

TOMASZ RYDZKOWSKI

Politechnika Koszalińska  
Katedra Inżynierii Spożywczej i Tworzyw Sztucznych  
ul. Raławicka 15—17, 75-620 Koszalin  
e-mail: tomasz.rydzkowski@tu.koszalin.pl

## Stopień uplastycznienia wytłoczyny uzyskiwanej w warunkach autotermicznej pracy wytłaczarki ślimakowo-tarczowej

**Streszczenie** — Omówiono genezę i teoretyczne podstawy własnej konstrukcji autotermicznej wytłaczarki ślimakowo-tarczowej, charakteryzując przy tym cechy geometryczne oraz możliwości przetwórcze takiego urządzenia, wykorzystanego w opisywanej pracy doświadczalnej. Przedstawiono wnioski z wyników badań symulacyjnych dotyczących pomiarów ciśnienia i temperatury tworzywa (polietylenu małej gęstości, PE-LD) na powierzchniach ślimaka (aktywnej, biernej, rdzenia) oraz wewnątrz tworzywa, generowanych na długości kanału ślimaka. Wyniki te potwierdziły słuszość teorii aktywnej strefy zasilania — udowodniono mianowicie występowanie efektu autotermicznego wytłaczania w warunkach małej szybkości obrotowej ślimaka. Uzyskiwana wówczas wytłoczyna charakteryzuje się interesującymi właściwościami, odmiennymi od właściwości wytłoczyny otrzymywanej w klasycznej wytłaczarce. Cechy te mogą predestynować badane urządzenie do przetwarzania materiałów pochodzących z recyklingu.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie autotermiczne, wytłaczarka ślimakowo-tarczowa, polietylen małej gęstości, uplastycznianie, charakterystyka wytłoczyny.

### PLASTICIZATION DEGREE OF EXTRUDATE OBTAINED DURING AUTOTHERMAL WORK OF SCREW-DISC EXTRUDER

**Summary** — The genesis and theoretical fundamentals of the own construction of autothermal screw-disc extruder are discussed. The geometrical features and processing possibilities of such equipment, used in experimental work (Fig. 2) are described. The conclusions drawn from simulations concerning pressure and temperature of polymer (PE-LD) on screw surfaces (active, passive and core ones) and inside the polymer, generated along the screw channel length (Fig. 1), are given. The results confirmed the wisdom of a theory of active feeding zone as it was proved that autothermal effect occurred during extrusion at low rotational speed of screw (Fig. 3). Extrudate obtained in such conditions shows interesting properties, differing from those shown by extrudate obtained in classical extruder. All this can predestine the equipment to use in recycled materials processing.

**Key words:** autothermal extrusion, screw-disc extruder, PE-LD, plasticization, characteristics of extrudate.

### OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROCESU WYTŁACZANIA AUTOTERMICZNEGO

Metoda wytłaczania, będąca obok wtryskiwania najpowszechniejszym klasycznym sposobem przetwarzania tworzyw wielkocząsteczkowych, wciąż jeszcze wzbudza żywe zainteresowanie badaczy (por. np. [1—3]).

Okolo połowy ubiegłego wieku stwierdzono, że wytłaczanie polimerów może odbywać się bez konieczności doprowadzania do układu uplastyczniającego energii w postaci ciepła. Zagadnieniem tym zajmowali się wówczas przede wszystkim McKelvey [4, 5], Beck [6, 7] i Aida [8]. Stwierdzili oni, że strumień ciepła generowany wskutek tarcia wewnątrz tworzywa oraz tarcia tworzywa o elementy układu uplastyczniającego może, z za-

chowaniem pewnych warunków, wystarczyć do poprawnego uplastycznienia polimeru. Proces taki nazywany jest wytłaczaniem autotermicznym; stosuje się go sporadycznie, zwykle tylko do powlekania przewodów izolacją lub wytwarzania folii. Jego realizacja z wykorzystaniem nieautotermicznych klasycznych wytłaczarek wymaga jednak znacznej szybkości obrotowej ślimaka odpowiadającej liniowej prędkości obwodowej w przedziale 0,8—1,5 m/s [9—12].

