

Niestabilności przepływu stopionych tworzyw polimerowych w trakcie wytłaczania

Cz. I. Podział i charakterystyka niestabilności przepływu

Mateusz Barczewski¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.612

Streszczenie: Artykuł stanowi przegląd literatury obejmującej zagadnienia związane z powstawaniem niestabilności przepływu stopionych polimerów podczas wytłaczania. Omówiono rodzaje niestabilności występujące w trakcie przepływu laminarnego stopionych polimerów termoplastycznych oraz opisano przyczyny ich powstawania.

Słowa kluczowe: niestabilności przepływu, wytłaczanie, polietylen.

Flow instabilities in polymer melt extrusion. Part I. Types and characteristics of flow instabilities

Abstract: This paper presents a review of the literature relating to the formation of flow instabilities during polymer melt extrusion. The types of instabilities occurring in the laminar flow of thermoplastic polymer melts are discussed.

Keywords: flow instabilities, extrusion, polyethylene.

Tworzywa polimerowe ze względu na swoje właściwości oraz dużą możliwość modyfikacji znajdują szerokie zastosowanie w charakterze materiałów zarówno konstrukcyjnych, jak i opakowaniowych. Pomimo znaczącego rozwoju chemii polimerów w ostatnich latach XX w. od ok. trzydziestu lat obserwuje się stopniowe zmniejszenie liczby opracowywanych nowych gatunków polimerów. Wpływ na to mają w znacznej mierze czynniki ekonomiczne, które wymuszają doskonalenie znanych już, stosunkowo tanich materiałów polimerowych, podatnych na recykling mechaniczny. Producenci dokładają więc starań by otrzymywane produkty były dobrze zdefiniowane i wykazywały założone właściwości. Udoskonalone metody syntezy oraz wprowadzane nowe dodatki pozwalają na wytworzenie polimerów ściśle dostosowanych do określonej aplikacji [1–6]. Możliwość uzyskania gatunków polietylenu różniących się właściwościami wynikającymi z modyfikacji jego budowy makrocząsteczkowej spowodowała, że jest on najczęściej przetwarzanym tworzywem w branży opakowaniowej. Dominujący udział PE w ogólnym rynku polimerów jest efektem korzystnej relacji właściwości do stosunkowo niskiej ceny [4].

Pod względem ekonomicznym zwiększanie wydajności produkcji jest uzasadnione, niejednokrotnie jednak jest związane także z większą ilością odpadów technolo-

gicznych. W procesach technologicznych, w których materiały polimerowe są kształtowane w stanie stopionym, stosowanie bardzo dużych prędkości przepływu oraz towarzyszącego im ciśnienia może prowadzić do różnego rodzaju niestabilności przepływu, będących efektem tzw. elastycznej turbulencji. Występowanie zjawiska pęknięcia stopu (ang. *melt fracture*) w trakcie przepływu laminarnego jest związane głównie z budową makrocząsteczkową oraz rodzajem i intensywnością odkształcenia przetwarzanych polimerów w trakcie przepływu, zależnie od stosowanej metody przetwórczej [7, 8]. Dlatego też część charakterystycznych niestabilności przepływu występuje jedynie w określonych przypadkach formowania wybranych polimerów [9, 10]. Mimo trwających już wiele dziesiątek lat badań problem powstających niestabilności przepływu wciąż nie jest dobrze wyjaśniony. Co prawda w praktyce przemysłowej opracowano pewne mechanizmy eliminujące część występujących niestabilności, jednak wyjaśnienie przyczyn powstawania obserwowanych na powierzchni wyrobów wad pozostaje wciąż na etapie hipotez. Opisowi metod zapobiegania niestabilnościom przepływu stopionych polimerów poświęcona zostanie druga część niniejszego artykułu.

NIESTABILNOŚCI PRZEPŁYWU

Stabilność hydrodynamiczna to jedno z ważniejszych zagadnień dynamiki przepływów. Zdecydowana większość źródeł literaturowych skupia się na problemie przepływów cieczy o małej lepkości przy dużych natężeniach.

¹⁾ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Materiałów, Zakład Tworzyw Sztucznych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań.
e-mail: mateusz.barczewski@put.poznan.pl

niach przepływu oraz niestabilności przepływu wynikającej z przejścia z zakresu przepływu laminarnego do turbulentnego. W odniesieniu do niestabilności pojawiających się w trakcie przepływu stopionych tworzyw termoplastycznych, istotną rolę odgrywa ich duża lepkość oraz udział właściwości sprężystych [11–15]. W przypadku polimerów przetwarzanych konwencjonalnymi technikami, takimi jak wytłaczanie lub wtryskiwanie, liczba Reynoldsa opisująca dany przepływ stopionego polimeru jest o kilka rzędów mniejsza niż wartość charakteryzująca przepływ turbulentny cieczy lepkich ($Re > 2100$). Obserwowane niestabilności przepływu występują więc na ogół w zakresie przepływu laminarnego [12, 15, 16]. Niestabilności przepływu cieczy lepkosprężystych o dużej lepkości mogą być skorelowane z opisującą je liczbą Weissenberga, określającą stosunek sił sprężystych do lepkich [7, 14, 15, 17].

Sekwencja tworzenia się kolejnych rodzajów niestabilności wynika, jak już wcześniej wspomniano, przede wszystkim z budowy makrocząsteczkowej polimeru. Niestabilności przepływu towarzyszące przetwórstwu większości komercyjnie przetwarzanych termoplastycznych tworzyw polimerowych, w tym: polietylenu [8, 18–30], polipropylenu [31–34], polistyrenu [35–38] czy polilaktydu [39, 40], szczegółowo opisano w literaturze. Problem tworzących się niestabilności przepływu najczęściej jest obserwowany w toku produkcji cienkościennych wyrobów opakowaniowych, w tym folii wylewanych i wytłaczanych z rodmuchiowaniem. Podatność na występowanie niestabilności przepływu w trakcie wytłaczania liniowych odmian polietylenu, będących materiałami najczęściej stosowanymi do produkcji folii

wylewanych oraz rękawowych, spowodowała że obserwowane zjawiska elastycznej turbulencji opisano najdokładniej. W niniejszym opracowaniu sekwencję tworzenia się niestabilności przepływu w trakcie wytłaczania również opisano na przykładzie tego polimeru. Na rys. 1 przedstawiono kolejno obserwowane niestabilności przepływu polietylenu liniowego małej gęstości podczas wytłaczania przez dyszę kapilarną.

