

# Optymalizacja procesu wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem tworzyw polimerowych – badania symulacyjne

Andrzej Nastaj<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2020.6.6](https://doi.org/10.14314/polimery.2020.6.6)

**Streszczenie:** Na podstawie modelu komputerowego procesu z zastosowaniem technik ewolucyjnych opracowano metodę optymalizacji wytłaczania jednoślimakowego tworzyw polimerowych z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Podstawą metody jest program symulacji procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem GSEM oraz specjalnie w tym celu zbudowany program optymalizacyjny GASEO. Program GSEM stanowi źródło pozyskiwania danych do optymalizacji, a program GASEO jest narzędziem optymalizacji. Wykonano badania symulacyjne wytłaczania z dozowanym zasilaniem oraz przeprowadzono optymalizację wybranych parametrów wytłaczania – prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania ślimaka – z zastosowaniem kryterium maksymalnej wydajności i minimalnej mocy procesu. Wyniki optymalizacji symulacyjnej zestawiono z wynikami optymalizacji doświadczalnej i wskazano na zalety badań symulacyjnych. Stwierdzono, że optymalizacja wytłaczania (a także innych procesów przetwórczych) na podstawie badań doświadczalnych jest nieefektywna, a alternatywą może być optymalizacja wykorzystująca badania symulacyjne procesu z zastosowaniem technik ewolucyjnych.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie jednoślimakowe, optymalizacja, modelowanie.

## Optimization for starve fed single screw extrusion of polymeric materials – simulations

**Abstract:** Optimization method for starve fed single screw extrusion has been developed based on the computer model of the process and using evolutionary techniques. The method is based on the starve fed single screw extrusion simulation program GSEM and especially developed to this aim optimization program GASEO. Program GSEM is the source of optimization data, and program GASEO is the optimization tool. Simulation studies have been performed on the starve fed single screw extrusion, and optimization of the selected process parameters, screw rotational speed and screw metering section length has been carried out from the point of view maximum extrusion throughput and minimum power consumption. The results of simulation optimization have been compared with the experimental optimization, indicating the advantages of simulation studies. It has been concluded that optimization based on experimental research is ineffective and the optimization of extrusion based on simulation tests using evolutionary techniques can be a suitable alternative in this regard.

**Keywords:** single screw extrusion, optimization, modeling.

Komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa tworzyw umożliwia symulację tych procesów z wykorzystaniem danych technologicznych, materiałowych i geometrycznych. Nie rozwiązuje jednak zadania odwrotnego, tzn. doboru parametrów procesu w celu uzyskania optymalnych efektów przetwórstwa. Nie stwarza też możliwości optymalizacji warunków przetwórstwa wg przyjętych kryteriów optymalizacji.

Optymalizacja procesu wytłaczania jest zagadnieniem wyjątkowo trudnym i złożonym, gdyż liczba parametrów procesu i kryteriów optymalizacji jest tutaj potencjalnie bardzo duża. Trudność stwarza znalezienie optimum globalnego, a jednocześnie uniknięcie optimum lokalnych.

Zagadnienie optymalizacji procesu wytłaczania przedstawiono obszernie w poprzednich pracach Autora [1–3]. Dokonano w nich analizy dostępnej literatury i stwierdzono, że tradycyjna optymalizacja na podstawie kosztownych i czasochłonnych badań doświadczalnych jest nieefektywna. Zaproponowano więc optymalizację

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: [andrzej.nastaj@wip.pw.edu.pl](mailto:andrzej.nastaj@wip.pw.edu.pl)

zację bazującą na komputerowej symulacji wytłaczania z zastosowaniem algorytmów genetycznych (technik ewolucyjnych).

Algorytmy genetyczne charakteryzują się m.in. tym, że:

- parametry optymalizacji są przetwarzane w postaci zakodowanej;
- poszukiwanie rozwiązania prowadzi się z pewnej populacji punktów, co powoduje, że prawdopodobieństwo utknięcia w ekstremum lokalnym jest mniejsze;
- stosuje się probabilistyczne reguły wyboru;
- wykorzystuje się tylko funkcje celu, a nie jej pochodne.

Zastosowanie algorytmów genetycznych w wypadku wytłaczania tworzyw jest, jak dotąd, ograniczone do optymalizacji klasycznego wytłaczania jednoślímakowego z zasilaniem grawitacyjnym [2, 4–7] oraz wytłaczania dwuślímakowego współbieżnego [8–10]. Algorytmy genetyczne znalazły też zastosowanie do skalowania procesu wytłaczania jednoślímakowego i dwuślímakowego współbieżnego [11, 12].

Dotychczas nie rozwiązano zagadnienia optymalizacji procesu wytłaczania jednoślímakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki oraz wytłaczania dwuślímakowego przeciwbieżnego, mimo że opracowano już odpowiednie modele matematyczne tych procesów, np. [13–20].

W niniejszej pracy podjęto próbę optymalizacji wytłaczania jednoślímakowego z dozowanym zasilaniem tworzywa. Zastosowano w tym celu symulacyjne techniki ewolucyjne.

## PROGRAM OPTYMALIZUJĄCY

Proponowana optymalizacja polega na pozyskiwaniu danych do optymalizacji na podstawie badań symulacyjnych procesu, następnie zastosowaniu odpowiedniej procedury optymalizacji ewolucyjnej (algorytmów genetycznych). Taka koncepcja wymaga opracowania metody współdziałania dwóch narzędzi: narzędzia pozyskiwania danych (programu symulacji procesu) i narzędzia obróbki tych danych (programu optymalizującego).

Podstawę badań symulacyjnych stanowił opracowany program GSEM (ang. *Global Screw Extrusion Model*), który jest rozwinięciem znanego programu symulacji klasycznego wytłaczania jednoślímakowego z zasilaniem grawitacyjnym SSEM (ang. *Single Screw Extrusion Model*) [21–23]. Program GSEM umożliwia symulację wytłaczania jednoślímakowego z dozowanym zasilaniem, ze ślímakami konwencjonalnymi i specjalizowanymi [15, 16], z zastosowaniem głowic o różnej geometrii, także w odniesieniu do tworzyw zaawansowanych, np. mieszanin polimerów [17, 18]. Program stanowi element budowanego w Zakładzie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Politechniki Warszawskiej wielozadaniowego systemu modelowania, optymalizacji i skalowania procesów ślímakowych w przetwórstwie tworzyw – Multi-Screw System [24].

