

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI^{*)}, ANDRZEJ NASTAJ, ADRIAN LEWANDOWSKI,
KRZYSZTOF J. WILCZYŃSKI

Politechnika Warszawska
Instytut Technologii Materiałowych
Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych
ul. L. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Modelowanie przepływu tworzyw w procesie wytłaczania dwoślimakowego przeciwbieżnego

Cz. II. BADANIA SYMULACYJNE I DOŚWIADCZALNE – WERYFIKACJA MODELU

Streszczenie – Na podstawie badań symulacyjnych i doświadczalnych wytłaczania z dozowanym zasilaniem, z zastosowaniem układu ślimaków ściśle zazębiających się zweryfikowano komputerowy model przepływu tworzywa. Badania prowadzono w warunkach różnych wartości natężenia przepływu tworzywa i różnych prędkości obrotowych ślimaka. Oceniano przebieg uplastycznienia tworzywa i stopień wypełnienia kanału ślimaka, wykonano pomiary ciśnienia tworzywa i momentu obrotowego ślimaka. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników pomiarów i obliczeń.

Słowa kluczowe: wytłaczanie dwoślimakowe przeciwbieżne, model komputerowy, symulacja, weryfikacja doświadczalna.

MODELLING OF THE POLYMER MELT FLOW IN A TWIN-SCREW COUNTER-ROTATING EXTRUSION PROCESS. Part II. SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES – VERIFICATION OF THE ADOPTED MODEL

Summary – The verification of a computer-derived melt flow model has been performed on the basis of simulation (Figs. 6–10) and experimental studies for a twin-screw closely intermeshing starve feed extrusion (Fig. 1). The tests were carried out under various flow rate and screw rotational speed conditions. The melting process of the polymer and extent of screw chamber filling were also evaluated and pressure and torque measurements carried out. The studies confirm a good agreement between the simulation and experimental results (Figs. 11–13).

Keywords: counter-rotating twin-screw extrusion, computer model, simulation, experimental verification.

W pierwszej części pracy [1] przedstawiono koncepcję zastosowania metody elementów skończonych MES do całościowego modelowania procesu dwoślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego, polegającą na tworzeniu przepływowych charakterystyk ślimaków, definiujących zależności bezwymiarowego natężenia przepływu tworzywa i bezwymiarowego gradientu ciśnienia. Uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych MES zależności, zapisane w postaci związków regresyjnych, można następnie implementować do całościowego modelu procesu. Opracowano metodykę modelowania przepły-

wu tworzywa w wylączarce przeciwbieżnej, w rzeczywistej trójwymiarowej przestrzeni, w warunkach przepływu nienewtonowskiego oraz wykonano badania modelowe, których wyniki zostały implementowane w niniejszej części artykułu do całościowego modelu procesu.

Całościowy model procesu opisuje transport tworzywa w stanie stałym, przebieg uplastycznienia tworzywa oraz przepływ tworzywa uplastycznionego [1–3]. Zbudowany na jego podstawie program komputerowy umożliwia symulację procesu, tzn. prognozowanie przebiegu wytłaczania na podstawie charakterystyki geometrycznej układu ślimakowego, warunków technologicznych procesu oraz właściwości przetwarzanego tworzywa. Symulacja pozwala na określenie przebiegu uplastycz-

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: krzysztof.wilczynski@wip.pw.edu.pl

niania tworzywa, rozkładu ciśnienia i temperatury oraz stopnia wypełnienia kanału ślimaka.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki niezależnych badań doświadczalnych procesu wytłaczania przeciwbieżnego oraz obliczeń symulacyjnych, obrazujących wpływ warunków technologicznych procesu na przebieg wytłaczania. Zgromadzone dane posłużyły do weryfikacji proponowanej metody modelowania procesu wytłaczania przeciwbieżnego.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Weryfikację modelu przeprowadzono na podstawie wyników badań doświadczalnych wykonanych przy użyciu wyciączarki dwuślimakowej o budowie modułowej Leistritz ZSE 27HP, pracującej w układzie przeciwbieżnym. Średnica ślimaka $D = 27$ mm, długość $L = 990$ mm, odległość między osiami ślimaków $R = 22,5$ mm.