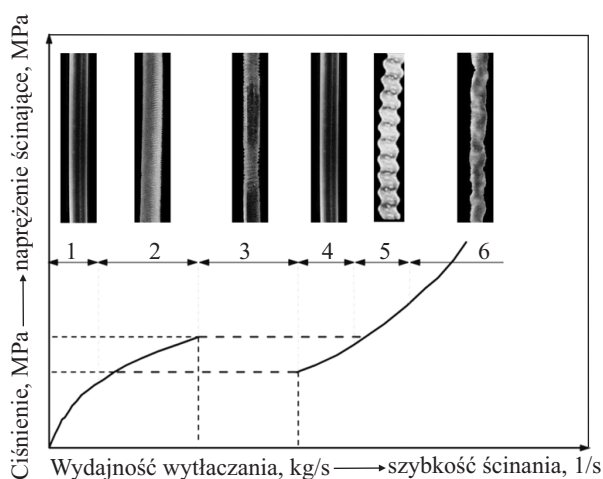
Zdjęcia w górnej części ilustrują wygląd wytłoczyn w poszczególnych zakresach przepływu. Należy dodać, że na ogół zakresy powstających niestabilności są odnieszone do wartości naprężeń ścinających τ oraz szybkości ścinania $\dot{\gamma}$, obliczanych w tym przypadku ze zmiany ciśnienia panującego na wejściu do dyszy wytłaczarskiej (Δp) oraz masy wydajności wytłaczania (\dot{M}), z uwzględnieniem geometrii dyszy wytłaczarskiej oraz gęstości przetwarzanego polimeru w temperaturze przetwórstwa.

Rysunek 1 ilustruje zaobserwowane – po przekroczeniu określonej krytycznej wartości naprężeń ścinających – kolejno powstające niestabilności przepływu, zdefiniowane i oznaczone w dalszym tekście jako: 2 – skóra rekina SR (ang. *sharkskin*), 3 – niestabilność cykliczna NC typu przyleganie-poślizg (ang. *stick-slip, spurt flow, oscillating melt fracture, bamboo-stick instability*), 4 – drugi zakres przepływu stabilnego 2S (ang. *superextrusion region*), 5 – niestateczność lepkosprężysta GF czyli pęknięcie stopu (ang. *gross melt fracture, meltfracture*) [41, 42].

Liczba oraz rodzaj pojawiających się niestabilności przepływu podczas wytłaczania stopionego polietylenu zależy głównie od jego budowy makrocząsteczkowej [43–45]. Sekwencję niestabilności ze wszystkimi wspomnianymi rodzajami przepływu obserwuje się jedynie w przypadku nielicznych rodzajów polietylenów liniowych o wąskim rozkładzie ciężarów cząsteczkowych. W trakcie wytłaczania polietylenu małej gęstości nie obserwuje się ani zjawiska skóry rekina, ani niestabilności cyklicznej [43]. Na krzywej płynięcia nie występuje plateau naprężeń ścinających widoczne na rys. 1.

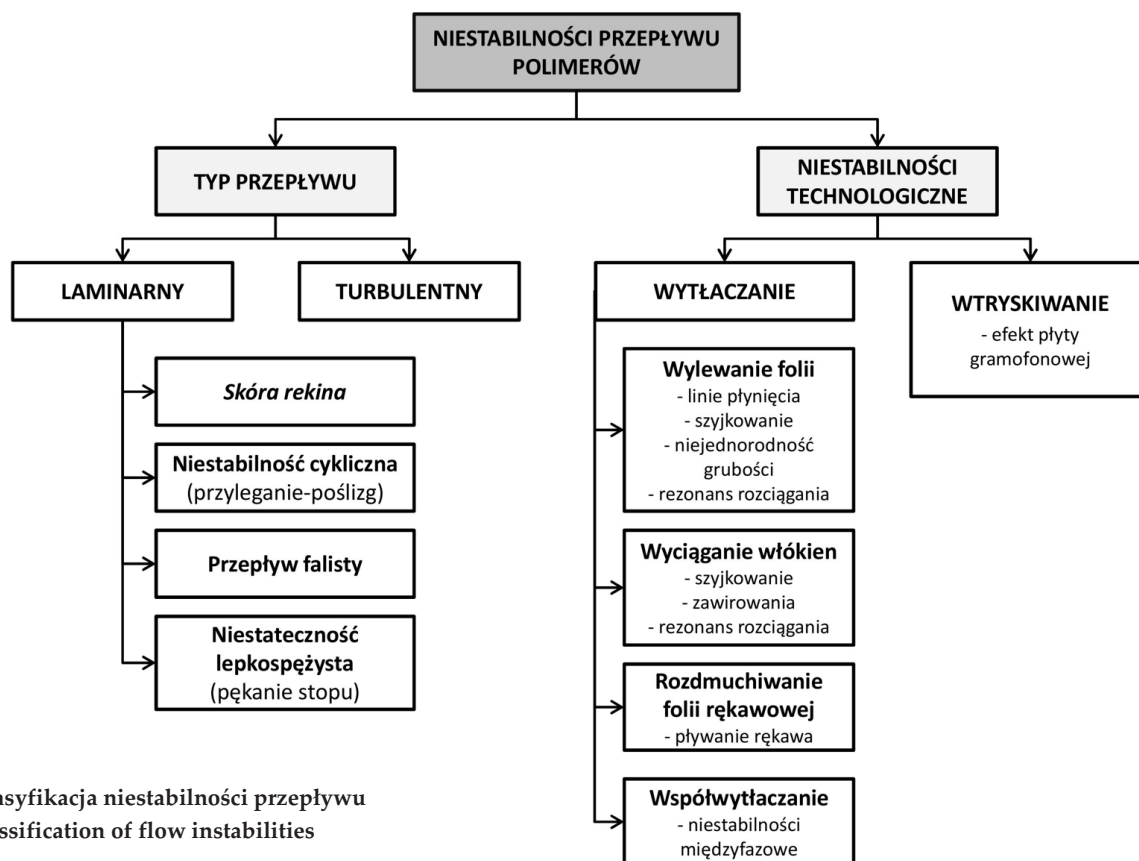
Oprócz opracowań dotyczących niestabilności przepływu obserwowanych w trakcie wytłaczania przez dyszę kapilarną, w literaturze można znaleźć opisy zakłóceń przepływu odpowiadających określonym technologiom przetwórczym [7]. Na podstawie opisanych niestabilności przepływu można zaproponować ich podział przedstawiony na rys. 2, przy czym należy zaznaczyć, że każdej z wyszczególnionych niestabilności technologicznych poświęcono obszerne studia literaturowe związane z powstawaniem i sposobami przeciwdziałania.