W literaturze podkreśla się następujące zalety wytłaczania autotermicznego w porównaniu z wytłaczaniem konwencjonalnym [9, 10]: dużą sprawność energetyczną, małe jednostkowe zużycie energii, dużą wydajność, równomierne nagrzewanie całej masy tworzywa (ciepło powstaje bezpośrednio w tym materiale), zwiększenie jednorodności uplastycznienia, dobrą homogenizację

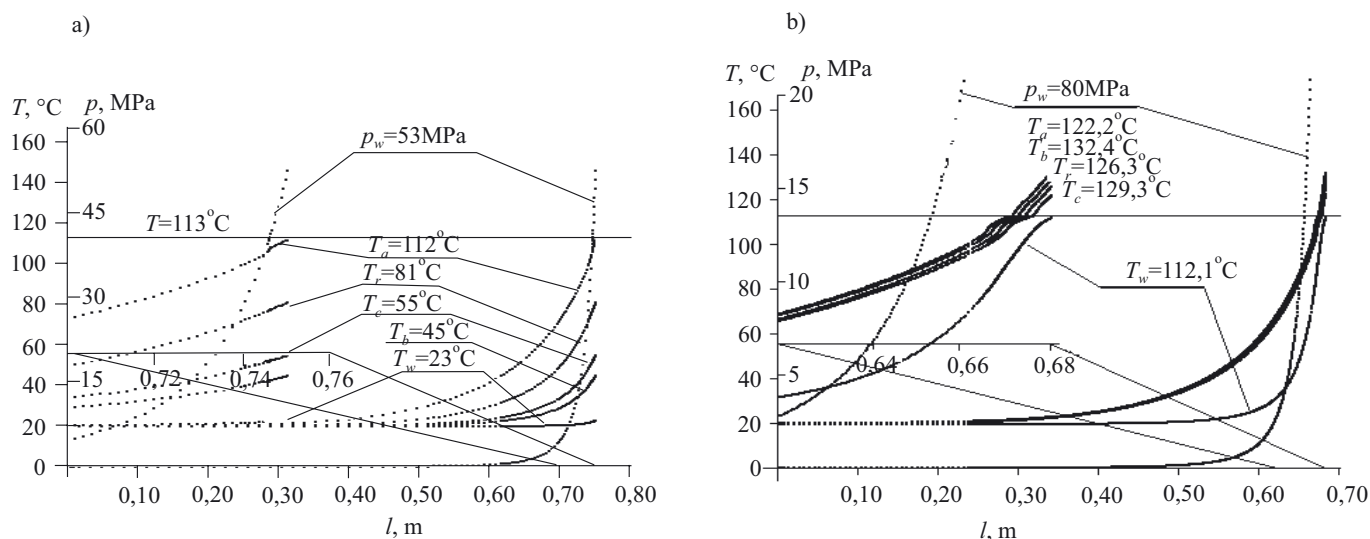
tworzywa, krótki czas przebywania materiału w układzie uplastyczniającym, korzystny stosunek ciężaru odpowiedniego urządzenia do jego wydajności, a także niewielkie wymiary takiej instalacji. Niestety, ten typ wytłaczania ma również poważne wady [9, 10], mianowicie trudności w sterowaniu generowaniem ciepła oraz zwiększony rozrzut właściwości wytłoczony. Jedynym czynnikiem, poprzez który można wpływać na przebieg procesu, jest szybkość obrotowa ślimaka, należy jednak przy tym uwzględnić fakt, że dodatkowo ślimak jest poddawany działaniu dużego momentu skręcającego, który może doprowadzić nawet do jego zniszczenia.

J. Diakun opracował teorię aktywnej strefy zasilania, uwzględniającą mechanizm oddziaływania rowków oraz opisującą kompleksowo procesy cieplne zachodzące w tej strefie [13]. Teoria ta została wykorzystana przez Diakuna i Bila do obliczeń optymalizacyjnych oraz symulacji komputerowej procesu. Na podstawie analizy uzyskanych wyników wybrali oni zespół optymalnych cech geometryczno-konstrukcyjnych wytłaczarki ślimakowo-tarczowej [14–16] i przeprowadzili w odniesieniu do tych czynników obliczenia symulacyjne określa-

gdzie następuje ujednorodnienie temperatury i pełne przetopienie tworzywa. W przypadku układów uplastyczniających o optymalnych cechach [14–17] obliczone wartości temperatury są do siebie zbliżone (linie obrazujące przebiegi temperatury w poszczególnych miejscach leżą w niewielkiej od siebie odległości) a temperatura wewnątrz tworzywa szybko uzyskuje wartość temperatury topnienia (rys. 1b).