Zastosowana konfiguracja ślimaków zawiera ściśle ząbujące się (FD), luźno ząbujące się (KFD) i ścinające (ZSS) elementy konstrukcyjne. Układ ślimakowy (rys. 1) składa się z kilku sekcji o różnej charakterystyce geometrycznej i długości. Zastosowano głowicę do wytłaczania trzech żył o średnicy 3 mm.

W badaniach użyto polietyleny małej gęstości (Basell Orlen, Purell 3020D), o gęstości właściwej $\rho = 0,927$ g/cm³, wskaźniku szybkości płynięcia $MFR = 0,3$ g/10 min (190 °C, 2,16 kg) i temperaturze topnienia $T_m = 114$ °C. Dane dotyczące właściwości tworzywa uzyskano od producenta i z doniesień literaturowych.

Proces wytłaczania realizowano w warunkach różnych prędkości obrotowych ślimaka ($N = 40$ obr/min, $N = 80$ obr/min), z zasilaniem dozowanym (za pomocą dozownika ślimakowego, przy natężeniu przepływu tworzywa: $Q = 4$ kg/h, $Q = 8$ kg/h) oraz z zasilaniem bez dozo-

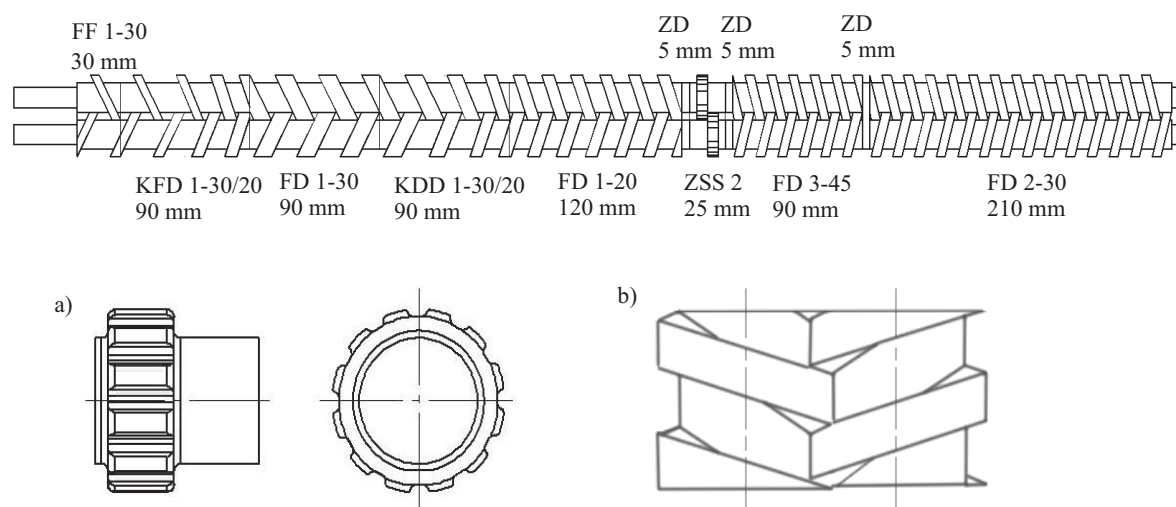
wania. Temperatura cylindra była równa $T_b = 180$ °C, z wyjątkiem strefy zasobnika, gdzie wynosiła $T_b = 150$ °C.

Badania obejmowały ocenę przebiegu uplastyczniania tworzywa metodą bezpośredniej obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka wyciączarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (*Screw Pulling-out Technique*) oraz ocenę stopnia wypełnienia kanału ślimaka wyciączarki, jak również pomiar ciśnienia i momentu obrotowego ślimaka.

Wyniki badań przebiegu uplastyczniania tworzywa i wypełniania kanału ślimaka wyciączarki ilustrują rys. 2–5.

Zaobserwowano, że w pobliżu zasobnika granulki polimeru rozkładają się wokół ślimaków i w wyniku ruchu obrotowego ślimaków są swobodnie transportowane w kierunku głowicy. Większa ilość tworzywa jest transportowana w dolnej części układu uplastyczniającego, a tylko niewielka przemieszcza się w części górnej. Granulki polimeru gromadzą się przy aktywnych ściankach zwoju ślimaków tworząc warstwę stałą, która jest nagrzewana przez cylinder oraz zgniatana w szczelinie międzywałcowej, w wyniku czego się uplastycznia. Długość i szerokość uplastyczniającej się stałej warstwy zmniejsza się w kierunku osi ślimaków. W rezultacie przyjmuje ona charakterystyczny kształt „choinki”.