Podstawą optymalizacji był program GASEO, specjalnie w tym celu zbudowany z wykorzystaniem metody algorytmów genetycznych.

Algorytmy genetyczne są wzorowaną na naturalnej ewolucji metodą przeszukiwania przestrzeni potencjalnych rozwiązań rozpatrywanego zadania w celu znalezienia rozwiązania najlepszego. Parametry optymalizacji są zakodowane w postaci chromosomów, czyli uporządkowanych ciągów znaków (genów), np. bitów. Struktura składająca się z zespołu chromosomów stanowi genotyp, który reprezentuje zestaw kilku parametrów wytłaczania, np. prędkości obrotowej ślímaka, temperatury głowicy, długości wybranej strefy ślímaka.

Działanie algorytmu przebiega zwykle w następujący sposób: najpierw jest losowana pewna populacja początkowa elementów zadania, która jest poddawana ocenie na podstawie wartości funkcji celu, np. wydajności wytłaczania. Elementy generujące największe wartości funkcji celu biorą udział w procesie reprodukcji. Genotypy tych elementów podlegają operacjom krzyżowania (wymianie fragmentów chromosomów) i mutacji (wprowadzania losowych zmian w genotypie). W efekcie powstaje drugie pokolenie, które jest poddawane ocenie i procedura powtarza się, aż do uzyskania poszukiwanego rozwiązania.

Selekcję elementów zazwyczaj realizuje się w wyniku zastosowania tzw. koła ruletki. Metoda polega na wielokrotnym losowaniu elementów z populacji pierwotnej, przy czym prawdopodobieństwa wylosowania każdego elementu są różne, definiowane przez stosunek wartości funkcji celu danego elementu do sumy wartości funkcji celu wszystkich elementów.

Program GASEO umożliwia realizację procedury optymalizacji procesu wytłaczania na podstawie algorytmów genetycznych, we współpracy z programem symulacji wytłaczania GSEM, który jest źródłem danych do optymalizacji.

W ujęciu ogólnym optymalizacja na podstawie algorytmów genetycznych obejmuje zazwyczaj następujące etapy [2]:

- zdefiniowanie globalnej funkcji celu (kryterium optymalizacji) i normalizację parametrów zadania;
- zdefiniowanie algorytmu genetycznego (ustalenie sposobu kodowania parametrów wejściowych, określenie długości ciągu znaków kodujących poszczególne parametry), ustalenie rozmiaru „populacji” wejściowej, przyjęcie metody selekcji chromosomów, określenie prawdopodobieństwa występowania operatorów krzyżowania i mutacji, przyjęcie kryterium zatrzymania ewolucji);
- realizację algorytmu genetycznego (losowy wybór populacji początkowej, ocena przystosowania chromosomów w populacji wg wartości funkcji celu, sprawdzenie warunku zatrzymania ewolucji, wybór chromosomów do następnej populacji, zastosowanie operatorów krzy-

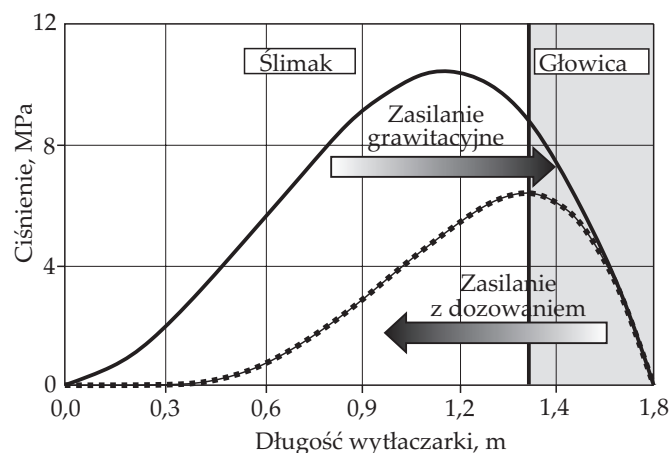
zowania i mutacji, generowanie nowej populacji, wybór rozwiązania optymalnego.

Realizacja określonego zadania optymalizacyjnego, tzn. optymalizacja danego procesu przetwórczego, wymaga opracowania procedur optymalizacyjnych, które nie mają charakteru uniwersalnego, są zindywidualizowane i właściwe jedynie dla badanego procesu.

Procedury optymalizacyjne opracowane do optymalizacji klasycznego wytłaczania nie mają więc zastosowania do optymalizacji wytłaczania z dozowanym zasilaniem, co wynika z fundamentalnej odmienności tych procesów, a w konsekwencji ich modeli komputerowych.

W klasycznym wytłaczaniu z zasilaniem grawitacyjnym natężenie przepływu tworzywa nie jest ustalane przez operatora wytlaczarki, lecz wynika ze współpracy wytlaczarki i głowicy. Warunki tej współpracy wyznacza tzw. punkt pracy wytlaczarki definiujący wydajność wytłaczania (natężenie przepływu tworzywa) i ciśnienie wytłaczanego tworzywa. Podstawę algorytmu obliczeń stanowi rozwiązanie zagadnienia wyznaczania natężenia przepływu oraz rozkładu ciśnienia tworzywa w wytlaczarce i głowicy. To zagadnienie można rozwiązać w procedurze obliczeń iteracyjnych, w których bada się zgodność przyrostu ciśnienia w wytlaczarce ze spadkiem ciśnienia w głowicy.

Natomiast w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem natężenie przepływu tworzywa jest ustalane przez operatora wytlaczarki, nie ma więc potrzeby stosowania iteracyjnej procedury poszukiwania punktu pracy wytlaczarki. Obliczeń nie można jednak rozpoczynać od zasobnika wytlaczarki w kierunku głowicy, gdyż w początkowej części wytlaczarki (częściowo tylko wypełnionej tworzywem) nie jest generowane ciśnienie i nie są znane warunki przepływu. Kluczowe znaczenie ma w tym wypadku zastosowanie iteracyjnej procedury wyznaczającej miejsce wypełnienia się kanału ślimaka tworzywem.