Odmienny podział niestabilności wytłaczania, uwzględniający jako kryterium jakość wytłoczyny (tj. jej fizykochemiczne właściwości, estetykę wyglądu i dokładność odwzorowania wymiarów) zaproponował Maddock [46]. Natomiast Fenner i współpracownicy [47] scharakteryzowali technologiczne niestabilności wytłaczania (w tym niestabilności przepływu), dzieląc je na dwie główne grupy:



Rys. 1. Zakresy występowania niestabilności przepływu w trakcie wytłaczania polietylenu liniowego małej gęstości: 1 – przepływ stabilny, 2 – niestabilność typu skóra rekina, 3 – niestabilność cykliczna, 4 – drugi zakres przepływu stabilnego, 5 – przepływ falisty, 6 – niestateczność lepkosprężysta

Fig. 1. Ranges of flow instability in linear low-density polyethylene extrusion: 1 – stable flow, 2 – type sharkskin, 3 – stick-slip, 4 – second region of stable flow, 5 – helicoidal flow, 6 – gross melt fracture



Rys. 2. Klasyfikacja niestabilności przepływu
Fig. 2. Classification of flow instabilities

– niestabilności cykliczne, tj. te, których występowanie jest związane z niestabilną pracą silnika, zmiennym położeniem granicy między strefą zasilania i sprężania, częstotliwością z jaką obraca się ślimak, sinusoidalnymi fluktuacjami temperatury wynikającymi z wykorzystanych układów sterowania elementami grzejnymi itp. Zgodnie z przedstawioną w pracach [46, 48] klasyfikacją, dotyczącą częstotliwości występowania niestabilności technologicznych zaobserwowanych w procesie wytłaczania (f_n), w odniesieniu do częstotliwości obrotowej ślimaka (f_s), rozróżnia się niestabilności:

- o dużej częstotliwości $f_n > f_s$
- o średniej częstotliwości $f_n = f_s$
- o małej częstotliwości $f_s < f_n$ (rzędu 1/min lub nawet 1/h),
- o bardzo małej częstotliwości $f_n < 10^{-2}$ (o częstości 1/min lub 1/h);

– niestabilności losowe, tj. te, których częstotliwość występowania jest niemożliwa do określenia, a wynika z charakteru procesu oraz dysfunkcji pracy maszyny przetwórczej.

NIESTABILNOŚCI WYSTĘPUJĄCE PODCZAS WYTŁACZANIA POLIMERÓW LINIOWYCH I ROZGAŁĘZIONYCH NA PRZYKŁADZIE POLIETYLENU

Skóra rekina

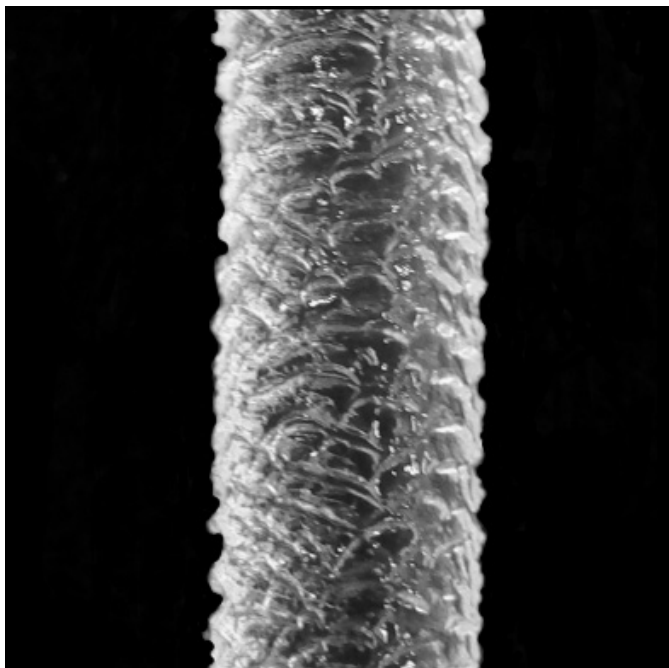
Niestabilność typu skóra rekina (SR), określana w literaturze również jako powierzchniowa niestateczność

lepkościowa, jest pierwszą niestabilnością obserwowaną w trakcie wytłaczania liniowych polietylenów. Zjawisko to występuje w warunkach relatywnie niewielkich wydajności wytłaczania, w porównaniu z wydajnością towarzyszącą pozostałym niestabilnościom przepływu, opisywanym w dalszej części opracowania [49]. Większość prac dotyczących zjawiska skóry rekina jest poświęconych przetwarzaniu liniowych polietylenów o wąskim rozkładzie ciężarów cząsteczkowych. Obecność SR odnotowano jednak również w procesie wytłaczania izotaktycznego polipropylenu (iPP) [32], polidimetylosiloksanu (PDMS) [43, 50] oraz poliizobutyleny (PIB) [51].