Tymi symulacjami T. Bil i J. Diakun potwierdzili, że możliwa jest budowa układów uplastyczniających, w których — dzięki zbliżonym wartościom temperatury na poszczególnych powierzchniach układu ślimakowego i wewnątrz tworzywa — pełne uplastycznienie może nastąpić już na końcu strefy zasilania.

Stwierdzono, że wytłaczarki działające autotermicznie można konstruować z wykorzystaniem dwóch wariantów. Możliwe jest więc po pierwsze skrócenie długości układu uplastyczniającego o strefę stapiania, gdzie, zgodnie z klasycznymi rozwiązaniami, następowałoby powolne stapianie tworzywa. Inną możliwością stanowi odejście od klasycznych cech geometryczno-konstrukcyjnych i zaprojektowanie oryginalnej wytła-



Rys. 1. Wyniki obliczeń symulacyjnych ciśnienia ( $p$ ) i temperatury tworzywa ( $T$ ) na powierzchniach: ślimaka (aktywnej —  $T_a$ ; biernej —  $T_b$ ; rdzenia —  $T_r$ ), cylindra ( $T_c$ ), oraz wewnątrz tworzywa ( $T_w$ ), generowanych na długości kanału ślimaka ( $l$ ) w przypadku: a) konstrukcji standardowej, b) konstrukcji optymalnej [17]

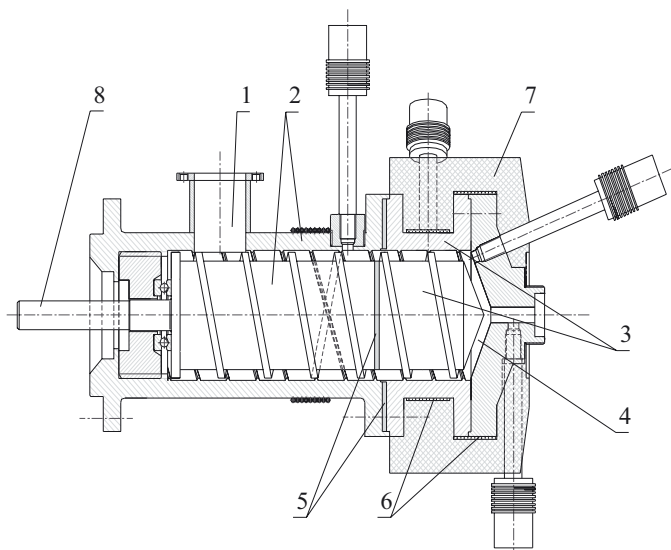
Fig. 1. Results of simulation calculations of polymer pressure ( $p$ ) and temperature ( $T$ ) on the surfaces of: screw (active one —  $T_a$ ; passive one —  $T_b$ ; core —  $T_r$ ), cylinder ( $T_c$ ) and inside the polymer ( $T_w$ ), generated along the screw channel length ( $l$ ) in case of a) standard construction, b) optimal construction [17]

jące temperaturę i ciśnienie panujące na poszczególnych powierzchniach układu uplastyczniającego [17]. Dla porównania wykonano też symulacje dotyczące układu uplastyczniającego o klasycznych cechach geometryczno-konstrukcyjnych. Wyniki obu symulacji przedstawiono graficznie na rys. 1.

Jak widać, w układach klasycznych występują duże różnice temperatury na poszczególnych powierzchniach (rys. 1a), zatem konieczne jest istnienie strefy przemiany,

czarki charakteryzującej się krótkim ślimakiem dużej średnicy i o skoku zwoju znacznie mniejszym od średnicy ślimaka.

