

BEATA KOWALSKA

Politechnika Lubelska
Katedra Procesów Polimerowych
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: beatak@fenix.pol.lublin.pl

Pomiary ultradźwiękowe w procesach przetwórstwa tworzyw polimerowych

ULTRASONIC MEASUREMENTS IN POLYMER PROCESSING

Summary — In this literature review the methods using ultrasounds in basic polymer processing — injection molding and extrusion — were presented. Two basic variants of such measurements were characterized, namely echo method using one transducer and the transmission method using two transducers, placed at opposite sides of the system investigated. The possibilities of transmission method application for the measurements in the injection nozzle (Fig. 1) and echo method application in the mold cavity during processing (Fig. 2) were discussed. Ultrasonic transducers let obtain the data necessary for controlling the process of producing of the fittings showing required properties. As well the possibilities of ultrasounds use during extrusion, by application of ultrasonic transducers connected with buffer rods (Fig. 3 and 5) were presented. Results of investigations and the estimation of quality of joint between two layers obtained in co-extrusion were given and interpreted (Fig. 4).

Key words: ultrasonic measurements, injection molding, extrusion.

Rozwój przetwórstwa tworzyw polimerowych powoduje wzrost zapotrzebowania na nowoczesną aparaturę pomiarową, rejestrującą ciągle zmiany parametrów przetwórstwa podczas trwania procesu [1—4]. Dotychczas stosowane tradycyjne piezoelektryczne czujniki temperatury i ciśnienia [5] nie zawsze odpowiadają stawianym im wymaganiom, zwłaszcza wówczas, gdy niezbędna jest szybka reakcja urządzenia oraz duża powtarzalność wyników pomiaru. Warunki te spełniają natomiast badania z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych. Literatura zawierająca opis możliwości wykorzystania tego rodzaju pomiarów dotyczy głównie metali [6], ostatnio jednak coraz częściej znajdują one zastosowanie do wykrywania wad w kompozytach polimerowych. Istnieje wiele metod pomiarowych, wykorzystujących ultradźwięki, dzięki którym można określać właściwości materiału, takie jak stałe sprężystości, anizotropię, wytrzymałość zmęczeniową bądź naprężenia własne [7—9].

Obecnie, dzięki zastosowaniu nowych materiałów do budowy przetworników ultradźwiękowych (Ultrasonic Transducer, UT) oraz wykorzystaniu mikroprocesorów i urządzeń do przetwarzania danych cyfrowych, omawiane metody umożliwiają szybkie uzyskiwanie wyników pomiarów, a także ich analizę. Ponadto bada-

nia ultradźwiękowe są nieinwazyjne, zatem nie wpływają na właściwości przetwarzanego tworzywa.

W zależności od zastosowanej techniki pomiarowej, generowane fale ultradźwiękowe mogą być wysyłane, a następnie odbierane w postaci echa przez ten sam przetwornik (metoda echa) lub wysyłane przez jeden przetwornik, a rejestrowane przez inny, który powinien być wówczas umieszczony po przeciwnej stronie w stosunku do przetwornika wysyłającego sygnał (metoda przepuszczania). W metodzie echa impulsy ultradźwiękowe są wprowadzane do materiału i odbierane po odbiciu od granicy ośrodka, wywołując na ekranie oscyloskopu powstanie echa. Metoda przepuszczania jest oparta na pomiarze natężenia fali ultradźwiękowej przechodzącej przez badany materiał [10]. Obydwie metody znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie w procesie zarówno wtryskiwania, jak i wytłaczania tworzyw [11, 12]. Analiza literatury, dostępnej zresztą przeważnie w języku angielskim, świadczy m.in. o wciąż malejącej wiedzy na temat pomiarów ultradźwiękowych podczas procesu przetwórstwa. Wydaje się zatem celowe przedstawienie zwięzłego przeglądu możliwości zastosowania ultradźwięków w dwóch powszechnie stosowanych, wspomnianych wyżej, metodach przetwórstwa tworzyw, tj. w procesie wtryskiwania oraz wytłaczania.