Niestabilność SR charakteryzuje się powstawaniem na powierzchni wytłoczony mikropęknięć, których amplituda rośnie wraz z szybkością ścinania. Wymiary obserwowanych uszkodzeń powierzchni wyrobu zazwyczaj nie przekraczają jednej dziesiątej średnicy wytłoczony [52]. Przykład niestabilności SR obserwowanej podczas wytłaczania PE-LLD przez dyszę o średnicy 2 mm przedstawia rys. 3.

Przyczyna powstawania tego zjawiska wciąż nie jest do końca wyjaśniona. Obecny stan wiedzy pozwala na przedstawienie dwóch sposobów interpretacji tego zjawiska.

Początkowo zjawisko skóry rekina opisano jako niestabilność cykliczną, ulokowaną w strefie wyjścia z głowicy wytłaczarskiej. Zgodnie z hipotezą zaproponowaną przez Vinogradowa [54], a krytycznie zweryfikowaną przez Cogswella i Wanga [55, 56], naprężenie ścinające przy wyjściu z dyszy wytłaczarskiej jest znacznie więk-



Rys. 3. Niestabilność typu skóra rekina w trakcie wytłaczania PE-LLD [53]

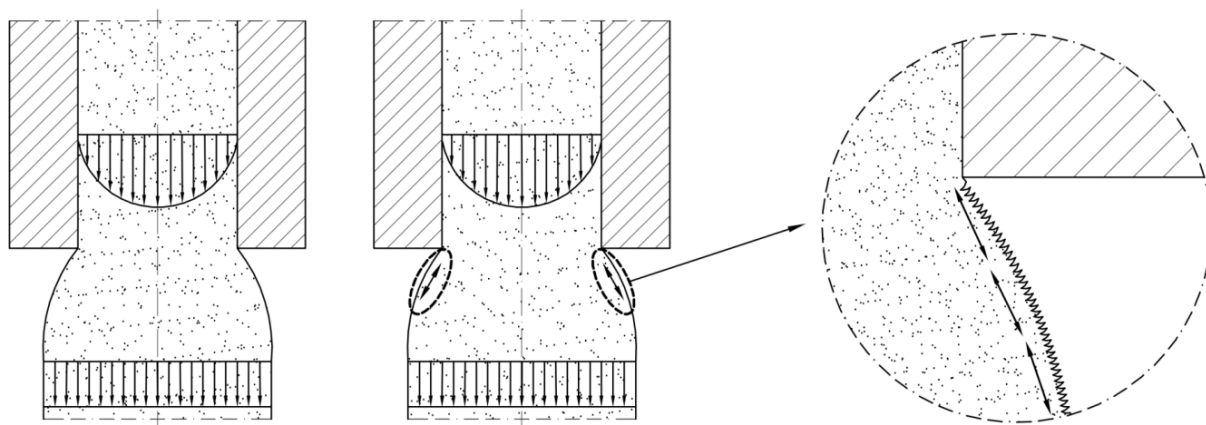
Fig. 3. Sharkskin instability observed during PE-LLD extrusion [53]

sze niż przy ściankach kanału przepływowego, co w warunkach znacznego przyrostu wydajności wytłaczania prowadzi do przekroczenia krytycznych wartości szybkości ścinania, a tym samym do powstania poślizgu przy ściance kanału przepływowego [57]. Zatem różnica pomiędzy efektem rozszerzenia strugi w trakcie występowania opisywanego poślizgu i jego braku prowadzić miałyby do wystąpienia zagłębień w wytłoczynie, a zjawisko SR byłoby silnie związane z krytycznymi wartościami definiującymi poślizg na wyjściu z dyszy. Moleenaar [58] stwierdził również, że obserwowana w warunkach większych intensywności przepływu niestabilność cykliczna powstaje na skutek sukcesywnego rozwoju

oscylacji relaksacji naprężeń i energii kumulowanej przy wyjściu z dyszy wytłaczarskiej, zapoczątkowanych podczas występowania zjawiska SR.

Drugi sposób interpretacji, zaproponowany przez Cogswella [55] i rozwinięty przez Miglera i współpracowników [59], tłumaczy mechanizm powstawania SR zmianą profilu prędkości strugi stopionego polimeru, między stanem podczas przepływu w kanale dyszy wytłaczarskiej, a stanem po jej opuszczeniu (rys. 4). Na skutek zmiany profilu prędkości z parabolicznego do niemalże płaskiego, zaraz po opuszczeniu dyszy, zewnętrzne warstwy wytłoczyny są poddawane bardzo intensywnemu rozciąganiu, prowadzącemu do utraty spójności materiału i pojawienia się charakterystycznych pęknięć na powierzchni wytłoczyny [60]. Po pojawieniu się defektu w postaci pęknięcia następuje zjawisko chwilowej relaksacji naprężeń w pobliżu krawędzi dyszy wytłaczarskiej, po czym w sposób cykliczny zjawisko kolejno się powtarza, z intensywnością oraz częstotliwością wynikającą z chwilowych warunków przepływu. W obydwu rozpatrywanych przypadkach w powstawaniu niestabilności SR istotną rolę odgrywają zarówno rodzaj i właściwości stopionego tworzywa polimerowego, jak i geometria dyszy wytłaczarskiej.

