównanie profili temperatury dla innych polimerów daje, podobnie jak w przypadku ciśnienia, różne rezultaty. Dla polimerów HDPE i POM różnice w profilach temperatury są rzędu $8\text{--}10^\circ\text{C}$, natomiast dla LDPE różnice te są większe i sięgają $15\text{--}18^\circ\text{C}$. Model w każdym przypadku przeszacowuje wartości temperatur. W rzeczywistości nie obserwuje się dużych wzrostów temperatur polimeru w cylindrze wtryskarki. Niezależnie od rodzaju polimeru



Rys. 3. Porównanie profili ciśnienia (na górze) i temperatury (na dole) w procesie wtryskiwania polipropylenu przy różnych ciśnieniach uplastyczniania



Rys. 4. Porównanie różnych charakterystyk uplastyczniania podczas wtryskiwania polipropylenu przy różnych ciśnieniach uplastyczniania

oraz parametrów procesu, wzrost ten wynosi zawsze ok. 2-6 °C.

Widać, iż różnice w profilach temperatury, podobnie jak różnice profili ciśnienia, mają odniesienie do lepkości i różnice te są tym większe, im większa jest lepkość stopionego polimeru. Problem ten będzie jeszcze przedmiotem dalszych badań w celu poprawy zgodności wskazań temperatur tworzywa przez model z wartościami temperatur zmierzonymi na wtryskarce.

Na rys. 4 przedstawiono porównanie innych modelowych charakterystyk procesu uplastyczniania PP przy wtryskiwaniu z wartościami zmierzonymi doświadczalnie na stanowisku badawczym przy zmieniającym się ciśnieniu uplastyczniania. Widać dobrą zgodność profili teoretycznych i doświadczalnych przy różnicach ilościowych nie przekraczających 20%. Zwraca uwagę dobre przewidywanie przez model dynamiki zmian procesu przy zmieniającym się ciśnieniu uplastyczniania, czego obrazem są podobne kształty obu krzywych. Model wyznacza nieco za małe wartości mocy pobranej przez ślimak, momentu obrotowego ślimaka oraz czasu rotacji ślimaka. Ponieważ wydajność uplastyczniania maleje z czasem rotacji ślimaka, zatem przy niedoszacowaniu czasu rotacji, model równocześnie przeszacowuje wydajność uplastyczniania.

2. Zmienna prędkość obrotowa ślimaka

Badania procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu przeprowadzono dla pięciu różnych prędkości obrotowych ślimaka, przedstawionych w tab. 3.

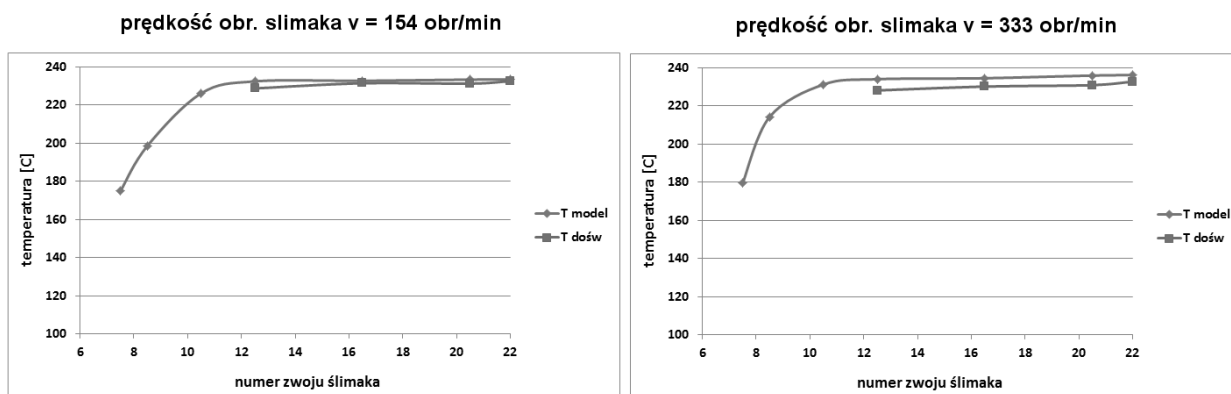
Porównanie teoretycznych i doświadczalnych profili ciśnienia dla zmieniających się prędkości obrotowych śli-