Rys. 1. Schemat ideowy modelowania procesu wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym i modelowania wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa

Fig. 1. Modeling scheme for flood fed extrusion and starve fed extrusion

Schemat ideowy modelowania klasycznego procesu wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym i modelowania wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa przedstawia rys. 1. W wypadku wytłaczania klasycznego obliczenia prowadzi się od zasobnika do głowicy, czyli „do przodu” (ang. *forward*), natomiast w wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem obliczenia prowadzi się w kierunku przeciwnym, od głowicy do zasobnika, czyli „do tyłu” (ang. *backward*).

Program GASEO umożliwia przeprowadzenie optymalizacji procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem z dowolną, w zasadzie, liczbą zmiennych optymalizowanych, przy różnych, dowolnych, w zasadzie, kryteriach optymalizacji procesu. Dokładność przeszukiwania powierzchni odpowiedzi jest określona przez liczbę przyjętych przedziałów zakresu danych, która wynika z długości zapisu tych liczb w postaci binarnej. W programie GASEO maksymalna długość ciągu binarnego wynosi 255 znaków, co umożliwia podział zakresu każdej ze zmiennych procesu na  $2^{255}$  przedziałów. Selekcja jest realizowana metodą „koła ruletki” – stosunkowo prostej w implementacji komputerowej [2]. Warunkiem zatrzymania optymalizacji jest 100-krotne wystąpienie najlepszego zestawu danych. Ogólny algorytm działania programu przedstawiono w pracy [2], trzeba jednak pamiętać o fundamentalnej odrębności realizacyjnej tego algorytmu w zależności od optymalizowanego procesu przetwórczego.

## OPTYMALIZACJA

### Program badań

Program badań symulacyjnych obejmował wytłaczanie z dozowanym zasilaniem polietylenu dużej gęstości (HDPE). Badania przeprowadzono z zastosowaniem polietylenu (HDPE) Rigidex 6070EA (firmy BP Chemicals), charakteryzującego się gęstością  $\rho = 0,952 \text{ g/cm}^3$ , wskaźnikiem szybkości płynięcia  $MFR = 7,6 \text{ g/10 min}$  ( $190^\circ\text{C}$ ,  $2,16 \text{ kg}$ ), temperaturą topnienia  $T_m = 135^\circ\text{C}$  i równaniem reologicznym Kleina

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_{11} \ln^2 \dot{\gamma} + A_{12} T \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_{22} T^2 \quad (1)$$

gdzie:  $\eta$  – lepkość,  $\dot{\gamma}$  – szybkość ścinania,  $T$  – temperatura;  $A_0, A_1, A_{11}, A_{12}, A_2$  i  $A_{22}$  – parametry równania Kleina ( $A_0 = 10,918378968$ ,  $A_1 = -0,218405893$ ,  $A_{11} = -0,036865332$ ,  $A_{12} = 0,001025862$ ,  $A_2 = -0,022682083$ ,  $A_{22} = 0,000021151$ ).

Badania przeprowadzono w warunkach odpowiadających badaniom doświadczalnym [3], tzn. z zastosowaniem ślimaków trójstrefowych o średnicy  $D = 45 \text{ mm}$ , stosunku długości do średnicy  $L/D = 27$ , stopniu sprężania  $CR = 8/3$  i stałej długości strefy sprężania oraz o różnej długości strefy dozowania. Badania wykonano na dwóch poziomach dozowania tworzywa, 90% i 95% wydajności uzyskiwanej podczas wytłaczania klasycznego, przy trzech różnych prędkościach obrotowych ślimaka:  $N = 20 \text{ obr./min}$ ,  $N = 50 \text{ obr./min}$  i  $N = 80 \text{ obr./min}$ .

T a b e l a 1. Program badań optymalizacyjnych

T a b e l e 1. Research program

Prędkość obrotowa ślimaka $N$ obr./min	Długość strefy dozowania ślimaka $L_d$ mm	Temp. cylindra $T_I$ °C	Temp. cylindra $T_{II}$ °C	Temp. cylindra $T_{III}$ °C	Temp. cylindra $T_{IV}$ °C	Dozowanie tworzywa $G$ kg/h
20–80	230–590	150	180	210	210	6,274–33,675
20–80	45–853	150	180	210	210	6,274–33,675
20–80	45–853	150	150–220	150–220	150–220	6,274–33,675

Na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzono optymalizację procesu, podobnie jak w wypadku badań doświadczalnych [3], wg kryterium maksymalnego natężenia przepływu  $Q_{maks}$  i minimalnej mocy procesu  $P_{min}$ . Dokonano optymalizacji parametrów technologicznych procesu (prędkości obrotowej ślimaka) i parametrów geometrycznych ślimaka (długości strefy dozowania).

Globalną funkcję celu zdefiniowano jako

$$F = \sqrt{Q_i \cdot P_i} \quad (2)$$

gdzie poszczególne dane ze zbioru wielkości wyjściowych znormalizowano w postaci

$$Q_{i\_znorm} = \frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{maks} - Q_{min}} \quad (3)$$

$$P_{i\_znorm} = \frac{P_{maks} - P_i}{P_{maks} - P_{min}} \quad (4)$$

gdzie:  $F_i$  – globalna funkcja celu,  $Q_{i\_znorm}$  – znormalizowana wartość masowego natężenia przepływu,  $P_{i\_znorm}$  – znormalizowana wartość mocy procesu,  $i$  – numer kolejnej wartości ze zbioru danych.

Program badań optymalizacyjnych przedstawia tabela 1.

Program zrealizowano w następujących konfiguracjach parametrów optymalizowanych:

1 – Optymalizacja w zakresie danych doświadczalnych:  $L_d = 230\text{--}590$  mm,  $N = 20\text{--}80$  obr./min, temperatura cylindra:  $T_I = 150^\circ\text{C}$ ,  $T_{II} = 180^\circ\text{C}$ ,  $T_{III} = 210^\circ\text{C}$ ,  $T_{IV} = 210^\circ\text{C}$ , dozowanie tworzywa  $G = 6,274\text{--}33,675$  kg/h.