Zjawisko niestabilności typu skóra rekina może mieć charakter cykliczny. W literaturze pojawiają się próby opisu zależności częstotliwości i amplitudy zmian powstających na powierzchni wytłoczyny od warunków wytłaczania. Venet i Vergnes [61] ocenili wpływ naprężeń ścinających występujących przy ściance dyszy wytłaczarskiej na amplitudę pojawiających się na powierzchni wytłoczyny pęknięć oraz przedstawili zależność między częstotliwością i amplitudą. Wyniki badań jednoznacznie świadczyły o tym, że dominujący wpływ na amplitudę pęknięć mają naprężenia ścinające przy ściance kanału przepływowego. Jednocześnie, na podstawie analizowanej zależności częstotliwości od amplitudy pęknięć powierzchni wytłoczyny z polietylenu, wytłaczanego w różnej temperaturze przetwórstwa, nie stwierdzono



Rys. 4. Schemat tworzenia się niestabilności typu skóra rekina

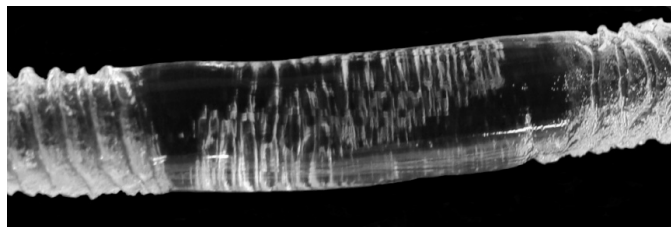
Fig. 4. Schematic of the formation of sharkskin instability

istotnej zależności między intensywnością przepływu (mającą bezpośredni wpływ na naprężenia ścinające, a w konsekwencji na amplitudę pęknięć) a zmianą częstotliwości. Dopiero w temp. 210 °C zaobserwowano nieznaczne zwiększenie częstotliwości, proporcjonalne do zmian amplitudy powstających pęknięć [61].

Tzoganakis i współpr. [62], na podstawie analizy topologii powierzchni wytłocznym uszkodzonych na skutek występowania SR wykazali, że oprócz cyklicznych pęknięć, odpowiadających częstotliwości charakterystycznej dla danej wydajności wytłaczania, równocześnie występują pęknięcia o innych częstotliwościach i mniejszych amplitudach.

Niestabilność cykliczna

Niestabilność cykliczna (NC), opisywana w polskojęzycznej literaturze również jako niestabilność typu przyleganie-poślizg, charakteryzuje się naprzemiennym występowaniem niestabilności SR oraz odcinków bez uszkodzeń powierzchni [63–67]. Zjawisko NC jest obserwowane w trakcie wytłaczania stopionego polietylenu dużej gęstości oraz polietylenów liniowych małej gęstości. Niestabilności tego typu towarzyszą intensywne skoki ciśnienia na końcowym odcinku dyszy wytłaczarskiej, o okresie występowania od ok. 0,5 do 5 s [7, 68]. Przykład niestabilności cyklicznej występującej podczas wytłaczania PE-LLD przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Niestabilność cykliczna w trakcie wytłaczania PE-LLD [53]
Fig. 5. Stick-slip instability observed during PE-LLD extrusion [53]

Zjawisko NC jest związane z przepływem naprzemiennym występującym w warunkach różnych wartości poślizgu przy ścianke kanału przepływowego o małej i dużej intensywności. W literaturze są rozpowszechnione dwie hipotezy występowania niestabilności typu przyleganie-poślizg, zweryfikowane na podstawie doświadczeń przeprowadzonych w różny sposób.

Pierwsza z hipotez przypisuje powstawanie cyklicznych zmian poślizgu przy ścianke kanału przepływowego mechanizmowi naprzemiennego adsorpcji-desorpcji, czyli defektowi adhezji między stopionym materiałem polimerowym, a materiałem stanowiącym kanał przepływowy. Druga z hipotez, zaproponowana przez Bergema [69], określa NC jako utratę kohezji materiału polime-

rowego w pobliżu ścianki kanału przepływowego. Zjawisko to opisywano jako naprzemiennie powtarzające się rozplątywanie (ang. *entanglement*) zakleszczonych między sobą łańcuchów polimerowych zaadsorbowanych do powierzchni kanału przepływowego, oraz znajdujących się w przemieszczającej się strudze stopionego polimeru [70–72]. Przyściennej utracie spójności materiału polimerowego towarzyszą więc cykliczne przejścia z zakresu słabego do intensywnego poślizgu przy ścianke kanału. Allal i współpr. [70] stwierdzili, że początek i koniec zakresu występowania NC jest związany z krytycznymi wartościami naprężeń ścinających τ_{C1} i τ_{C2} , w znacznym stopniu zależnych od budowy makrocząstek polimeru i jego adhezji do materiału stanowiącego kanał przepływowy.

Do oceny makroskopowych zmian wartości poślizgu, towarzyszących występowaniu niestabilności cyklicznej, w celu dokładnego opisu zachodzących zjawisk przyścienne, wykorzystano zróżnicowane metody doświadczenia. Oprócz najprostszych metod pomiarowych, opartych na analizie poślizgu metodą Mooneya [73], zastosowano także wizyjne techniki pomiarowe. Umożliwiają one dokładną ocenę wartości przyściennego poślizgu przy ścianke kanału podczas występowania dwóch rodzajów przepływu – z poślizgiem oraz bez poślizgu (w trakcie przepływu tłokowego, ang. *plug flow*) [74, 75]. Münsted i współpr. do oceny niestabilności cyklicznej wykorzystali techniki pomiarów laserowych LDV (ang. *Laser Doppler Velocimetry*) [74], natomiast Gonzalez – technikę wizyjną PIV (ang. *Particle Image Velocimetry*) [75]. Münsted jednoznacznie wykazał bardzo intensywny wzrost prędkości liniowej wytłoczyny podczas przepływu tłokowego w porównaniu z prędkością liniową wytłoczyny w trakcie przepływu z występującą niestabilnością typu skóra rekina. Ponadto, profile prędkości stopionego polimeru, obserwowane w przekroju dyszy wytłaczarskiej w trakcie występowania przepływu tłokowego, charakteryzowały się niewielkim rozrzutem wartości w odniesieniu do prędkości w położeniu zerowym, tj. w środku wytłoczyny [74].