maka dało wyniki bardzo podobne do przedstawionych na rys. 4 (przy podobnych różnicach wartości sięgających 20%) i stąd nie będą przedstawiane. Porównanie profili temperatury przedstawiono na rys. 5. Naniesiono na nim tylko wartości temperatur dla najmniejszej oraz największej stosowanej prędkości obrotowej ślimaka, gdyż dla pośrednich prędkości uzyskano wyniki mieszczące się pomiędzy wynikami dla prędkości granicznych. Z rysunku 5 wynika, iż model wskazuje poprawnie wartość temperatury tworzywa dla mniejszych prędkości ślimaka, natomiast dla prędkości większych przeszacowuje wartości temperatur tworzywa o ok. 5-7°C. Przeszacowanie to wynika prawdopodobnie ze zbyt dużej modelowej wartości ciepła generowanego w wyniku tarcia lepkiego przy większych wartościach prędkości obrotowej ślimaka. Analogiczne zależności obserwuje się dla innych przebadanych polimerów.

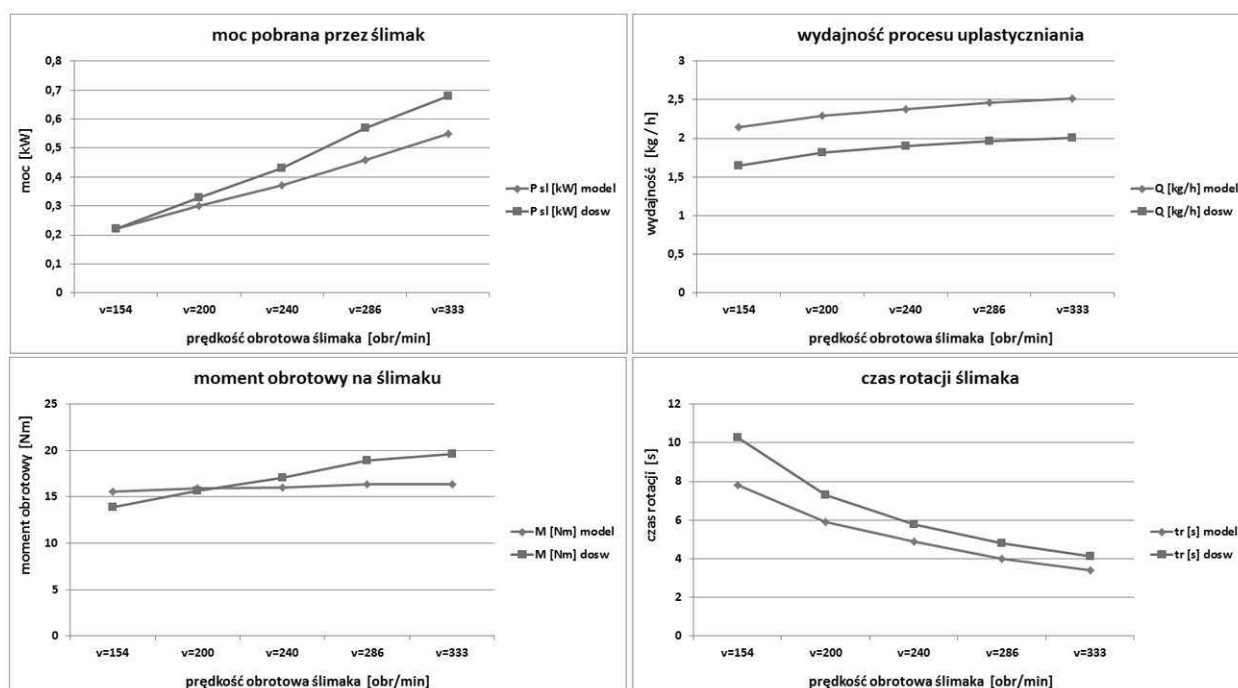
Porównanie innych charakterystyk procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu PP dla zmieniających się prędkości obrotowych ślimaka przedstawiono na rys. 6. Widać, iż model generalnie w sposób poprawny jakościowo wyznacza te charakterystyki przy maksymalnych różnicach ilościowych nie przekraczających 25%. Zastanawia niewielki szacowany wzrost momentu obrotowego ślimaka w porównaniu z większym wzrostem momentu obserwowanym na wtryskarce. Problem ten będzie jeszcze w przyszłości analizowany.