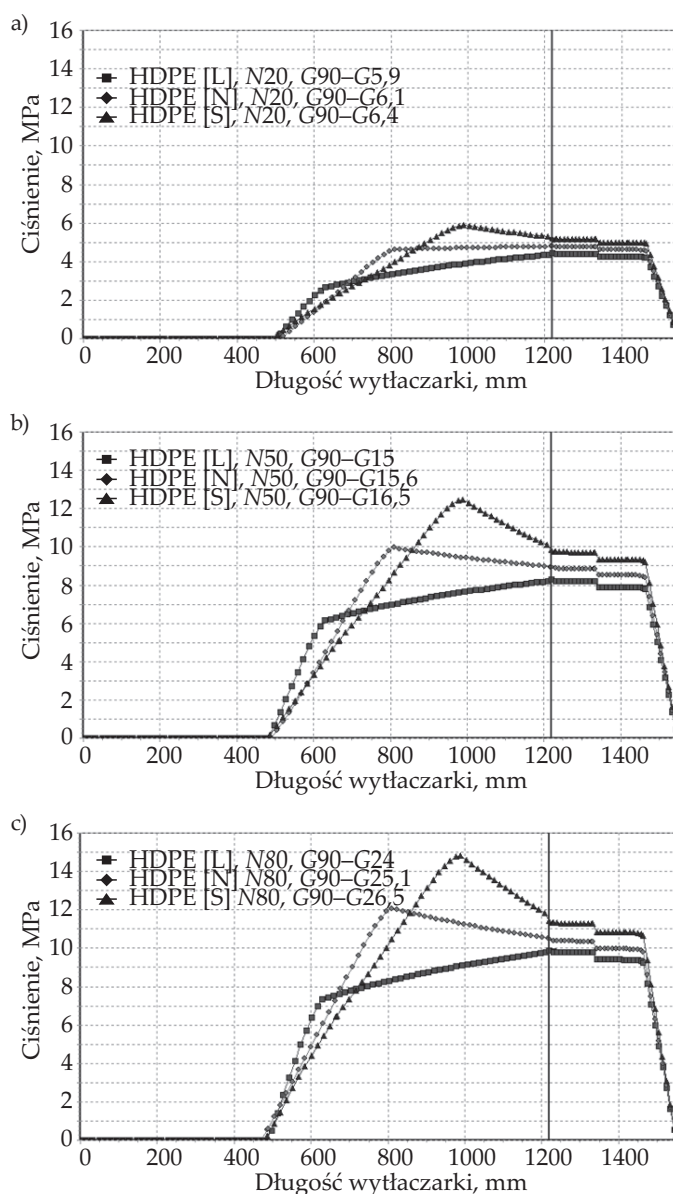
2 – Optymalizacja w rozszerzonym zakresie długości strefy dozowania:  $L_d = 45\text{--}853$  mm,  $N = 20\text{--}80$  obr./min, temperatura cylindra:  $T_I = 150^\circ\text{C}$ ,  $T_{II} = 180^\circ\text{C}$ ,  $T_{III} = 210^\circ\text{C}$ ,  $T_{IV} = 210^\circ\text{C}$ , dozowanie tworzywa  $G = 6,274\text{--}33,675$  kg/h.

3 – Optymalizacja w rozszerzonym zakresie długości strefy dozowania, połączona z optymalizacją warunków temperatury:  $L_d = 45\text{--}853$  mm,  $N = 20\text{--}80$  obr./min, temperatura cylindra:  $T_I = 150^\circ\text{C}$ ,  $T_{II} = 150\text{--}220^\circ\text{C}$ ,  $T_{III} = 150\text{--}220^\circ\text{C}$ ,  $T_{IV} = 150\text{--}220^\circ\text{C}$ , dozowanie tworzywa  $G = 6,274\text{--}33,675$  kg/h.

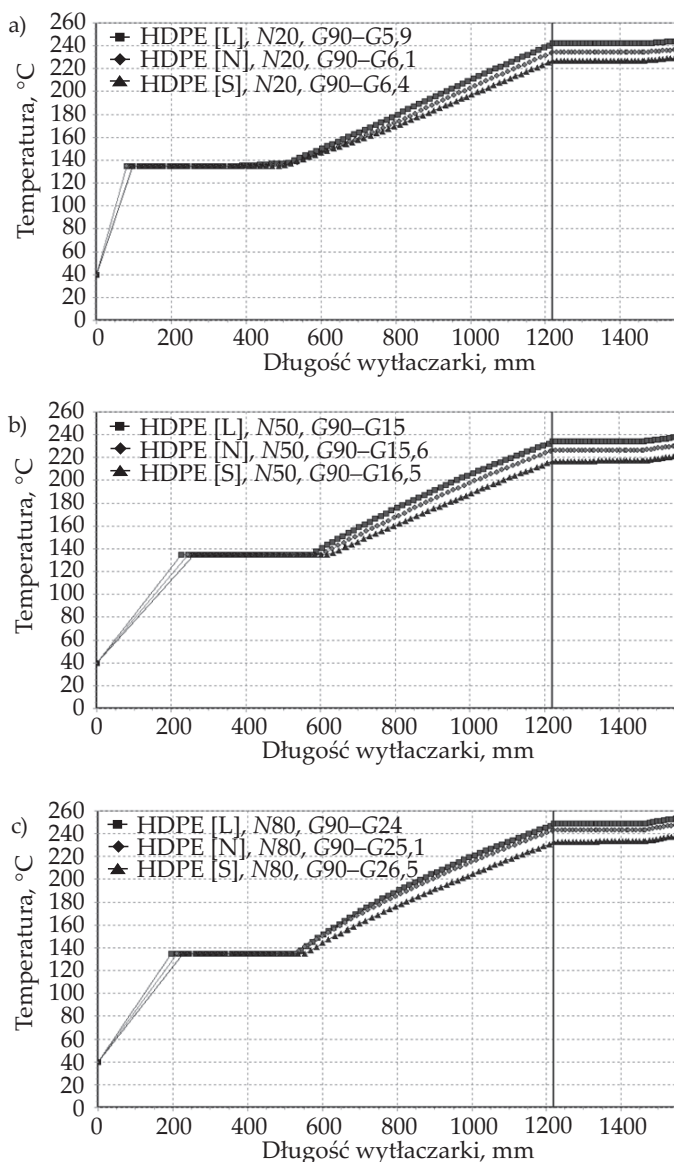
## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Przykładowe wyniki badań symulacyjnych na rys. 2–4 przedstawiają wpływ długości strefy dozowania