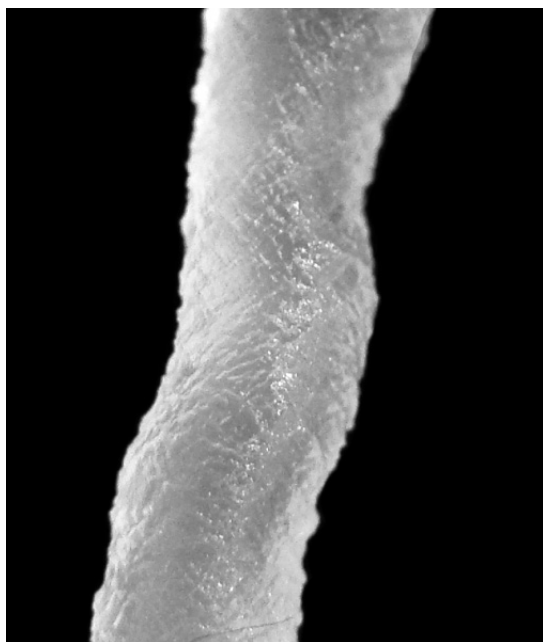
Intensywny wzrost prędkości liniowej wytłoczyny może powodować nawet 40-proc. spadek ciśnienia mierzonego na wejściu do dyszy wytłaczarskiej. W przypadku występowania SR wyroby wytłaczane mają jedynie defekty powierzchniowe, co nie wpływa w bezpośredni sposób na stabilność procesu produkcyjnego, wystąpienie niestabilności typu NC może prowadzić nawet do przerwania procesu technologicznego. Intensywne zmiany prędkości liniowej wytłoczyny mogą w istotnym stopniu utrudnić synchronizację prędkości wytłaczania z wydajnością peryferyjnych urządzeń odbiorczych [57].

Wspomniane wcześniej zjawisko określone jako drugi zakres przepływu stabilnego (2S) jest zazwyczaj obserwowane w wąskim zakresie szybkości ścinania. Początkowo występuje naprzemiennie ze zjawiskiem typu SR w trakcie niestabilności cyklicznej. W warunkach większej wydajności wytłaczania udział 2S jest większy niż

SR, po czym obserwuje się jedynie przepływ tłokowy [67].

Niestateczność lepkosprężysta

Zjawisko niestateczności lepkosprężystej, nazywane również pękaniem stopu lub ostateczną niestatecznością lepkosprężystą (GF), jest ostatnią w sekwencji niestabilności obserwowanych w procesie wytłaczania, w warunkach bardzo dużej wydajności [15]. Niestabilność ta, jako jedyna, występuje podczas przepływu wszystkich tworzyw polimerowych. Skutkuje powstawaniem nieregularnych pęknięć oraz chaotycznych odkształceń wytłoczyny. Niestateczność lepkosprężysta jest definiowana również jako niestabilność objętościowa (ang. *volume melt fracture*) [57, 76, 77]. Rysunek 6 przedstawia zdjęcie wytłoczyny polietylenowej podczas występowania tego zjawiska.



Rys. 6. Niestateczność lepkosprężysta w trakcie wytłaczania PE-LD [53]

Fig. 6. Gross melt fracture observed during PE-LLD extrusion [53]

Przepływ falisty (por. rys. 2) może być klasyfikowany jako niestateczność lepkosprężysta o małej intensywności bez widocznych pęknięć powierzchni. Zjawisko to, na przykładzie wytłaczania izotaktycznego polipropylenu, opisał Tao [34], użył jednak uogólnionego określenia *melt fracture* w odniesieniu do jedynej formy powstających niestabilności. Przepływ falisty można zaobserwować również w trakcie wytłaczania PE-LD przez dyszę kapilarną, przed wystąpieniem w pełni wykształconego zjawiska niestateczności lepkosprężystej.

Powstawanie niestateczności lepkosprężystej podczas wytłaczania jest wynikiem formowania się chao-

tycznego przepływu przy wejściu do dyszy wytłaczarskiej. Wraz ze zwiększającą się intensywnością przepływu Bagley i Birks [78] obserwowali stopniowe formowanie się wirów wokół wejścia do kapilary, przez którą wytłaczano stopiony polietylen. Dużej wydajności wytłaczania towarzyszyły znaczne naprężenia rozciągające. Zwiększanie intensywności, a więc i prędkości przepływu, powoduje utratę ciągłości przepływu lepkosprężystej cieczy. W efekcie powstaje nierównomierny profil prędkości przepływu na przekroju dyszy wytłaczarskiej, co skutkuje nieregularnymi deformacjami wytłoczyny opuszczającej kanał przepływowy.

Bardzo dużą rolę w przebiegu zjawiska GF odgrywa kształt geometryczny dyszy wytłaczarskiej. Dowiedziono, że zastosowanie odpowiednich kątów wejścia do dyszy 2α (od 90° do 120°) może w istotnym stopniu opóźnić powstawanie niestateczności lepkosprężystej, przesuwając punkt pojawienia się GF w kierunku większych wartości wydajności wytłaczania [79]. Ciekawym zjawiskiem, zarejestrowanym w badaniach laboratoryjnych prowadzonych przy użyciu reometru kapilarnego, było częściowe oraz całkowite ograniczenie występowania GF w wyniku zastosowania dysz kapilarnych o dużym stosunku długości do średnicy (l/d). Zwiększenie długości użytej dyszy kapilarnej powodowało przesunięcie punktu pojawienia się GF do odpowiednio większych szybkości ścinania [80].