Rysunki 2–4 przedstawiają ślimaki wyjęte z wyciączarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (w widoku „od dołu”), po wytłaczaniu z różnym natężeniem przepływu i różną prędkością obrotową ślimaków. Widać wyraźnie, że wypełnienie ślimaków zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa i spadkiem prędkości obrotowej ślimaków. Podobnie zmienia się również długość strefy całkowitego wypełnienia ślimaków w końcowej części układu ślimakowego, gdzie jest generowane ciśnienie niezbędne do wytłoczenia tworzy-



Rys. 1. Schemat układu ślimakowego przeciwbieżnego wyciączarki Leistritz ZSE 27HP: a) element ścinający (ZSS 2), b) element ściśle ząbujący się (FD 2-30)

Fig. 1. Counter-rotating screw configuration of the Leistritz ZSE 27HP extruder: a) shearing element (ZSS 2), b) thick flighted element (FD 2-30)

Rys. 2
Fig. 2

Rys. 2. Ślimaki wyjęte z wylotowej części wyciągarki po wytlaczaniu z natężeniem przepływu $Q = 4 \text{ kg/h}$ i prędkością obrotową ślimaków $N = 40 \text{ obr/min}$ (widok „od dołu”)

Fig. 2. Screws removed from the extruder after extrusion at a feed rate (Q) of 4 kg/h and screw rotational speed (N) of 40 rpm (bottom view)

Rys. 3
Fig. 3

Rys. 3. Ślimaki wyjęte z wylotowej części wyciągarki po wytlaczaniu z natężeniem przepływu $Q = 4 \text{ kg/h}$ i prędkością obrotową ślimaków $N = 80 \text{ obr/min}$ (widok „od dołu”)

Fig. 3. Screws removed from the extruder after extrusion at a feed rate (Q) of 4 kg/h and screw rotational speed (N) of 80 rpm (bottom view)

Rys. 4
Fig. 4

Rys. 4. Ślimaki wyjęte z wylotowej części wyciągarki po wytlaczaniu z natężeniem przepływu $Q = 8 \text{ kg/h}$ i prędkością obrotową ślimaków $N = 80 \text{ obr/min}$ (widok „od dołu”)

Fig. 4. Screws removed from the extruder after extrusion at a feed rate (Q) of 8 kg/h and screw rotational speed (N) of 80 rpm (bottom view)

wa przez głowicę. Całkowite wypełnienie ślimaków obserwuje się także w obszarze elementów ścinających, gdzie też jest generowane ciśnienie.

Rysunek 5 przedstawia próbkę tworzywa zdjętą ze ślimaków w obszarze uplastyczniania tworzywa.



Rys. 5. Próbkę tworzywa zdjętą ze ślimaków w obszarze uplastyczniania

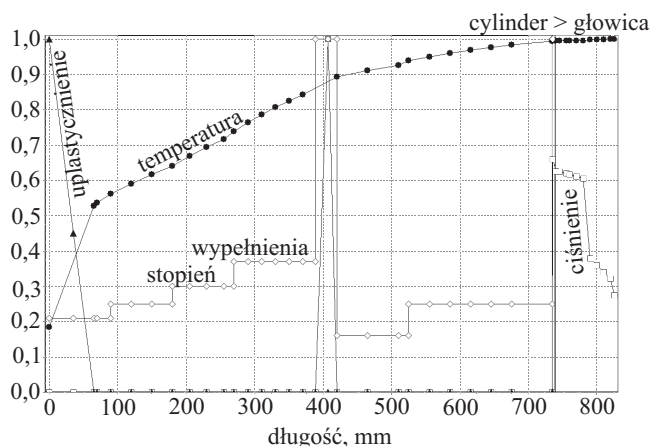
Fig. 5. Polymer sample stripped off from the plasticization area of the screws

Wygląd tej próbki potwierdza mechanizm uplastyczniania zaproponowany w pracach [4, 5].