WYKORZYSTANIE ULTRADŹWIĘKÓW W PROCESIE WTRYSKIWIANIA

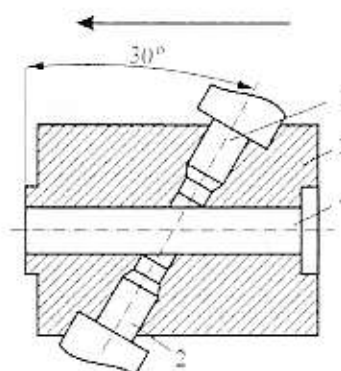
W celu optymalizacji procesu wtryskiwania jest niezbędna rejestracja oraz analiza danych uzyskanych w następujących kolejnych fazach procesu: podczas wtryskiwania i wypełniania gniazda formy tworzywem w stanie ciekłym, docisku, kiedy to następuje uzupełnienie masy tworzywa pod wysokim ciśnieniem, a także w trakcie całej fazy ochładzania [13], tj. od chwili zetknięcia tworzywa z gniazdem formy wtryskowej do zestalenia wypraski, czemu towarzyszy spadek ciśnienia. Obserwacja przemieszczania się czoła strumienia tworzywa w gnieździe formy umożliwia szybkie i płynne przejście ciśnienia wtryskiwania w ciśnienie docisku. W fazie docisku i ochładzania wypraski istotna jest rejestracja pojawienia się mikroszczeliny pomiędzy tworzywem a ścianką gniazda, wtedy bowiem ciśnienie docisku przestaje wpływać na właściwości wypraski, a efektywność ochładzania tworzywa zmniejsza się [14]. Zmienne właściwości tworzywa ochładzanego stanowią parametry wejściowe w układzie kontroli procesu wtryskiwania w celu uzyskania określonych właściwości wypraski.

Różne wartości energii fali ultradźwiękowej i określone współczynniki jej tłumienia w tworzywie mogą być odniesione bezpośrednio lub pośrednio do wielu właściwości tworzywa, takich jak gęstość, temperatura, naprężenia szczątkowe, stałe materiałowe (np. współczynnik sprężystości) lub współczynnik odkształcenia objętościowego [15, 16]. Dzięki przetwornikom ultradźwiękowym umieszczonym w dyszy wtryskowej bądź w gnieździe formy wtryskowej można uzyskać wiele istotnych danych niezbędnych do optymalizacji procesu wtryskiwania.

Pomiary w dyszy wtryskowej

Pomiary w dyszy wtryskowej z zastosowaniem metody przepuszczania wymagają umieszczenia UT pod pewnym kątem do przepływającego strumienia. Przykład rozmieszczenia przetworników w tej metodzie pomiaru zaproponowano w pracy [17].

W dyszy z otworem średnicy 16 mm po jej przeciwnych stronach wywiercono dodatkowe otwory, w których umieszczono pręty buforowe przetworników ultradźwiękowych (rys. 1), stanowiących linie opóźniające dla sygnału ultradźwiękowego, a także chroniące elementy piezoelektryczne przetwornika przed działaniem wysokiej temperatury. Pręty mają kontakt z przepływającym tworzywem, jednak ich końcówki lekko cofnięto w otworach, tak aby nie zakłócać przepływu tworzywa. Jeden z przetworników (1) jest umieszczony zgodnie z kierunkiem przepływającego strumienia tworzywa, natomiast drugi (2) — przeciwnie do tego kierunku. Każdy przetwornik działa najpierw jako nadajnik, a następnie jako odbiornik sygnału ultradźwiękowego.



Rys. 1. Rozmieszczenie prętów buforowych w dyszy wtryskowej; 1, 2 — pręty buforowe, 3 — obudowa dyszy, 4 — kanał dyszy wtryskowej [17]; strzałka określa kierunek przepływu tworzywa

Fig. 1. Lay-out of the buffer rods in the injection nozzle: 1, 2 — buffer rods, 3 — casing, 4 — nozzle channel [17]. The arrow describes the direction of polymer flow

Różnice w wartości czasu przejścia fali ultradźwiękowej, uzyskiwane w warunkach różnej prędkości wtryskiwania pozwalają na wyznaczenie prędkości tworzywa przepływającego, natomiast prędkość sygnału dźwiękowego stanowi podstawę do określenia gęstości i współczynnika odkształcenia objętościowego tworzywa, które to właściwości z kolei zmieniają się wraz ze zmianą ciśnienia i temperatury [15]. Podczas wtryskiwania ciśnienie tworzywa w dyszy wzrasta w zależności od prędkości wtryskiwania, rodzaju tworzywa i zadanej temperatury, wzrasta również temperatura tworzywa (najczęściej o kilka stopni Celsjusza). Wzrost ciśnienia powoduje większą prędkość. Decydujący wpływ na czas przejścia fali ultradźwiękowej przez tworzywo wywiera ciśnienie i jego zmiany. Wyniki opartych na ultradźwiękowych pomiarach badań właściwości tworzywa przepływającego w dyszy wtryskowej przedstawiono w pracach [18, 19].