Zjawiska SR i NC występują często w praktyce przemysłowej (zwłaszcza w trakcie wytłaczania folii z rodmuchiowaniem lub w trakcie wytłaczania przez dysze kapilarne i szczelinowe), natomiast niestateczność lepkosprężysta to zjawisko rzadko obserwowane, a więc niepowodujące ograniczenia wydajności produkcji. Jest to konsekwencją występowania GF przy bardzo dużych wartościach intensywności ścinania oraz poprzedzania go jedną z wcześniej wymienionych niestabilności. Wyjątek stanowi technologia współwytłaczania, w szczególności pokrywania izolacji kablowych, w której to zjawisko jest obserwowane [7, 81].

PODSUMOWANIE

Występowanie niestabilności przepływu w trakcie wytłaczania stopionych tworzyw polimerowych stanowi poważny problem technologiczny, prowadzący do znacznego ograniczania wydajności procesu. Mechanizm powstawania większości opisanych w literaturze niestabilności przepływu pozostaje nadal niewyjaśniony, stanowiąc wciąż aktualny temat badań. Niniejsza praca miała na celu usystematyzowanie polskiego nazewnictwa stosowanego do opisu zjawisk niestabilności przepływu, związanych z tzw. elastyczną turbulencją występującą w trakcie wytłaczania materiałów polimerowych. Omówiono niestabilności przepływu obserwowane w trakcie wytłaczania polietylenu liniowego małej gęstości, odnosząc się do hipotez ich powstawania oraz specyficznych warunków występowania.

PODZIĘKOWANIE

Autor dziękuje prof. dr. hab. inż. Tomaszowi Sterzyńskiemu, prof. dr. hab. inż. Ryszardowi Stellerowi oraz prof. dr. hab. inż. Markowi Bielińskiemu za cenne uwagi dotyczące nazewnictwa oraz wsparcie merytoryczne.

LITERATURA

- [1] Rabek F.: „Współczesna wiedza o polimerach”, PWN, Warszawa 2009.
- [2] Szlezyngier W., Brzozowski Z.K.: „Tworzywa Sztuczne. Tworzywa ogólnego zastosowania, Tom I”, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.
- [3] Szlezyngier W., Brzozowski Z.K.: „Tworzywa Sztuczne. Polimery specjalne i inżynieryjne, Tom II”, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 2012.
- [4] Czaja K.: „Polietylen”, WNT, Warszawa 2005.
- [5] Saechtling H.: „Tworzywa Sztuczne — poradnik”, WNT, Warszawa 2000.
- [6] Kricheldorf H.R.: „Handbook of Polymer Synthesis, Part A”, Marcel Dekker, Nowy Jork 1992.
- [7] Hatzikiriakos S.G., Migler K.B.: “Polymer Processing Instabilities. Control and Understanding” (red. Hatzikiriakos S.G., Migler K.B.), Marcel Dekker, Nowy Jork 2005.
- [8] Vergnes B.: *International Polymer Processing* **2015**, 30, 3. <http://dx.doi.org/10.3139/217.3011>
- [9] Larson R.G.: *Rheologica Acta* **1992**, 31, 213. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00366504>
- [10] Malkin A.Ya.: *Polymer Science Series C* **2006**, 48, 21. <http://dx.doi.org/10.1134/S1811238206010024>
- [11] Joshi Y.M., Denn M.M.: *Rheology Reviews* **2004**, 1.
- [12] Dealy J.M.: “Polymer Processing Instabilities. Control and Understanding” (red. Hatzikiriakos S.G., Migler K.B.), Marcel Dekker, Nowy Jork 2005.
- [13] Koopmans R., Den Doelder J., Molenaar J.: „Polymer Melt Fracture”, CRC Press, Boca Raton 2011.
- [14] Szlezyngier W.: „Podstawy reologii polimerów”, Wydawnictwo PR, Rzeszów 1994.
- [15] Kembłowski Z.: „Reometria płynów nienewtonowskich”, WNT, Warszawa 1973.
- [16] Kloziński A.: *Polimery* **2010**, 55, 575.
- [17] Steller R.: *Rheologica Acta* **1993**, 32, 192. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00366682>
- [18] Miller E., Rothstein J.P.: *Rheologica Acta* **2004**, 44, 160. <http://dx.doi.org/10.1007/s00397-004-0393-4>
- [19] Meulenbroek B., Storm C., Bertola V. i in.: *Physical Review Letters* **2003**, 90, 024502.
- [20] Muliawan E.B., Hatzikiriakos S.G., Sentmanat M.: *International Polymer Processing* **2005**, 20, 60. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1862>
- [21] Peacock A.: “Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications”, Marcel Dekker, Nowy Jork 2000.
- [22] Lee H.-Y., Kim D.H., Son Y.: *Polymer* **2006**, 47, 3929. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2006.03.084>
- [23] Gupta R.K.: “Polymer and Composite Rheology, Second Edition”, Marcel Dekker, Nowy Jork 2000.
- [24] Moynihan R.H., Baird D.G., Ramanathan R.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **1990**, 36, 255. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257\(90\)85012-N](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257(90)85012-N)
- [25] Tordella J.P.: *Transaction of the Society of Rheology* **1957**, 1, 203.
- [26] Graham M.D.: *Chaos* **1999**, 9, 154. <http://dx.doi.org/10.1063/1.166386>
- [27] Mackley M.R., Rutgers R.P.G., Gilbert D.G.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **1998**, 76, 281. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257\(97\)00122-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00122-5)
- [28] Burghelca T.I., Griess H.J., Münstedt H.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **2010**, 165, 1093. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2010.05.007>
- [29] Kim Y.C., Yang K.S.: *Polymer Journal* **1999**, 31, 579. <http://dx.doi.org/10.1295/polymj.31.579>
- [30] Kim Y.C., Yang K.S., Choi C.-H.: *Journal of Applied Polymer Science* **1998**, 70, 2187. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19981212\)70:11<2187::AID-APP13>3.0.CO;2-5](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19981212)70:11<2187::AID-APP13>3.0.CO;2-5)
- [31] Fujiyama M., Inata H.: *Journal of Applied Polymer Science* **2002**, 84, 2111. <http://dx.doi.org/10.1002/app.10373>
- [32] Fujiyama M., Inata H.: *Journal of Applied Polymer Science* **2002**, 84, 2120. <http://dx.doi.org/10.1002/app.10374>
- [33] Suzuki M., Md Ali M.A., Okamoto K. i in.: *Advances in Polymer Technology* **2009**, 28, 185. <http://dx.doi.org/10.1002/adv.20159>
- [34] Tao Z., Huang J.-C.: *Polymer* **2003**, 44, 719. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00830-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00830-3)
- [35] Vlachopoulos J., Lidorikis S.: *Polymer Engineering and Science* **1971**, 11, 1. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760110102>
- [36] Chee K.K., Rudin A.: *Rheologica Acta* **1980**, 19, 76. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01523857>
- [37] Hassell D.G., Embery J., McLeish T.C.B., Mackley M.R.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **2009**, 157, 1. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.08.010>
- [38] Mackay M.E., Henson D.J.: *Journal of Rheology* **1998**, 42, 1505. <http://dx.doi.org/10.1122/1.550930>
- [39] Othman N., Jazrawi B., Mehrkhodavandi P., Hatzikiriakos S.G.: *Rheologica Acta* **2012**, 51, 357. <http://dx.doi.org/10.1007/s00397-011-0613-7>
- [40] Cooper-White J., Mackay M.E.: *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **1999**, 37, 1803. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(19990801\)37:15<1803::AID-POLB5>3.0.CO;2-M](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-0488(19990801)37:15<1803::AID-POLB5>3.0.CO;2-M)
- [41] “Detection of Flow Instabilities (Shark-Skin)” w: “Product description Shark-Skin” (Rev. 0,04.08.08), Göttfert, Odenwald, Niemcy 2000.
- [42] Agassant J.-F., Arda D.R., Combeaud C. i in.: *International Polymer Processing* **2006**, 21, 239. <http://dx.doi.org/10.3139/217.0084>
- [43] Denn M.M.: *Annual Review of Fluid Mechanics* **2001**, 33, 265.
- [44] Santamaría A., Fernández M., Sanz E. i in.: *Polymer* **2003**, 44, 2473. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00048-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00048-X)
- [45] Liu C., Wang J., He J.: *Polymer* **2002**, 43, 3811. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00201-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00201-X)
- [46] Maddock B.H.: *SPE Journal* **1964**, 20, 1277.
- [47] Fenner R.T., Cox A.P., Isherwood D.P.: *Polymer* **1979**, 20, 733. [http://dx.doi.org/10.1016/0032-3861\(79\)90248-9](http://dx.doi.org/10.1016/0032-3861(79)90248-9)
- [48] Sterzyński T.: *Polimery* **1999**, 44, 558.