OBLICZENIA SYMULACYJNE

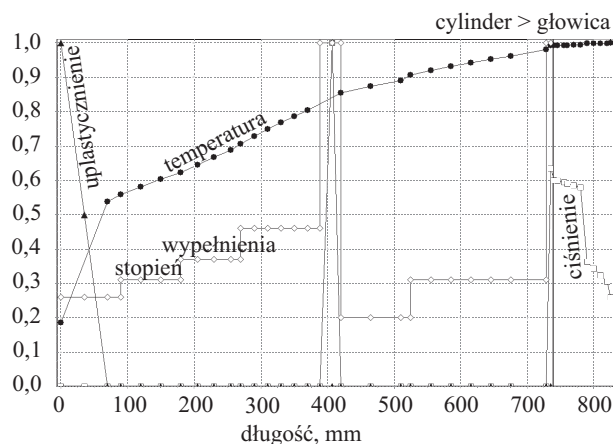
Podstawą obliczeń symulacyjnych jest znana, w wariancie wytłaczania z dozowaniem, wartość natężenia przepływu tworzywa w wyciągarkach. Wartość natężenia przepływu oraz charakterystyka geometryczna głowicy pozwala — przy wstępnym założeniu temperatury tworzywa u wylotu wyciągarki — na określenie wartości ciśnienia w tym miejscu. Wartość ta jest równa spadkowi ciśnienia w głowicy wynikającego z jej charakterystyki. Z kolei, na podstawie charakterystyki przepływu tworzywa w układzie ślimakowym można wyznaczyć gradient ciśnienia w kanale ślimaka w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu tworzywa („do tyłu” — backward). Tworzywo przestaje wypełniać w całości kanał ślimaka gdy gradient ciśnienia zmniejsza się do zera. Uwzględniając kształt geometryczny ślimaka można wówczas ocenić stopień wypełnienia kanału. Analiza płynięcia tworzywa wiąże się z bilansem energii, obliczenia gradientu ciśnienia prowadzi się zatem równocześnie z interakcyjnymi obliczeniami dotyczącymi zmian temperatury, „krok po kroku” w kierunku zasobnika. W miejscu, gdzie kończy się proces uplastyczniania tworzywa, tzn. na końcu strefy uplastyczniania, wartość temperatury uzyskiwana w wyniku obliczeń jest porównywana z rzeczywistą wartością temperatury uplastyczniania tworzywa. Gdy wielkości te są równe, obliczenia się kończą. W przeciwnym przypadku koryguje się wstępnie przyjętą wartość temperatury u wylotu wyciągarki i powtarza się obliczenia.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w warunkach odpowiadających warunkom badań doświadczalnych, przy różnych wartościach natężenia przepływu tworzywa ($Q = 4 \text{ kg/h}$ i $Q = 8 \text{ kg/h}$) oraz różnych prędkościach obrotowych ślimaka ($N = 40 \text{ obr/min}$ i $N = 80 \text{ obr/min}$). Określano rozkład ciśnienia i temperatury, przebieg uplastyczniania tworzywa oraz stopień wypełnienia kanału ślimaka.



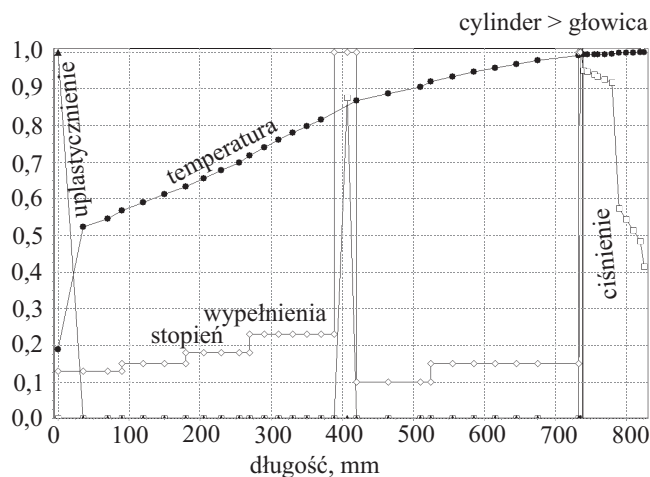
Rys. 6. Wyniki symulacji w warunkach natężenia przepływu tworzywa $Q = 4$ kg/h i prędkości obrotowej ślimaka $N = 40$ obr/min