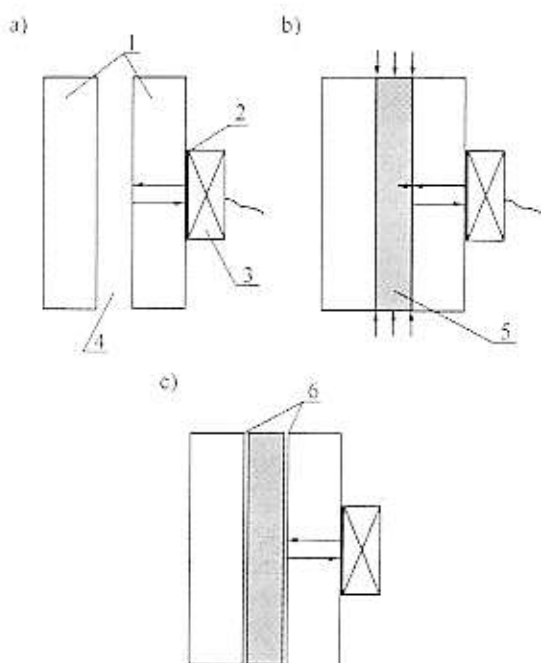
Pomiary w gnieździe formy wtryskowej

Wykorzystując ultradźwięki pomiary w gnieździe formy wtryskowej pozwalają na uzyskanie wielu danych niezbędnych do kontroli i optymalizacji procesu wtryskiwania. Dzięki nim można rejestrować [11]:

- przemieszczanie się czoła strumienia tworzywa w gnieździe formy wtryskowej podczas fazy wtryskiwania;
- powstawanie mikroszczeliny powietrznej pomiędzy ścianką gniazda a wypraską w wyniku kurczenia się ochładzanego tworzywa;
- przebieg procesu ochładzania i zestalenia wypraski, który w sposób istotny wpływa na jakość wypraski.

Sposób umieszczenia przetwornika w gnieździe formy wtryskowej przedstawiono na rys. 2.

Kiedy generowana fala ultradźwiękowa znajdzie się na granicy dwóch ośrodków, część jej energii jest przesy-



Rys. 2. Zamocowanie przetwornika ultradźwiękowego (UT) w formie wtryskowej: 1 — zespoły formy wtryskowej, 2 — środek sprzęgający, 3 — przetwornik, 4 — gniazdo formy, 5 — tworzywo, 6 — mikroszczelina [11]; dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 2. Location of ultrasonic transducer in the mold cavity: 1 — mold's systems, 2 couplant, 3 — ultrasonic transducer, 4 — mold cavity, 5 — polymer, 6 — gap [11]; further explanations in the text

łana przez tę granicę, natomiast pozostała część powraca do przetwornika jako fala odbita. Stosunek amplitudy fali odbitej do amplitudy fali padającej nazywany jest współczynnikiem odbicia R . Jest on definiowany następująco [11]:

$$R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

gdzie: Z_1 oraz Z_2 — impedancja akustyczna odpowiednio pierwszego i drugiego ośrodka.

Impedancję akustyczną Z -tego ośrodka można obliczyć ze wzoru

$$Z_i = \rho_i v_i \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

gdzie: ρ_i — gęstość ośrodka, v_i — prędkość fali w tym ośrodku.