Zgodnie z powyższymi rozważaniami opracowano i opatentowano koncepcję budowy autotermicznego układu uplastyczniającego ślimakowo-tarczowego [18]. Wykonano również odpowiadający tej koncepcji prototyp eksperymentalnej, autotermicznej wytłaczarki ślimakowo-tarczowej z takim właśnie układem uplastycz-



Rys. 2. Przekrój układu uplastyczniającego wylączarki ślimakowo-tarczowej: 1 — lej zasypowy, 2 — zimna strefa ślimaka i cylindra, 3 — gorąca strefa ślimaka i cylindra, 4 — szczelina, 5 — przelotki izolacyjne, 6 — grzejniki elektryczne, 7 — izolacja termiczna, 8 — wał napędowy

Fig. 2. Longitudinal section of the plasticizing system of screw-disc extruder: 1 — charging hopper, 2 — cold zone of the screw and cylinder, 3 — hot zone of the screw and cylinder, 4 — gap, 5 — insulating separators, 6 — electric heaters, 7 — thermal insulation, 8 — drive shaft

niającym (rys. 2). Charakteryzuje się ona szeregiem następujących oryginalnych cech:

- stosunek długości ślimaka do jego średnicy wynosi 2 (w wylączarkach klasycznych mieści się w przedziale 25—30);

- rowki skrętne są obecne na całej długości wewnętrznej powierzchni cylindra;

- pomiędzy czołem ślimaka i pokrywą cylindra występuje stożkowa szczelina, której szerokość można zmieniać za pomocą specjalnie zaprojektowanego mechanizmu;

- zastosowano podział ślimaka oraz cylindra na strefę gorącą i zimną, poprzez wprowadzenie warstwy izolacji termicznej pomiędzy tymi strefami.

Podział na strefy wynika tu z przewidywanego modelem symulacyjnym rozkładu temperatury tworzywa na długości cylindra (rys. 1b). Szybkość obrotową ślimaka można nastawiać w zakresie od 12 do 40 obrotów na minutę, co odpowiada liniowej prędkości obwodowej mieszczącej się w przedziale 0,08—0,27 m/s. Wartości te są więc znacznie mniejsze niż wspomniany już uprzednio zakres prędkości wylączania autotermicznego w klasycznych wylączarkach i odpowiadają konwencjonalnemu działaniu wylączarek ślimakowych.

Niniejsza publikacja powstała w rezultacie zrealizowania cyklu badań procesu autotermicznego wylączania ślimakowo-tarczowego i dotyczy jakości wylączyny uzyskiwanej w takim procesie. Stanowi ona wprowadzenie do kolejnych artykułów przedstawiających szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań.

dzenie do kolejnych artykułów przedstawiających szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań.

#### CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Zastosowany w opisywanej pracy materiał stanowił polietylen małej gęstości (PE-LD) Malen E FABS produkcji firmy BasellOrlen Polyolefins.

Uplastycznione tworzywo kształtowano za pomocą głowicy wylączarskiej z dyszą kołową, uzyskując pręt średnicy 15 mm. Pomimo wspomnianej już małej, nietypowej dla badanego procesu autotermicznego wylączania szybkości obrotowej ślimaka (12—40 obr./min) w całym badanym jej zakresie uzyskano efekt wylączania bez dostarczania ciepła z zewnętrznych grzejników.

Wylączanie zrealizowano w szerokim przedziale zmian pozostałych parametrów: szerokości szczeliny od 0,5 mm do 6 mm, rozruchowej temperatury strefy gorącej od 90 °C do 150 °C oraz stopnia dławienia wypływu poprzez zastosowanie dysz o następujących średnicach otworów: 3,5; 5,0; 7,0; 10 lub 14 mm.

Jakość wylączyny oceniano wizualnie.