Fig. 6. Simulation results for extrusion at a flow rate (Q) of 4 kg/h and screw rotational speed (N) of 40 rpm



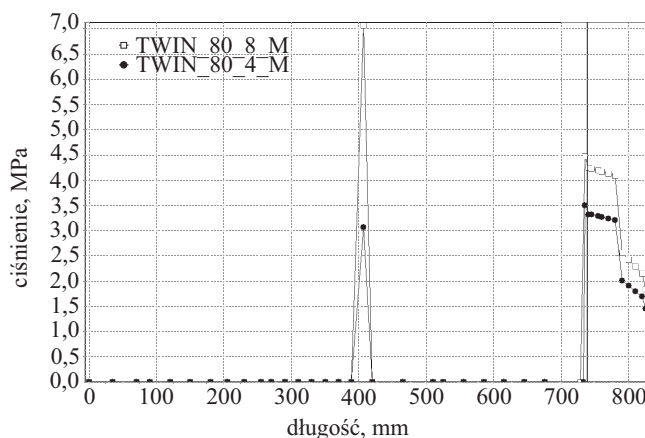
Rys. 8. Wyniki symulacji w warunkach natężenia przepływu tworzywa $Q = 8$ kg/h i prędkości obrotowej ślimaka $N = 80$ obr/min

Fig. 8. Simulation results for extrusion at a flow rate (Q) of 8 kg/h and screw rotational speed (N) of 80 rpm



Rys. 7. Wyniki symulacji w warunkach natężenia przepływu tworzywa $Q = 4$ kg/h i prędkości obrotowej ślimaka $N = 80$ obr/min

Fig. 7. Simulation results for extrusion at a flow rate (Q) of 4 kg/h and screw rotational speed (N) of 80 rpm



Rys. 9. Wyniki obliczeń symulacyjnych rozkładu ciśnienia przy prędkości obrotowej ślimaków $N = 80$ obr/min i natężeniu przepływu $Q = 4$ kg/h (TWIN_80_4_M) oraz $Q = 8$ kg/h (TWIN_80_8_M)

Fig. 9. Simulation results for pressure profile at a screw speed (N) of 80 rpm and flow rates (Q) of 4 kg/h (TWIN_80_4_M) and 8 kg/h (TWIN_80_8_M)

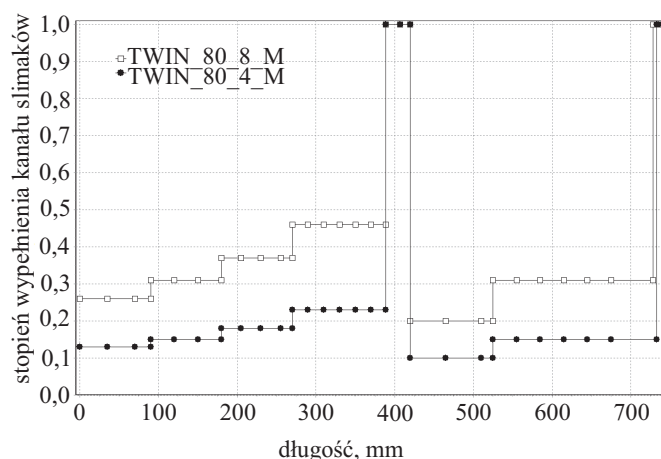
Z przedstawionych na rys. 6–8 obliczeń wynika, że ze wzrostem natężenia przepływu długość strefy uplastyczniania tworzywa zwiększa się, co oznacza, że uplastycznianie kończy się bliżej głowicy. Towarzyszy temu zwiększenie długości strefy kanału ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem. Ze wzrostem zaś prędkości obrotowej ślimaka długość strefy uplastyczniania się zmniejsza, a więc proces uplastyczniania kończy się bliżej zasobnika. Skracą się przy tym również długość strefy ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem. Wpływ natężenia przepływu tworzywa na rozkład ciśnienia oraz stopień wypełnienia kanałów układu ślimakowego pokazano na rys. 9, 10.