( $L_d = 230, 410$  i  $590$  mm) na rozkład ciśnienia, rozkład temperatury i stopień uplastycznienia tworzywa przy różnej



Rys. 2. Wpływ długości strefy dozowania  $L_d = 590$  mm [L],  $410$  mm [N] i  $230$  mm [S] w warunkach dozowania tworzywa  $G = 0,90 G_{graw}$  na rozkład ciśnienia przy prędkości obrotowej ślimaka: a)  $N = 20$  obr./min, b)  $N = 50$  obr./min, c)  $N = 80$  obr./min  
Fig. 2. Effect of the metering section length on the pressure profile  $L_d = 590$  mm [L],  $410$  mm [N] i  $230$  mm [S] at the dosing  $G = 0,90 G_{graw}$  at various screw speeds: a)  $N = 20$  rpm, b)  $N = 50$  rpm, c)  $N = 80$  rpm

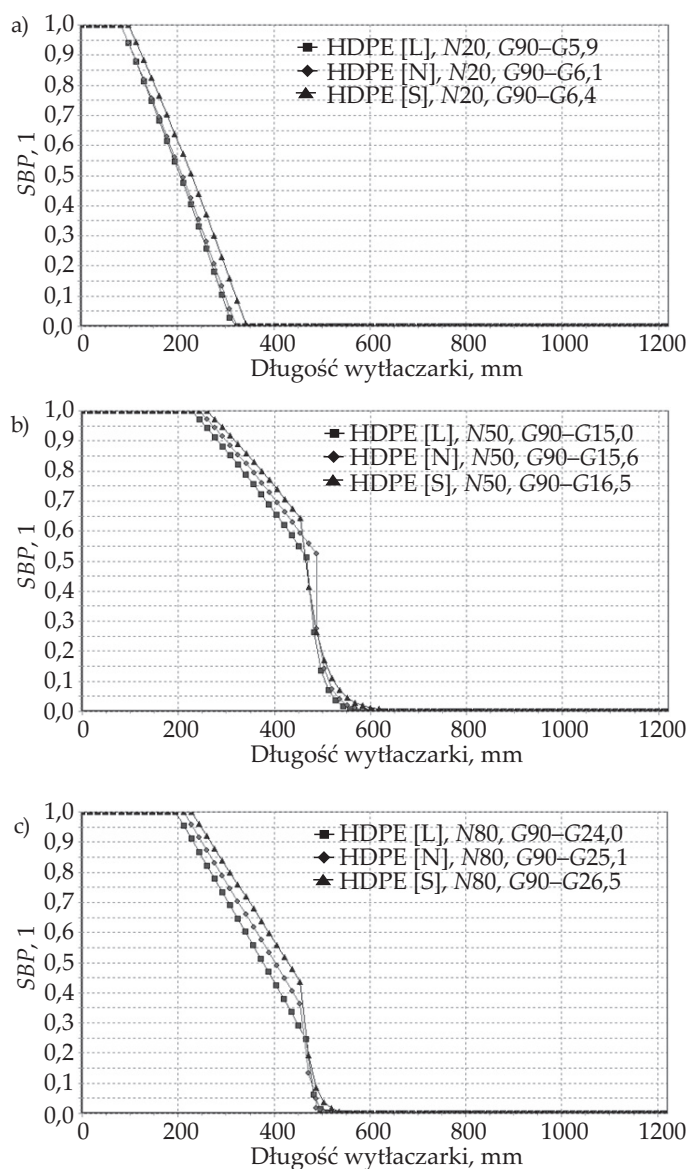


Rys. 3. Wpływ długości strefy dozowania  $L_d = 590$  mm [L], 410 mm [N] i 230 mm [S] w warunkach dozowania tworzywa  $G = 0,90 G_{graw}$  na rozkład temperatury przy prędkości obrotowej ślimaka: a)  $N = 20$  obr./min, b)  $N = 50$  obr./min, c)  $N = 80$  obr./min  
Fig. 3. Effect of the metering section length  $L_d = 590$  mm [L], 410 mm [N] i 230 mm [S] on the temperature profile at the dosing  $G = 0,90 G_{graw}$  at various screw speeds: a)  $N = 20$  rpm, b)  $N = 50$  rpm, c)  $N = 80$  rpm.

prędkości obrotowej ślimaka ( $N = 20, 50$  i  $80$  obr./min) i w warunkach dozowania tworzywa  $G = 0,90 G_{graw}$ .

Wydajność wytłaczania w warunkach zasilania grawitacyjnego  $G_{graw}$  zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka, co oznacza, że proces wytłaczania badano przy zwiększającej się prędkości obrotowej ślimaka i zwiększającym się natężeniu przepływu (dozowaniu tworzywa).

Biorąc to pod uwagę, można stwierdzić, że wyniki symulacji są zgodne z oczekiwaniami. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka, z równoczesnym zwiększaniem się



Rys. 4. Wpływ długości strefy dozowania  $L_d = 590$  mm [L], 410 mm [N] i 230 mm [S] w warunkach dozowania tworzywa  $G = 0,90 G_{graw}$  na przebieg uplastycznienia tworzywa (SBP – stopień uplastycznienia tworzywa) przy prędkości obrotowej ślimaka: a)  $N = 20$  obr./min, b)  $N = 50$  obr./min, c)  $N = 80$  obr./min  
Fig. 4. Effect of the metering section length  $L_d = 590$  mm [L], 410 mm [N] i 230 mm [S] on the melting profile (SBP – polymer melting course) at the dosing  $G = 0,90 G_{graw}$  at various screw speeds: a)  $N = 20$  rpm, b)  $N = 50$  rpm, c)  $N = 80$  rpm

natężenia przepływu, ciśnienie w układzie uplastyczniającym wytłaczarki także się zwiększa (rys. 2), a uplastycznianie tworzywa zachodzi wolniej (rys. 4). Temperatura wytłaczanego tworzywa mieści się w granicach wartości jego przetwórstwa (rys. 3). Warto również zauważyć, że przy większej prędkości obrotowej (rys. 4b i rys. 4c) ujawnia się dwuetapowy mechanizm uplastycznienia tworzywa. Wraz ze zwiększaniem długości strefy dozowania ciśnienie w wytłaczarce maleje (rys. 2).