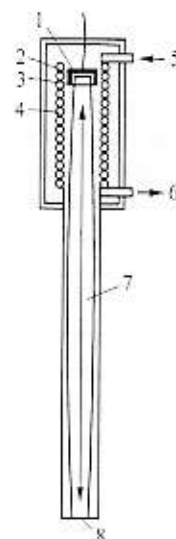
Jak przedstawiono na rys. 2, UT wysyła impulsy ultradźwiękowe, a następnie odbiera je w postaci echa. Kiedy gniazdo formy jest puste (rys. 2a), emitowany sygnał zostaje niemal całkowicie odbity na granicy stal-powietrze z powodu małej wartości impedancji akustycznej powietrza w porównaniu ze stalą. Dlatego współczynnik odbicia R jest bliski jedności. W chwili wypełnienia gniazda ciekłym tworzywem część energii fali ultradźwiękowej zostaje pochłonięta przez tworzywo (rys.2b), a zarejestrowana energia echa jest odpo-

wiednio mniejsza. Od początku procesu zestalania amplituda rejestrowanej fali nieznacznie zmienia się z powodu zmian właściwości tworzywa, osiągając wartość maksymalną wówczas, gdy szerokość tworzącej się mikroszczeliny powietrznej przekroczy wartość $1 \mu\text{m}$ [11]. Ze względu na skomplikowany kształt gniazda formy, w której znajdują się powodujące powstawanie zakłóceń kanały doprowadzające tworzywo, układ chłodzący, wkładki, wypychacze itp., należy zwracać uwagę na właściwą interpretację zarejestrowanych sygnałów.

WYKORZYSTANIE ULTRADŹWIĘKÓW W PROCESIE WYTŁACZANIA

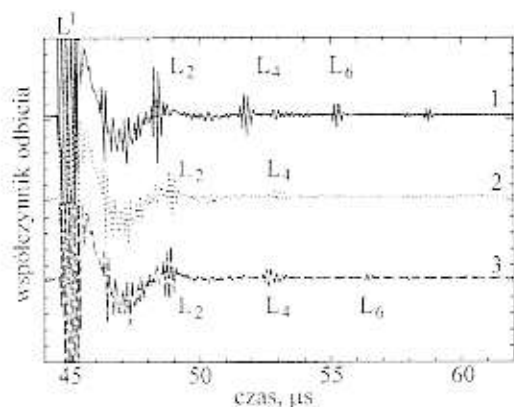
Pomiary ultradźwiękowe są przydatne zwłaszcza podczas wytłaczania tworzyw o różnym, niekiedy nieznanym składzie, np. tworzyw recykulowanych, mieszanin polimerowych, tworzyw podatnych na degradację lub tworzyw porowatych. Przetworniki ultradźwiękowe mogą być umieszczone zarówno w dyszy głowicy wytłaczarskiej (na podobnych zasadach jak w procesie wtryskiwania), jak i wzdłuż cylindra układu uplastyczniającego [20]. Oprócz uzyskiwania danych dotyczących przetwarzanego tworzywa, można także określić stopień zużycia ślimaka oraz jego ewentualne odchylenia od osi wzdłużnej cylindra.

UT znalazły również zastosowanie we współwytłaczaniu, wytłaczaniu z rozdmuchiowaniem lub wytłaczaniu dwuślimakowym [12, 21]. Możliwości wykorzystania ultradźwięków do badania i oceny jakości połączenia między dwiema warstwami uzyskanymi w procesie współwytłaczania przedstawiono w pracy [12]. Zastosowano tu przetworniki połączone z platerowanymi prętami buforowymi. Schemat takiego pręta z przetwornikiem przedstawiono na rys. 3. Jeden koniec pręta, na którym umieszczono przetwornik ultradźwiękowy jest chłodzony powietrzem, drugi natomiast ma kontakt z tworzywem.



Rys. 3. Schemat pręta buforowego wraz z UT: 1 — przetwornik, 2 — obudowa, 3 — środek sprzęgający, 4 — kanały chłodzące, 5 — wlot powietrza chłodzącego, 6 — wylot powietrza chłodzącego, 7 — fale ultradźwiękowe, 8 — końcówka pomiarowa [12]; dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 3. Scheme of the buffer rod with ultrasonic transducer: 1 — ultrasonic transducer, 2 — casing, 3 — couplant, 4 — cooling channels, 5 — cooling air inlet, 6 — cooling air outlet, 7 — ultrasonic waves, 8 — contact tip [12]; further explanations in the text