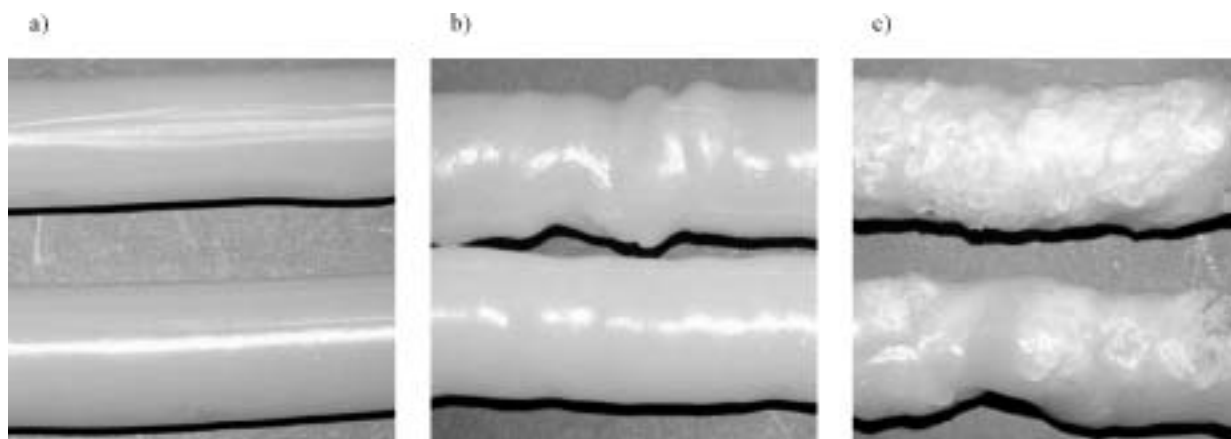
#### WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

W zależności od parametrów procesu wylączania autotermicznego uzyskuje się wylączyny, których jakość przypisuje się jednej z trzech poniższych klas:

- **Klasa pierwsza** obejmuje właściwą, poprawną wylączynę (rys. 3a), charakteryzującą się w pełni przepionym tworzywem oraz gładką i równą powierzchnią. Taka postać wylączyny potwierdza występowanie efektu autotermiczności.

- **Klasa druga** to również w pełni uplastyczniony polietylen, ale w postaci wylączyny o powierzchni nieco pokarbowanej (rys. 3b). W wylączynie opuszczającej dyszę głowicy obserwuje się niekiedy zanikające pojedyncze granulki PE-LD, które ulegają stopieniu i po chwili nie są już widoczne. Na podstawie wyglądu wylączyny można stwierdzić, że wylączanie odbywa się na granicy stanu autotermiczności, kiedy to niewielka korekta parametrów pracy wylączarki pozwala na osiągnięcie stanu autotermiczności.

- **Klasa trzecia**, w przypadku której są możliwe w zasadzie dwie sytuacje: bądź znaczną część przekroju wylączyny stanowi uplastyczniony polietylen (rys. 3c, fragment dolny), bądź też poza rdzeniem i cienką warstwą zewnętrzną cała reszta przekroju wylączyny to ledwie nadtopione i zlepione granulki tworzywa (rys. 3c, fragment górny), co świadczy o braku efektu dostatecznego samonagrzewania polimeru, a więc braku zjawiska autotermiczności. Powiązanie wyglądu wylączyny z kierunkiem zmian temperatury (wzrost, stabilizacja, spadek) w strefie tarczowej stało się podstawą opracowanej w naszym zespole ośmiopunktowej skali oceny stanu autotermiczności [19], która pozwoliła na ustalenie przedziału działania urządzenia bez ogrzewania z zewnątrz.



Rys. 3. Jakość wytłocznyn uzyskiwanych w badaniach procesu wytłaczania autotermicznego z zastosowaniem eksperymentalnej wytłaczarki ślimakowo-tarczowej: a) klasa I, b) klasa II, c) klasa III (por. tekst)

Fig. 3. Quality of extrudates obtained during investigations of autothermal extrusion with use of experimental screw-disc extruder: a) class I, b) class II, c) class III (see text)

Wytłocznę I klasy uzyskiwano, gdy nastawiano średnie wartości szerokości (0,5—1,5 mm) szczeliny czołowej i ślimak obracał się w zakresie średnich lub małych wartości szybkości obrotowych (12—25 obr./min). Gdy szerokość szczeliny była mniejsza niż 0,5 mm ilość generowanego ciepła stawała się zbyt duża i układ uplastyczniający, pomimo chłodzenia, rozgrzewał się nadmiernie. Podobnie, nie udało się uzyskać pracy autotermicznej w warunkach dużej szybkości obrotowej ślimaka. Generowana ilość ciepła również przekraczała wówczas ilości potrzebne do uplastycznienia polimeru, zatem następowało podgrzewanie ślimaka i cylindra. Ponadto, wskutek przewodzenia ciepła nadmiernie podgrzewała się zimna strefa cylindra i ślimaka — tworzywo zbyt szybko zaczynało się uplastyczniać, a ślimak nie był w stanie wytworzyć ciśnienia niezbędnego do właściwego uplastycznienia w strefie tarczowej.