3. Zmienny czas postoju ślimaka

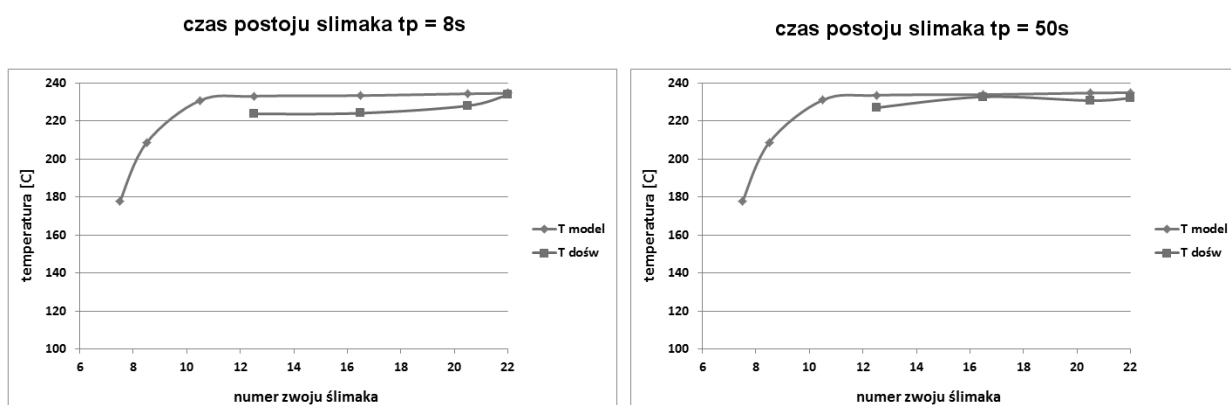
Badania procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu przeprowadzono dla pięciu różnych czasów postoju śli-



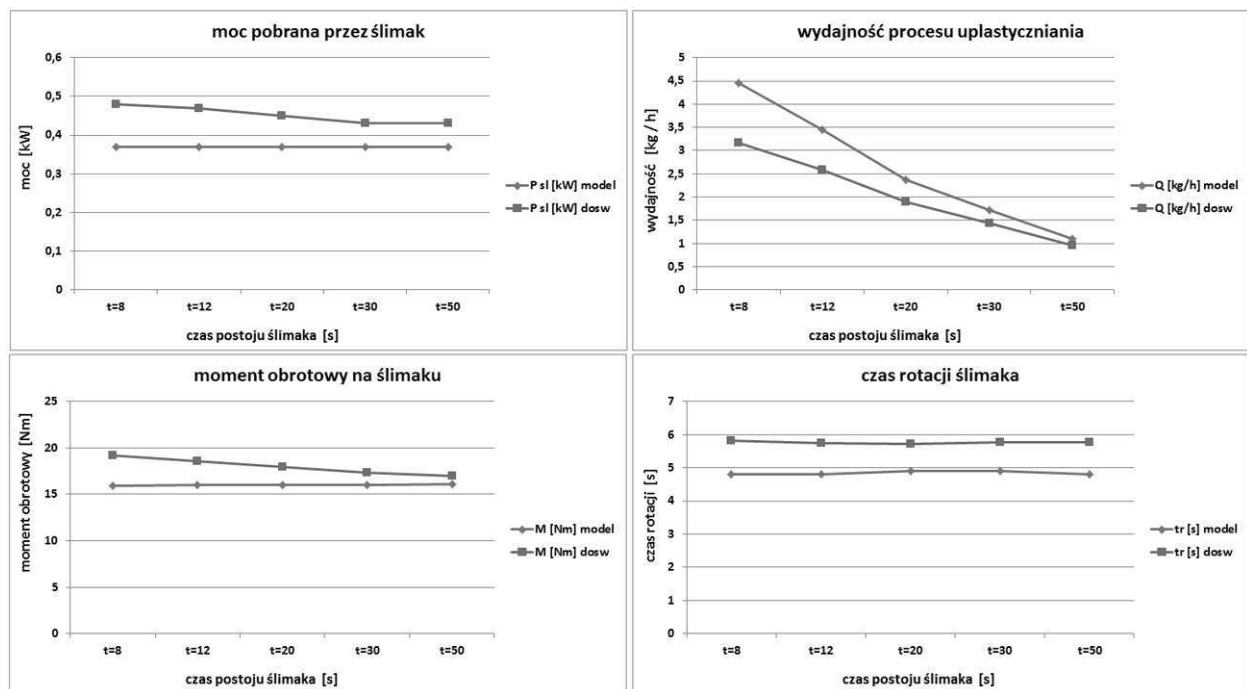
Rys. 5. Porównanie profili temperatury w procesie wtryskiwania polipropylenu przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka



Rys. 6. Porównanie różnych charakterystyk uplastyczniania podczas wtryskiwania polipropylenu przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka



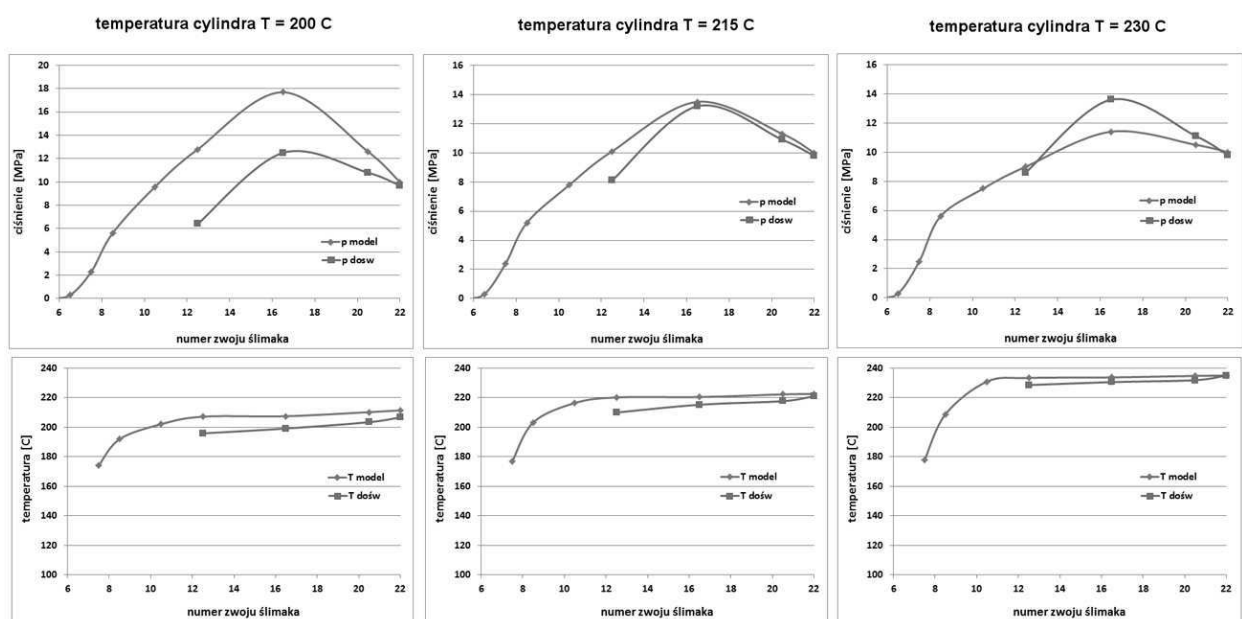
Rys. 7. Porównanie profili temperatury w procesie wtryskiwania polipropylenu przy różnych czasach postoju ślimaka



Rys. 8. Porównanie różnych charakterystyk uplastyczniania podczas wtryskiwania polipropylenu dla różnych czasów postoju ślimaka

maka w położeniu tylnym, przedstawionych w tab. 3. Porównanie profili ciśnienia dla zmieniających się czasów postoju dało wyniki analogiczne do przedstawionych na rys. 4, przy podobnych różnicach wartości teoretycznych i doświadczalnych sięgających 20%, stąd dane te nie będą tutaj przedstawiane. Porównanie profili temperatury przedstawiono na rys. 7. Uwzględniono na nim tylko wartości temperatur dla najmniejszego oraz największe-

go czasu postoju ślimaka, gdyż dla pośrednich czasów uzyskano wyniki leżące pomiędzy wynikami dla czasów granicznych. Widać, iż model wskazuje poprawnie temperaturę tworzywa dla dłuższych czasów postoju. Dla krótkich czasów cyklu, a więc i krótkich czasów postoju ślimaka różnice temperatur przewidywanych i rzeczywistych PP są znaczne i wynoszą 8-12°C. W trakcie badań, dla krótkich czasów cyklu wyraźnie widoczny był



Rys. 9. Porównanie profili ciśnienia (na górze) i temperatury (na dole) w procesie wtryskiwania polipropylenu dla różnych temperatur cylindra

wpływ nasuwającego się szybko tworzywa chłodniejszego, z początkowej części cylindra do dalszych jego części i wyraźnie niższa temperatura stopionego materiału na prawie całej długości cylindra od temperatury samego cylindra o ok. 5-8°C. Model nie przewiduje takiego przebiegu procesu, zakładając minimalną temperaturę warstewki tworzywa przy cylindrze równą temperaturze cylindra od momentu rozpoczęcia stapienia materiału. Problem ten również będzie wymagał korekty w modelu.