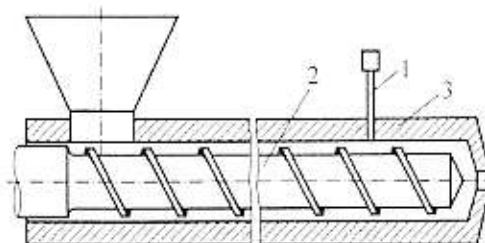
Rys. 4. Wartości echa zarejestrowanego podczas wytłaczania PE-HD (krzywa 1), mieszaniny PP/EPDM „Santopren” (krzywa 2) oraz w toku współwytłaczania układu złożonego z obydwu wymienionych tworzyw (krzywa 3) [14]; dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 4. Reflected signals values registered during extrusion of PE-HD (curve 1), PP/EPDM blend “Santopren” (curve 2) and during co-extrusion of the system consisted of both mentioned above ones (curve 3) [14]; further explanations in the text

Pomiary oraz analiza zarejestrowanego echa, jak również czasu przejścia fali przez tworzywo, pozwalają na zlokalizowanie oraz ocenę stabilności warstwy połączeniowej. Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane sygnały odbite w postaci echa na granicy ośrodków podczas wytłaczania warstwy PE-HD grubości 2 mm, warstwy (również grubości 2 mm) elastomeru termoplastycznego na podstawie mieszaniny z polipropylenu z EPDM (terpolimerem etylen/propylen/dien) o nazwie handlowej „Santopren” oraz w toku współwytłaczania układu PE-HD/„Santopren” (grubość warstwy każdego ze składników 1 mm). W tym ostatnim przypadku UT zostały umieszczone od strony warstwy PE-HD. Wielkości L_2 , L_4 oraz L_6 określają odpowiednio amplitudę pierwszego, drugiego i trzeciego echa zarejestrowanego na granicach poszczególnych ośrodków. Wartość L_1 pochodzi od pręta buforowego. Tłumienie ultradźwięków w „Santoprenie” jest więc większe niż w PE-HD, o czym świadczy bardziej gwałtowne zmniejszenie się amplitudy sygnału odbitego na krzywej 2 niż na krzywej 1. Stabilność procesu współwytłaczania można ocenić na podstawie czasu dwukrotnego przejścia sygnału (tam i z powrotem) przez warstwy łączonych tworzyw. Jak wynika z krzywej 3, czas przejścia fali L_4 jest dwa razy dłuższy niż fali L_2 , zatem niestabilność warstwy połączeniowej jest rejestrowana łatwiej przez to echo. Oprócz oceny stabilności warstwy połączeniowej podczas procesu współwytłaczania, szczegółowa analiza amplitud sygnałów odbitych pozwala na określenie grubości obydwu warstw.

Przetworniki ultradźwiękowe znajdujące się w cylindrze układu uplastyczniającego powinny być tak umiejscowione, aby obszar między ślimakiem a cylindrem był

całkowicie wypełniony tworzywem, albowiem obecność powietrza w układzie powoduje gwałtowny spadek intensywności fali rejestrowanej i w związku z tym błędną interpretację wyników. W celu uzyskania powtarzalności wyników pomiarów dotyczących procesu wytłaczania należy wykonywać je w odniesieniu do takiego samego względnego położenia przetwornik—ślimak. Rejestracja i analiza sygnałów odbitych od ślimaka oraz tworzywa pozwala na ocenę zmiany właściwości polimeru wytłaczanego w trakcie trwania procesu. Przykład zamocowania pręta buforowego wraz z przetwornikiem przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Przykład usytuowania pręta buforowego wraz z przetwornikiem w cylindrze układu uplastyczniającego wytłaczarki: 1 — pręt buforowy, 2 — ślimak, 3 — cylinder układu uplastyczniającego

Fig. 5. Example of a buffer rod with ultrasonic transducer location in the barrel of extruder plasticizing system: 1 — buffer rod, 2 — screw, 3 — barrel of plasticizing system

Dzięki badaniom ultradźwiękowym można również określić czas przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym, co jest zwłaszcza istotne podczas wytłaczania reaktywnego oraz wytłaczania tworzyw łatwo ulegających degradacji [22, 23]. Do tworzywa wprowadza się wówczas wskaźnik, np. CaCO_3 i wykorzystuje dwa przetworniki umieszczone w pewnej odległości od siebie, dzięki czemu możliwa jest rejestracja zmian stężenia CaCO_3 .

PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy dostępnej literatury można zauważyć, że możliwości zastosowania przetworników ultradźwiękowych w przetwórstwie tworzyw polimerowych są bardzo duże. Metody zarówno echa, jak i przepuszczania można z powodzeniem stosować do pomiarów właściwości przetwarzanego tworzywa, a także cech stosowanych elementów maszyn, np. stopnia zużycia ślimaka układu uplastyczniającego. Pomiarów charakteryzują się dużą powtarzalnością wyników oraz krótkim czasem reakcji przetwornika, dzięki czemu można je prowadzić w trakcie trwania procesu. Szybka rejestracja i analiza danych pomiarowych umożliwia efektywną kontrolę ocenianego procesu, co pozwala na uzyskiwanie wytworów o żądanych właściwościach. Dodatkową

zaletą metod ultradźwiękowych jest możliwość wykorzystania otworów wykonanych wcześniej na piezoelektryczne czujniki do pomiaru temperatury i ciśnienia. Istotną jest właściwa analiza rejestrowanych fal ultradźwiękowych, a także czasów ich tłumienia w badanych tworzywach w połączeniu ze starannym i przemysłowym sposobem rozmieszczenia przetworników w celu uniknięcia błędów w interpretacji wyników. Badania ultradźwiękowe w przetwórstwie tworzyw prowadzi się na świecie w coraz szerszym zakresie. W Polsce są one wciąż bardzo rzadko stosowane, a odnosząca się do tego kierunku ich wykorzystania literatura krajowa jest niewystarczająca i dotyczy głównie oceny jakości materiałów polimerowych po skończonym procesie przetwórstwa.

LITERATURA

1. Bociąga E.: *Polimery* 2004, 49, 36.
2. Bociąga E., Sikora R.: *Polimery* 2004, 49, 36.
3. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 100.
4. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 753.
5. Rosato D. V., Rosato D. V.: „Injection Molding Handbook”, 2. wyd., Chapman and Hall, Nowy Jork 1995.
6. Deputat J.: „Nieniszczące metody badania właściwości materiałów”. Wyd. Biuro Gamma, Warszawa 1997.
7. Mallick P. K.: „Nondestructive Tests, Composites Engineering Handbook”, Nowy Jork — Bazylea — Hong Kong 1997.
8. Ochelski S.: „Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych”, WNT, Warszawa 2004.
9. Rojek M., Stabik J., Wróbel G.: „Ultrasonic Methods in Diagnostics of Epoxy-glass Composites”. AMAS Workshop on Nondestructive Testing of Materials, Warszawa 2003.
10. Śliwiński A.: „Ultradźwięki i ich zastosowania”, WNT, Warszawa 2001, str. 182.
11. Wang H., Cao B., Jen C. K., Nguyen K. T., Viens M.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, 37, 363.
12. França D. R., Jen C. K., Nguyen K. T., Gendron R.: *Polym. Eng. Sci.* 2000, 40, 82.
13. Kowalska B., Sikora R.: *Polimery* 2003, 48, 359.
14. Miranda V., Lai F. S.: *SPE ANTEC, Tech. Papers* 1995, 41, 411.
15. Alig I., Lellinger D.: *Chem. Innov.* 2000, 4, 12.
16. Thurston R. N.: „Physical Acoustics, Principles and Methods”, tom 1, część A, rozdział 1. Academic Press Inc., Nowy Jork 1964.
17. Brown E. C., Dawson A. J., Coates P. D.: „Ultrasonic Measurements in the Nozzle and Cavity during Polymer Injection Molding”. PPS, Seventeenth Annual Meeting, Montreal, Kanada 2001, str. 73.
18. Konno M., Cui A., Nishiwaki N., Hori S.: *SPE ANTEC, Tech. Papers* 1993, 39, 2798.
19. Thomas C., Rose J. L., Li Z. K.: *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.* 1993, 12, 2333.
20. Jen C. K., Nguyen K. T., Legoux J. G., Ihara I., Hébert H.: „Novel Clad Ultrasonic Buffer Rods for the Monitoring of Industrial Materials Processing” *NDT.net*, 1999, 4, No 4.
21. Gendron R., Tatibouet J., Guevremont J., Dumoulin M. M., Piche L.: *Polym. Eng. Sci.* 1995, 35, 79.
22. Sun Z., Jen C. K.: „Ultrasonic Monitoring of Polymer Residence Time Distribution Inside Extruder Barrel”. PPS, Seventeenth Annual Meeting, Montreal, Kanada 2001, str. 62.
23. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”. Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej, Warszawa 1993.

Otrzymano 16 VII 2004 r.