Omówione wyniki doświadczalne potwierdziły więc teoretycznie przewidywaną możliwość uzyskania autotermicznego wytłaczania PE-LD w obszarze małych wartości szybkości obrotowej ślimaka. Ustalono zakres nastaw badanych parametrów (szybkość obrotowa, szerokość szczeliny czołowej i średnica otworu dyszy) zapewniających, że wytłaczanie może być realizowane z zachowaniem warunków autotermiczności [19].

W celu poznania właściwości przetwórczych badanego procesu wytłaczania ślimakowo-tarczowego oceniono jego wpływ na destrukcję tworzywa poddanego wielokrotnemu wytłaczaniu w takich warunkach. Określono mianowicie właściwości uzyskanych w ten sposób wytłocznyn i porównano je z odpowiednimi właściwościami otrzymywanych za pomocą klasycznej wytłaczarki [20—22]. Przeprowadzono też porównawcze badania stopnia zdyspergowania składników podczas wytłaczania [23—25]. Stwierdzono, że omawiana tu wytłaczarka ślimakowo-tarczowa charakteryzuje się bardzo interesującymi, odróżniającymi ją od wytłaczarek klasycznych, właściwościami przetwórczymi.

Aby wyjaśnić przyczyny tych różnic, Diakun i Michalska-Požoga przeprowadzili symulacje komputerowe ruchu łańcuchów uplastycznionego polietyleny w strefie tarczowej wytłaczarki [26]. Analizie poddano trajektorie, po których przemieszczają się końce łańcucha modelowej makrocząsteczki PE-LD w modelu tej strefy. Końce skłębionego łańcucha początkowo znajdują się tam blisko siebie, lecz ruch tworzywa w strefie tarczowej powoduje znaczne oddalenie od siebie wspomnianych końcówek. Na tej podstawie przyjęto, że uplastycznianie w strefie tarczowej może powodować rozprostowywanie się naturalnie skłębionych makrocząsteczek. Wskutek tego, w odpowiednich warunkach pracy wytłaczarki, może następować wzrost uporządkowania łańcuchów polimeru, a — co potwierdziły badania stopnia krystaliczności — proste łańcuchy sprzyjają tworzeniu krystalitów. Tworzywo uplastyczniane w strefie tarczowej charakteryzuje się mianowicie wyższym stopniem krystaliczności od uplastycznianego klasycznie i ma odmienne właściwości wytrzymałościowe [22].

#### PODSUMOWANIE I ZAMIERZONE KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Doświadczalnie potwierdzono słuszność teorii aktywnej strefy zasilania sformułowanej przez Diakuna. Uzyskano poprawną wytłocznę w warunkach pracy autotermicznej. Ustalono zakresy nastaw parametrów procesu pozwalające na uzyskiwanie poprawnej wytłoczyny bez dostarczania do układu energii cieplnej; w tych zakresach uplastycznianie w strefie tarczowej może odbywać się autotermicznie.

Badania procesu wytłaczania ślimakowo-tarczowego są w naszym zespole kontynuowane. Obecnie ocenia się możliwości zastosowania tego urządzenia do przetwórstwa tworzyw pochodzących z recyklingu. Stwierdzono już, na przykład, że dzięki szczelinie strefy tarczowej można uzyskać lepszą homogenizację uplastycznione-

go, wieloskładnikowego recyklatu [27, 28]. Dalsze zaplanowane prace badawcze obejmą swoim zakresem również doświadczalne potwierdzenie wniosków wynikających z analizy wyników symulacji komputerowych.