Na rys. 8 przedstawiono porównanie różnych charakterystyk procesu uplastyczniania dla zmiennych czasów postoju ślimaka w położeniu tylnym w zakresie 8–50 s. Widać, iż czas rotacji nie wpływa w znaczący sposób na takie charakterystyki jak: moc pobrana przez ślimak, moment obrotowy ślimaka czy czas rotacji ślimaka. Uwidacznia się tu jedynie oczywisty, znaczący wpływ czasu postoju, związanego z czasem cyklu na wydajność uplastyczniania. Średnie różnice w wartościach zmierzonych doświadczalnie i wyznaczonych z modelu nie przekraczają 20% za wyjątkiem wydajności uplastyczniania, gdzie dla krótkich czasów cyklu wynoszą ponad 40%.

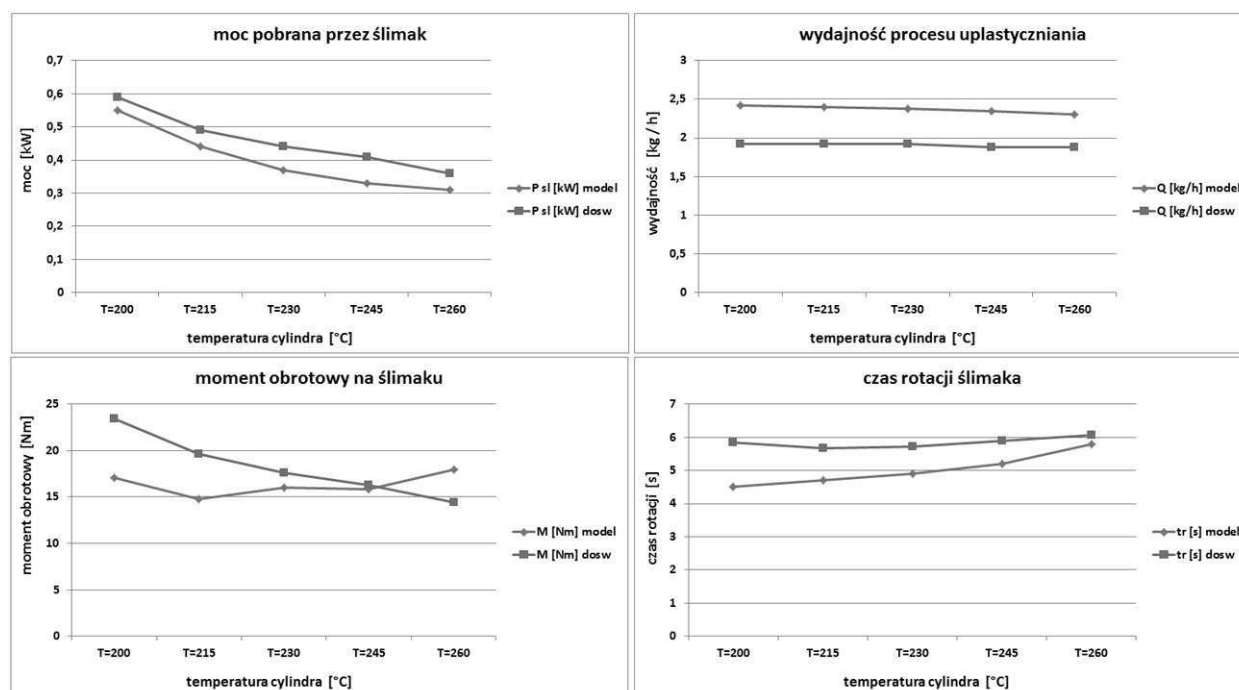
4. Zmienna temperatura cylindra

W ostatniej części badań w układzie uplastyczniającym wtryskarki zmieniano temperaturę cylindra T_b , tzn. na obu strefach grzejnych wtryskarki ustawiano tę samą wartość temperatury, zgodnie z tabelą 3. Pozostałe parametry procesu wtryskiwania utrzymywano na stałym poziomie.