W każdym przypadku obliczeń, wzrost ciśnienia w układzie uplastyczniającym wylączarki jest równo-

ważny spadkowi ciśnienia w głowicy. Zmniejszenie ciśnienia w układzie uplastyczniającym do zera powoduje, że kanał ślimaka przestaje całkowicie wypełniać tworzywo. Punkt załamania na krzywej rozkładu temperatury odpowiada końcowi uplastyczniania tworzywa. Temperatura tworzywa jest wówczas równa temperaturze uplastyczniania, która stanowi kryterium zbieżności obliczeń iteracyjnych komputerowego modelu procesu.

OCENA MODELU

Ocenę modelu przeprowadzono na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych i symulacyjnych.



Rys. 10. Wyniki obliczeń symulacyjnych rozkładu stopnia wypełnienia kanału ślimaków przy prędkości obrotowej ślimaków $N = 80$ obr/min i natężeniu przepływu $Q = 4$ kg/h (TWIN_80_4_M) oraz $Q = 8$ kg/h (TWIN_80_8_M)

Fig. 10. Simulation results for filling of the channel at a screw speed (N) of 80 rpm and flow rates (Q) of 4 kg/h (TWIN_80_4_M) and 8 kg/h (TWIN_80_8_M)

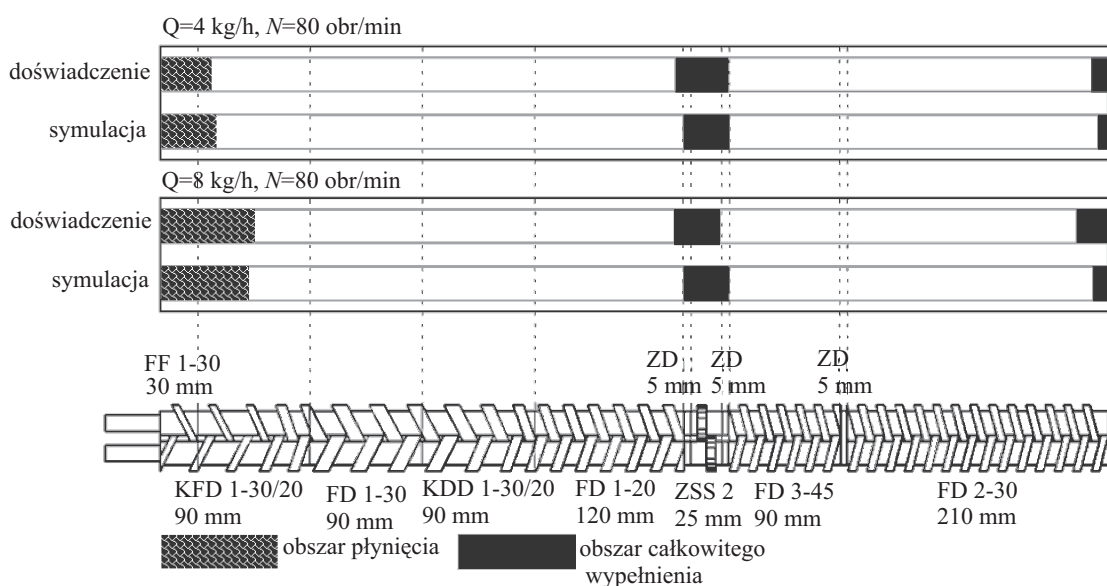
Na rys. 11, 12 przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych przebiegu uplastyczniania tworzywa i stopnia wypełnienia kanału ślimaka w warunkach różnych wartości natężenia przepływu tworzywa $Q = 4$ kg/h i $Q = 8$ kg/h oraz różnej prędkości obrotowej ślimaka, odpowiednio, $N = 40$ obr/min i $N = 80$ obr/min.

Otrzymane dane są jakościowo zgodne. W obydwu przypadkach ze wzrostem natężenia przepływu zwiększa się zarówno długość strefy uplastyczniania tworzy-

wa, jak i długość strefy kanału ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem (rys. 11). Natomiast, ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka, zmniejsza się długość zarówno strefy uplastyczniania tworzywa, jak i długość strefy ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem (rys. 12). Powyższe zależności wynikają z faktu, że ze wzrostem natężenia przepływu przy stałej prędkości obrotowej lub ze zmniejszeniem prędkości obrotowej przy stałym natężeniu przepływu zwiększa się ilość tworzywa w układzie ślimakowym.