W tabeli 2 zestawiono zbiorcze wyniki trzech działań optymalizacyjnych, a w tabeli 3 szczegółowe

T a b e l a 2. Wyniki badań optymalizacyjnych

T a b e l e 2. Research results

Prędkość obrotowa ślimaka $N$ obr./min	Długość strefy dozowania ślimaka $L_d$ mm	Temp. cylindra $T_I$ °C	Temp. cylindra $T_{II}$ °C	Temp. cylindra $T_{III}$ °C	Temp. cylindra $T_{IV}$ °C	Masowe natężenie przepływu $Q$ kg/h	Temp. tworzywa na wyjściu głowicy $T_t$ °C	Moc $P$ W	Jednostkowe zużycie energii $E_j$ kJ/kg
34	307	150	180	210	210	12,46	230,50	994,6	192,01
68	45	150	180	210	210	28,22	160,22	2942,1	375,65
74	45	150	220	220	218	33,68	217,69	2426,8	259,43

T a b e l a 3. Wybrane wartości globalnej funkcji celu dla danych symulacyjnych w zakresie danych doświadczalnych

T a b e l e 3. Selected values of the global objective function for simulation data in the range of experimental data

Prędkość obrotowa ślimaka $N$ obr./min	Długość strefy dozowania ślimaka $L_d$ mm	Temp. cylindra $T_{II}$ °C	Temp. cylindra $T_{III}$ °C	Temp. cylindra $T_{IV}$ °C	Masowe natężenie przepływu $Q$ kg/h	Temp. tworzywa na wyjściu głowicy $T_t$ °C	Moc $P$ W	Jednostkowe zużycie energii $E_j$ kJ/kg	Funkcja celu $F_i$
33,55	253,18	180	210	210	12,46	230,50	664,64	192,01	0,49564
33,55	229,95	180	210	210	12,46	229,53	667,20	192,75	0,49549
33,55	264,79	180	210	210	12,46	230,50	669,65	193,46	0,49534
33,55	241,56	180	210	210	12,46	229,53	672,36	194,24	0,49518
33,55	276,40	180	210	210	12,46	230,21	678,68	196,07	0,49480
35,48	322,85	180	210	210	12,46	236,26	715,31	206,65	0,49260
35,48	334,47	180	210	210	12,46	236,26	720,41	208,12	0,49230
35,48	357,69	180	210	210	12,46	237,33	727,79	210,26	0,49185
37,42	531,89	180	210	210	12,46	245,26	802,35	231,79	0,48733
37,42	566,72	180	210	210	12,46	245,26	806,57	233,01	0,48708

wyniki optymalizacji w konfiguracji (1), czyli optymalizacji wykonanej w zakresie danych doświadczalnych  $G = 6,274\text{--}33,675$  kg/h. Podano wyniki obliczeń globalnej funkcji celu. Największą wartość funkcji celu ( $F_i = 0,49564$ ) uzyskano z zastosowaniem ślimaka z krótką strefą dozowania ( $L_d = 253$  mm), przy prędkości obrotowej ślimaka  $N = 34$  obr./min. Parametry te są optymalne wg przyjętych kryteriów optymalizacji – maksymalnej wydajności i minimalnej mocy procesu ( $L_{d,opt} = 253$  mm,  $N_{opt} = 34$  obr./min). Parametrom optymalnym odpowiadają następujące wartości wielkości wyjściowych procesu:

- masowe natężenie przepływu: 12,46 kg/h,
- moc procesu: 664,64 W,
- jednostkowe zużycie energii: 192,01 kJ/kg.

W tabeli 4 przedstawiono szczegółowe wyniki optymalizacji w konfiguracji (2), wykonanej w rozszerzonym zakresie długości strefy dozowania w warunkach dozowania tworzywa  $G = 6,274\text{--}33,675$  kg/h. Największą wartość funkcji celu ( $F_i = 0,72974$ ) uzyskano z zastosowaniem

ślimaka z najkrótszą strefą dozowania ( $L_d = 45$  mm), przy prędkości obrotowej ślimaka  $N = 59$  obr./min. Są to parametry optymalne wg przyjętych kryteriów optymalizacji ( $L_{d,opt} = 45$  mm,  $N_{opt} = 59$  obr./min). Odpowiadają im następujące wartości wielkości wyjściowych procesu:

- masowe natężenie przepływu: 26,60 kg/h,
- moc procesu: 1747,24 W,
- jednostkowe zużycie energii: 236,43 kJ/kg.

W tabeli 5 zamieszczono szczegółowe wyniki optymalizacji w konfiguracji (3), wykonanej w rozszerzonym zakresie długości strefy dozowania, połączonej z optymalizacją warunków temperatury przy dozowaniu tworzywa  $G = 6,274\text{--}33,675$  kg/h. W wyniku optymalizacji rozkładu temperatury uzyskano następujące wartości:  $T_I = 150^\circ\text{C}$ ,  $T_{II} = 220^\circ\text{C}$ ,  $T_{III} = 220^\circ\text{C}$ ,  $T_{IV} = 218^\circ\text{C}$ . W wypadku takiego rozkładu, największą wartość funkcji celu ( $F_i = 0,90873$ ) uzyskano z zastosowaniem ślimaka o najkrótszej strefie dozowania ( $L_d = 45$  mm), przy prędkości obrotowej ślimaka  $N = 74$  obr./min. Są to parametry

**T a b e l a 4.** Wybrane wartości globalnej funkcji celu dla danych symulacyjnych przy profilu temperatury z danych doświadczalnych