Na rys. 9 przedstawiono porównanie profili ciśnienia i temperatury dla różnych temperatur cylindra równych

odpowiednio 200, 215 oraz 230°C. Widać, iż dla niższych temperatur cylindra model znacznie przeszacowuje wartość ciśnienia, podczas gdy dla wyższych temperatur trend jest przeciwny. Zachowanie takie może mieć przyczynę w opisywanej wcześniej silnej zależności wyznaczonej wartości ciśnienia od lepkości stopionego polimeru. Analizując profil temperatury widać, iż model lepiej przewiduje wartości temperatur tworzywa dla wyższych temperatur cylindra. Przy niższych temperaturach procesu różnice w profilach teoretycznym i doświadczalnym rosną, osiągając dla temp. 200°C wartości rzędu 10°C. Przyczyną tych różnic może być, opisywany powyżej przy zmiennym czasie postoju problem przyjęcia temperatury stopionego tworzywa w warstewce przy ścianie cylindra równej temperaturze cylindra, podczas gdy na rys. 9 obserwujemy, szczególnie dla $T_b=200^\circ\text{C}$, wartości temperatury stopionego PP niższe od T_b .

Na rys. 10 zaprezentowano porównanie charakterystyk teoretycznych i doświadczalnych procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu PP dla różnych temperatur cylindra T_b w zakresie 200-260°C. Widać brak wpływu T_b na wydajność uplastyczniania oraz spodziewany spadek mocy pobranej przez ślimak wraz ze wzrostem temperatury cylindra. Obserwuje się również nieznaczny wzrost czasu rotacji ślimaka dla zwiększających się wartości T_b (w badaniach zaobserwowano wystąpienie w tym zakresie T_b niewielkiego minimum dla 215°C). Natomiast moment obrotowy ślimaka wyznaczany jest przez model w sposób nieprawidłowy; dla zmieniającej się temperatury cylindra widać spadek, a następnie wzrost momentu obrotowego. Bliższa analiza tego problemu wykazała występowanie pewnych niestabilności numerycznych



Rys. 10. Porównanie różnych charakterystyk uplastyczniania podczas wtryskiwania polipropylenu dla różnych temperatur cylindra

przy wyznaczaniu wartości momentu obrotowego dla zmieniającej się temperatury T_b . Zagadnienie to będzie przedmiotem dalszych badań i korekt w modelu.

Podsumowanie

W pracy przeanalizowano proces uplastycznienia polipropylenu przy różnych parametrach zmiennych, a następnie porównano wartości charakterystyk uplastycznienia z charakterystykami wyznaczonymi przez model komputerowy. Stwierdzono, że model poprawnie wyznacza dynamikę zmian procesu uplastycznienia przy zmieniających się parametrach wejściowych procesu, a średnie rozbieżności ilościowe pomiędzy charakterystykami teoretycznymi a doświadczalnymi nie przekraczają 25%.

Model komputerowy wymaga jeszcze zmian w kierunku poprawy zgodności wyznaczanych charakterystyk z charakterystykami pracy rzeczywistej jednostki uplastyczniającej wtryskarki. Zmiany te powinny obejmować przede wszystkim modyfikacje metod:

1. Wyznaczania ciśnienia na długości ślimaka,
2. Wyznaczania profilu temperatury,
3. Obliczania wydajności uplastycznienia,
4. Wyznaczania momentu obrotowego ślimaka.

Wykonane badania pozwoliły w kilku przypadkach na ustalenie potencjalnych źródeł i przyczyn rozbieżności danych teoretycznych i doświadczalnych, co ułatwi

wprowadzenie stosowanych korekt w istniejącym modelu symulacyjnym.

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

Bibliografia

- [1] Wilczyński K. i in., *Model komputerowy procesów wytłaczania i wtryskiwania*, Technical Transactions Mechanics, 2009, 1-M, 367.
- [2] Steller R., Iwko J.: *Modelowanie procesu uplastycznienia polimerów przy wtryskiwaniu: I – założenia oraz strefa transportu tworzywa stałego*, Polimery, 2008, 11/12, 836.
- [3] Steller R., Iwko J.: *Komputerowa symulacja procesu uplastycznienia polimerów podczas wtryskiwania. Cz. 1, Dążąc do optimum*, PlastNews, 2009, 5, 72.
- [4] Iwko J., Steller R.: *Komputerowa symulacja procesu uplastycznienia polimerów podczas wtryskiwania. Cz. 2, Teoria a praktyka*, PlastNews, 2009, 6, 42.
- [5] Steller R., Iwko J.: *Modelowanie procesu uplastycznienia polimerów przy wtryskiwaniu: II – strefa stapiania*, Polimery, 2011, 1, 51.
- [6] Iwko J., Steller R., *Doświadczalna weryfikacja komputerowego modelu procesu uplastycznienia polimerów przy wtryskiwaniu część 1. Stanowisko badawcze*, Przetwórstwo Tworzyw, w druku.