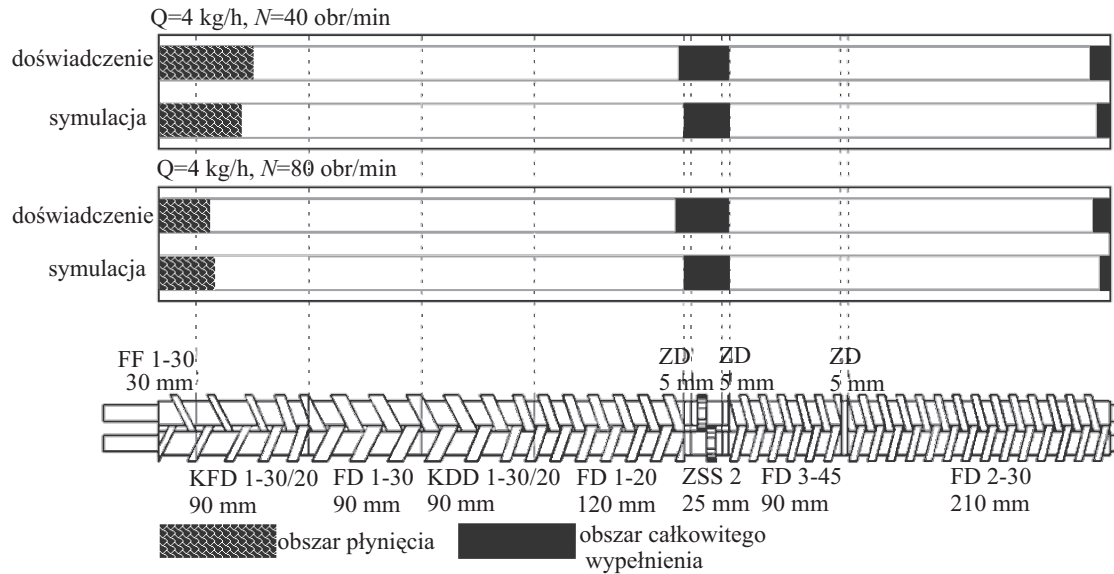
Na rys. 13 zestawiono przykładowe wyniki pomiarów momentu obrotowego oraz wyniki obliczeń symulacyjnych i pomiarów ciśnienia u wlotu do głowicy wylączarskiej, przy prędkości obrotowej ślimaków $N = 80$ obr/min i różnych wartościach natężenia przepływu: $Q = 4$ kg/h, $Q = 8$ kg/h i $Q = 18$ kg/h (zasilanie bez dozowania). Zgodnie z oczekiwaniami, ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa rośnie zarówno ciśnienie, jak i moment obrotowy. Zgodność wyników obliczeń i pomiaru ciśnienia jest bardzo dobra.

Podsumowując, można stwierdzić, że rozbieżności między obliczeniami i wynikami pomiarów wynikają z uproszczeń modelu oraz niedokładności danych wejściowych do obliczeń, np. materiałowych. Warto zwrócić uwagę, że zastosowanie metody MES umożliwia zadowalające przewidywanie długości strefy ślimaków całkowicie wypełnionej tworzywem, co jest konsekwencją w miarę dokładnych obliczeń gradientu ciśnienia. Widoczne jest jednak pewne, powtarzalne niedoszacowanie tej długości w stosunku do uzyskiwanej doświadczalnie. Można przypuszczać, że zastosowanie analizy nieizotermicznej pozwoli na usunięcie tych rozbieżności.



Rys. 11. Wyniki obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych wytłaczania przy prędkości obrotowej ślimaka $N = 80$ obr/min i różnych wartościach natężenia przepływu tworzywa: $Q = 4$ kg/h (TWIN_80_4_M), $Q = 8$ kg/h (TWIN_80_8_M)

Fig. 11. Simulation and experimental results for extrusion at a screw rotational speed (N) of 80 rpm and various flow rates (Q) of 4 kg/h (TWIN_80_4_M) and 8 kg/h (TWIN_80_8_M)