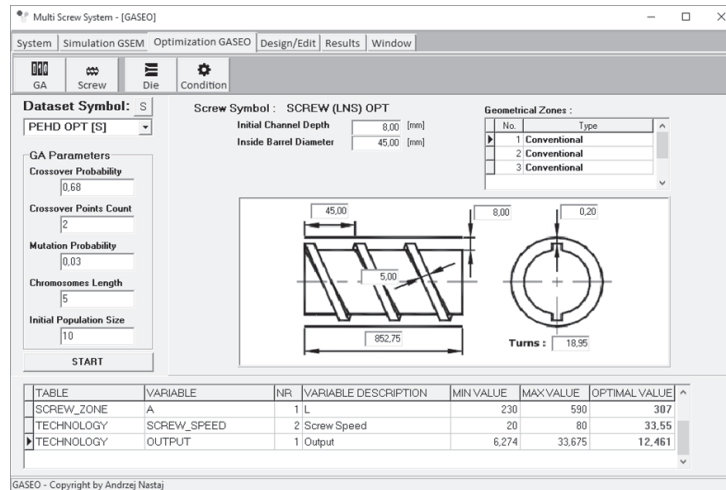
**T a b l e . 4.** Selected values of the global objective function for simulation data at the temperature profile from experimental data

Prędkość obrotowa ślimaka $N$ , obr./min	Długość strefy dozowania ślimaka $L_d$ , mm	Temp. cylindra $T_{IV}$ , °C	Temp. cylindra $T_{IIIr}$ , °C	Temp. cylindra $T_{IV}$ , °C	Masowe natężenie przepływu $Q$ , kg/h	Temp. tworzywa na wyjściu głowicy $T_r$ , °C	Moc $P$ , W	Jednostkowe zużycie energii $E_r$ , kJ/kg	Funkcja celu $F_i$
58,71	45,00	180	210	210	26,60	209,34	1747,24	236,43	0,72974
66,45	45,00	180	210	210	29,26	210,03	2147,46	264,25	0,72826
64,52	45,00	180	210	210	28,37	210,12	2049,29	260,03	0,72585
56,77	45,00	180	210	210	25,72	209,61	1645,36	230,30	0,72443
62,58	45,00	180	210	210	27,49	210,59	1936,55	253,63	0,72416
60,65	45,00	180	210	210	26,60	211,63	1815,76	245,71	0,72227
70,32	45,00	180	210	210	30,14	213,09	2306,34	275,48	0,72197
68,39	45,00	180	210	210	29,26	212,41	2216,94	272,80	0,71967
66,45	45,00	180	210	210	28,37	212,60	2117,56	268,69	0,71771
58,71	45,00	180	210	210	25,72	212,00	1712,29	239,67	0,71740

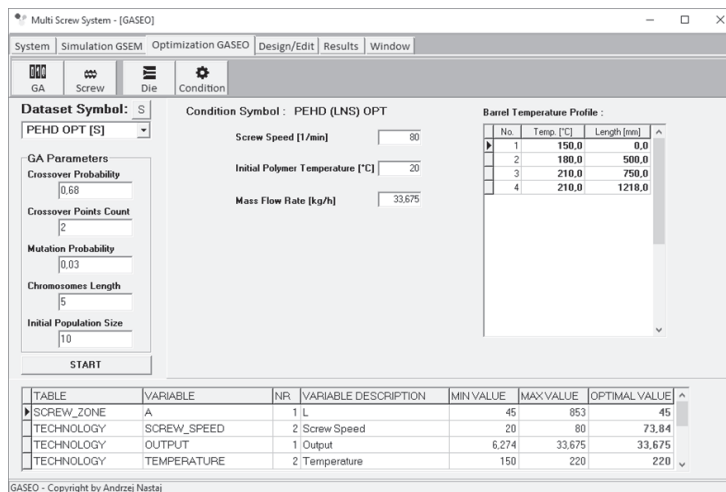
**T a b e l a 5.** Wybrane wartości globalnej funkcji celu dla danych symulacyjnych przy optymalnym profilu temperatury

**T a b l e . 5.** Selected values of the global objective function for simulation data at the optimal temperature profile

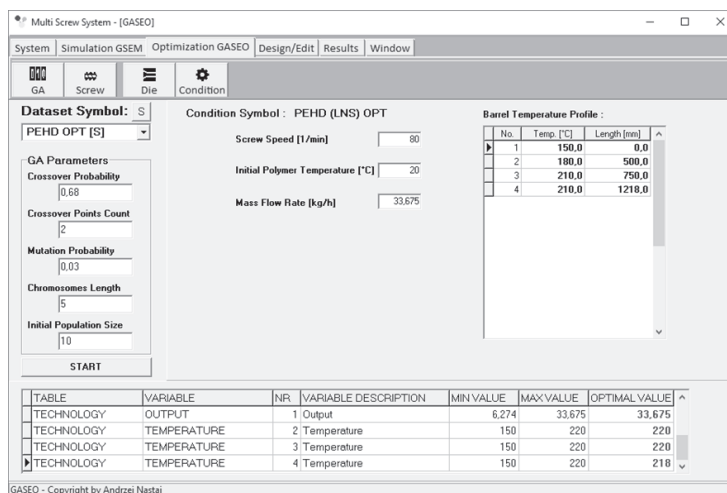
Prędkość obrotowa ślimaka $N$ , obr./min	Długość strefy dozowania ślimaka $L_d$ , mm	Temp. cylindra $T_{IV}$ , °C	Temp. cylindra $T_{IIIr}$ , °C	Temp. cylindra $T_{IV}$ , °C	Masowe natężenie przepływu $Q$ , kg/h	Temp. tworzywa na wyjściu głowicy $T_r$ , °C	Moc $P$ , W	Jednostkowe zużycie energii $E_r$ , kJ/kg	Funkcja celu $F_i$
73,84	45,00	220	220	218	33,68	217,69	2426,78	259,43	0,90873
73,84	45,00	220	220	216	33,68	217,53	2431,84	259,97	0,90667
73,84	45,00	220	216	209	33,68	217,01	2432,22	260,02	0,90651
73,84	45,00	220	213	216	33,68	216,99	2432,80	260,08	0,90627
73,84	45,00	220	220	205	33,68	217,20	2434,00	260,20	0,90579
73,84	45,00	220	218	213	33,68	217,25	2434,14	260,22	0,90573
73,84	45,00	220	216	220	33,68	217,24	2434,72	260,28	0,90549
73,84	45,00	220	220	213	33,68	217,27	2441,60	261,02	0,90268
73,84	45,00	220	218	220	33,68	217,26	2442,18	261,08	0,90244
73,84	45,00	220	220	203	33,68	216,94	2443,78	261,25	0,90179