## LITERATURA

1. Sasimowski E.: *Polimery* 2008, **53**, 47.
2. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2008, **53**, 754.
3. Maridas B., Grupta B. R.: *Polimery* 2007, **52**, 456.
4. McKelvey J. M., Bernhart E. C.: *Soc. Plast. Eng. J.* 1954, **10**, Nr 3, 22.
5. McKelvey J. M.: *Ind. Eng. Chem.* 1954, **46**, 660.
6. Beck H.: *Papier Kunstst. Verarbeiter*. 1970, **5**, nr 7, 28.
7. Beck H.: *Brit. Plast.* 1957, **27**, nr 10, 441.
8. Aida F.: *Jap. Plast.* 1975, **9**, nr 3, 18.
9. Sikora J. W.: *Polimery* 1994, **39**, 7.
10. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne Żak, Warszawa 1993 r.
11. Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wytłaczarki”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
12. Stasiak J.: *Inż. Aparat. Chem.* 1976, **15**, 24.
13. Diakun J.: „Podstawy uaktywnienia strefy zasilania w konstrukcji wytłaczarki ślimakowej”, Monografie Wydz. Mech. nr 30, Wydawnictwo Uczelniane WSInż., Koszalin 1991 r.
14. Diakun J.: „Eksperymentalna, autotermiczna wytłaczarka ślimakowo-tarczowa jako wynik obliczeń optymalizacyjnych i symulacyjnych”, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej — VIII Seminarium „Tworzywa sztuczne w budowie maszyn”, Kraków 1997, str. 75—81.
15. Diakun J.: „Ewolucja i nowa koncepcja konstrukcji układu uplastyczniającego wytłaczarki ślimakowej”, w ramach VII Seminarium „Tworzywa sztuczne w budowie maszyn”, Kraków 1994.
16. Diakun J., Bil T.: *Kunststoffberater* 1997, nr 8, 43.
17. Diakun J., Bil T.: *Polimery* 1996, **41**, 53.
18. *Pat. pol.* 174 623 (1998).
19. Rydzkowski T., Diakun J.: „Range of autothermal operation of an experimental screw-disc-type extruder”, Proceedings of 21 Annual Meeting of Polymer Processing Society, Niemcy, Lipsk 2005.
20. Rydzkowski T., Michalska-Požoga L.: „Wpływ wielokrotnego wytłaczania na właściwości konstrukcyjne PE” w pracy zbiorowej „Nowe kierunki modyfikacji i zastosowań tworzyw sztucznych” (red. Jurga J.), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
21. Rydzkowski T.: „Wpływ wielokrotnego wytłaczania na wartość wskaźnika szybkości płynięcia LDPE”, w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo” (red. Koszkuł J., Bociąga E.), Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
22. Rydzkowski T., Michalska-Požoga I.: „Zmiana właściwości LDPE w wyniku wielokrotnego wytłaczania na podstawie badań DSC”, w pracy zbiorowej [21].
23. Radomski G.: *Inż. Aparat. Chem.* 2003, **42**, nr 3, 132.
24. Radomski G.: *Polimery* 2005, **50**, 374.
25. Rydzkowski T.: „Porównanie ujednorodnienia mieszaniny pierwotnego LD-PE, z różnym udziałem recyklatu, wytłaczanej w klasycznym ślimakowym i eksperymentalnym ślimakowo-tarczowym układzie uplastyczniającym”, *Czasopismo Techniczne M-Mechanika*, Rok 103, Nr 6-M/2006, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
26. Diakun J., Michalska-Požoga I.: *Polimery* 2004, **49**, 42.
27. Rydzkowski T., Radomski G.: „Mixing ratio obtained using screw-disc-type and screw extruders; selected properties of regranulate and the original material mixtures” w ramach „Europa/Africa Meeting of the Polymer Processing Society”, Pretoria, South Africa, październik 2006.
28. Michalska-Požoga I., Rydzkowski T.: „Selected rheological and mechanical properties of PE recycdate mixture with different concentration of original LD-PE obtained by screw-disc extrusion”, VII Międzynarodowa Konferencja APT'07 „Advances in Plastics Technology”, Katowice 2007.

Otrzymano 22 II 2008 r.