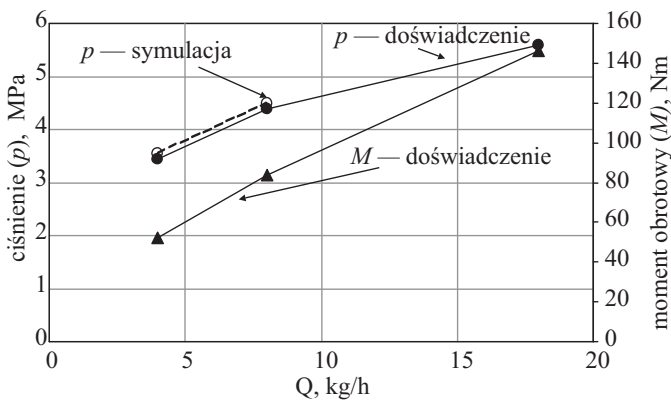
Rys. 12. Wyniki obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych wytłaczania przy natężeniu przepływu tworzywa $Q = 4 \text{ kg/h}$ i różnej prędkości obrotowej ślimaka: $N = 40 \text{ obr/min}$ (TWIN_40_4_M), $N = 80 \text{ obr/min}$ (TWIN_80_4_M)

Fig. 12. Simulation and experimental results for extrusion at a flow rate (Q) of 4 kg/h and various screw rotational speeds $N = 40 \text{ rpm}$ (TWIN_40_4_M) and $N = 80 \text{ rpm}$ (TWIN_80_4_M)

PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników badań wytłaczania polietyle-
nu małej gęstości dokonano weryfikacji modelu przebie-
gu uplastyczniania tworzywa w stanie uplastycznionym.

Weryfikacja potwierdziła prawidłowość przyjętych za-
łożeń i uzyskanych rozwiązań. Wyniki obliczeń i doświad-
czeń były jakościowo zgodne, a rozbieżności ilościowe



Rys. 13. Wyniki pomiarów momentu obrotowego oraz wyniki obliczeń symulacyjnych i pomiarów ciśnienia u wlotu do głowicy wytłaczarskiej, w różnych warunkach przetwórstwa (prędkość obrotowa ślimaków $N = 80 \text{ obr/min}$, natężenie przepływu: $Q = 4 \text{ kg/h}$, $Q = 8 \text{ kg/h}$, $Q = 18 \text{ kg/h}$ — zasilenie bez dozowania)

Fig. 13. Results of torque measurements, and the results of predicted and measured pressure at the inlet of die, at various operating conditions [screw rotational speed $N = 80 \text{ rpm}$, flow rates $Q = 4 \text{ kg/h}$, 8 kg/h (starve feeding) and $Q = 18 \text{ kg/h}$ (flood feeding)]

mogły być efektem m.in. niedokładności danych wejściowych do obliczeń i uproszczeń opracowanego modelu.

Stwierdzono, że ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa zwiększa się długość zarówno strefy uplastyczniania tworzywa, jak i strefy kanału ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem. Natomiast, ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka, długość strefy uplastyczniania tworzywa zmniejsza się, podobnie jak długość strefy ślimaka całkowicie wypełnionej tworzywem. Ciśnienie tworzywa u wlotu do głowicy w zasadzie nie zależy od prędkości obrotowej ślimaka (tylko w rozpatrywanym przypadku wytłaczania z dozowanym zasileniem). Zmiana natomiast ciśnienia w głowicy zależy przede wszystkim od natężenia przepływu, które podczas wytłaczania z dozowanym zasileniem jest ustalone.

Autorzy składają podziękowania kierownictwu Głównego Instytutu Górniczego w Katowicach oraz kierownictwu Zakładu Inżynierii Materiałowej tego Instytutu, prof. dr hab. Krys-
tynie Czaplückiej-Kolarz i dr. inż. Henrykowi Rydarowskiemu za umożliwienie przeprowadzenia badań doświadczalnych procesu wytłaczania dwuślimakowego oraz mgr inż. Joannie Len-
ży i mgr. inż. Jackowi Mamosowi za życzliwą pomoc przy wykonaniu tych badań.

LITERATURA

1. Wilczyński K., Lewandowski A.: *Polimery* 2010, **55**, nr 11–12.
2. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2008, **53**, 754.
3. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2009, **54**, 51.
4. Wilczyński K., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 2001, **16**, 257.
5. Wilczyński K., White J. L.: *Polym. Eng. Sci.* 2003, **43**, 1715.

Otrzymano 4 XII 2009 r.