Rys. 5. Wyniki optymalizacji na podstawie programu GASEO w zakresie danych doświadczalnych – program badań (1)  
 Fig. 5. Optimization results obtained by using GASEO program in the range of experimental data – test (1)



Rys. 6. Wyniki optymalizacji na podstawie programu GASEO wykonanej w rozszerzonym zakresie długości strefy dozowania – program badań (2)  
 Fig. 6. Optimization results obtained by using GASEO program in the extended range of the metering section – test (2)



Rys. 7. Wyniki optymalizacji na podstawie programu GASEO wykonanej w rozszerzonym zakresie długości strefy dozowania, połączonej z optymalizacją warunków temperatury – program badań (3)  
 Fig. 7. Optimization results obtained by using GASEO program in the extended range of the metering section, including temperature optimization – test (3)



try optymalne wg przyjętych kryteriów optymalizacji ( $L_{d\_opt} = 45$  mm,  $N_{opt} = 74$  obr./min). Odpowiadają im następujące wartości wielkości wyjściowych procesu:

- masowe natężenie przepływu: 33,68 kg/h,
- moc procesu: 2426,78 W,
- jednostkowe zużycie energii: 259,43 kJ/kg.

Rysunki 5–7 przedstawiają przykładowe okna wyników programu optymalizacyjnego GASEO zawierające parametry optymalizacji (parametry algorytmu genetycznego), wykaz parametrów optymalizowanych i zakres ich optymalizacji oraz wartości parametrów optymalnych.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że korzystne jest wykorzystanie ślimaków o krótkiej strefie dozowania ( $L_{d\_opt} = 45$  mm) pozwalającej na zastosowanie dużej prędkości obrotowej ślimaka ( $N_{opt} = 74$  obr./min) oraz wysokiego poziomu dozowania tworzywa ( $G_{opt} = 33,675$  kg/h), wynoszącego 0,95  $G_{graw}$ .

Wyniki badań w oczywisty sposób potwierdzają wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące ograniczeń optymalizacji prowadzonej na podstawie badań doświadczalnych. Zakres optymalizacji symulacyjnej procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa, przeprowadzonej w tej pracy, praktycznie nie byłby możliwy do osiągnięcia w warunkach doświadczalnych. W badaniach symulacyjnych bowiem do kodowania sześciu optymalizowanych parametrów, tj.: prędkości obrotowej ślimaka, długości strefy dozowania, temperatury trzech stref cylindra wytłaczarki oraz poziomu dozowania tworzywa, zastosowano ciągi binarne o długości 5 znaków ( $2^5 = 32$  wartości), co oznacza  $32^6 = 1\ 073\ 741\ 824$  różnych konfiguracji.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiono, nierozwiązane dotąd, zagadnienie optymalizacji procesu wytłaczania jednoślímakowego tworzyw z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Opracowano oryginalną metodę optymalizacji na podstawie modelu komputerowego procesu, z zastosowaniem algorytmów genetycznych. Podstawę metody stanowi program symulacji procesu wytłaczania GSEM, który jest źródłem danych do optymalizacji, oraz oryginalny program optymalizacyjny GASEO, który jest jej narzędziem. Dokonano symulacyjnej optymalizacji prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania ślimaka wg kryterium maksymalnej wydajności i minimalnej mocy procesu. Wyniki symulacyjnych badań optymalizacyjnych zestawiono z wynikami symulacji doświadczalnej. Stwierdzono, że optymalizacja na podstawie badań doświadczalnych jest nieefektywna, dlatego też, jako podstawę do optymalizacji wytłaczania, a także innych procesów przetwórczych, proponuje się badania symulacyjne procesu z zastosowaniem technik ewolucyjnych.

## LITERATURA

[1] Nastaj A., Wilczyński K.: *Polimery* **2018**, 63, 38.

- <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.1.6>
- [2] Nastaj A., Wilczyński K.: *Polimery* **2018**, 63, 297. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.4.7>
- [3] Nastaj A.: *Polimery* **2020**, 65, nr 5.
- [4] Covas J.A., Cunha A.G., Oliveira P.: *International Journal of Forming Processes* **1998**, 1, 323.
- [5] Covas J.A., Cunha A.G., Oliveira P.: *Polymer Engineering and Science* **1999**, 39, 443. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11434>
- [6] Covas J.A., Cunha A.G.: PPS-16 Annual Meeting, Shanghai, Chiny 2000.
- [7] Cunha A.G., Covas J.A.: *International Polymer Processing* **2001**, 16, 229. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1652>
- [8] Cunha A.G., Covas J.A., Vergnes B.: PPS-18 Meeting, Guimaraes, Portugalia 2002.
- [9] Cunha A.G., Poulesquen A., Vergnes B., Covas J.A.: *International Polymer Processing* **2002**, 17, 202. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1701>
- [10] Cunha A.G., Covas J.A., Vergnes B.: *Polymer Engineering Science* **2005**, 45, 1159. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20391>
- [11] Covas J.A., Cunha A.G.: *International Polymer Processing* **2009**, 24, 67. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2200>
- [12] Covas J.A., Cunha A.G.: PPS-27 Annual Meeting, Marrakesh, Maroko 2011.
- [13] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *International Polymer Processing* **2013**, 28, 34. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [14] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering Science* **2014**, 54, 2362. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [15] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *International Polymer Processing* **2016**, 31, 82. <http://dx.doi.org/10.3139/217.3154>
- [16] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2017**, 36, 23. <http://dx.doi.org/10.1002/adv.21570>
- [17] Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2018**, 37, 2142. <http://dx.doi.org/10.1002/adv.21873>
- [18] Wilczyński K., Buziak K., Wilczyński K.J. i in.: *Polymers* **2018**, 10 (3), 295. <http://dx.doi.org/10.3390/polym10030295>
- [19] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2011.045>
- [20] Lewandowski A., Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering Science* **2015**, 55, 2838. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.24175>
- [21] Wilczyński K.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1996**, 35, 449.

- <https://doi.org/10.1080/03602559608000931>
- [22] Wilczyński K.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1999**, 38, 581.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559909351602>
- [23] Wilczyński K., Tyszkiewicz A., Szymaniak Z.: *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, 109, 308.
- [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00820-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00820-7)
- [24] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2012**, 51, 626.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2012.659313>

Otrzymano 18 X 2019 r.