- [49] Shore J.D., Ronis D., Piché L., Grant M.: *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* **1997**, 55, 2976. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.55.2976>
- [50] El Kissi N., Piau J.M.: "Rheology for Polymer Melt Processing" (red. Piau J.-M., Agassant J.-F.), Elsevier, Amsterdam 1996.
- [51] Lund J.K., Pohl H.A.: *The Canadian Journal of Chemical Engineering* **1965**, 43, 231. <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.5450430503>
- [52] Moynihan R.H., Baird D.G., Ramanathan R.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **1990**, 36, 255. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257\(90\)85012-N](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257(90)85012-N)
- [53] Barczewski M.: „Analiza niestabilności stopionego polietyleny w trakcie wytłaczania”, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska 2015.
- [54] Vinogradov G.V., Friedman M.L., Yarlykov V., Malkin A.Y.A.: *Rheologica Acta* **1970**, 9, 323. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01975398>
- [55] Cogswell F.N.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **1977**, 2, 37. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257\(77\)80031-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0257(77)80031-1)
- [56] Barone J.R., Plucktaveesak N., Wang S.Q.: *Journal of Rheology* **1999**, 43, 245. <http://dx.doi.org/10.1122/1.551032>
- [57] Ramamurthy A.V.: *Journal of Rheology* **1986**, 30, 337. <http://dx.doi.org/10.1122/1.549852>
- [58] Molenaar J., Koopmans R.J., den Doelder C.F.J.: *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* **1998**, 58, 4683. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.58.4683>
- [59] Migler K.B., Son Y., Qiao F., Flynn K.: *Journal of Rheology* **2002**, 46, 383. <http://dx.doi.org/10.1122/1.1445186>
- [60] Sentmanat M.L., Muliawan E., Hatzikiriakos S.G.: *SPE AN-TEC Technical Papers* **2005**, 101536.
- [61] Venet C., Vergnes B.: *Journal of Rheology* **1997**, 41, 873. <http://dx.doi.org/10.1122/1.550837>
- [62] Tzoganakis C., Price B.C., Hatzikiriakos S.G.: *Journal of Rheology* **1993**, 37, 355. <http://dx.doi.org/10.1122/1.550447>
- [63] Tordella J.P.: *Journal of Applied Physics* **1956**, 27, 454. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1722401>
- [64] Bagley E.B., Cabott I.M., West D.C.: *Journal of Applied Physics* **1958**, 29, 109. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1722930>
- [65] Vinogradov G.V., Protasov V.P., Dreval V.E.: *Rheologica Acta* **1984**, 23, 46. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01333875>
- [66] Vinogradov G.V., Ivanova L.I.: *Rheologica Acta* **1967**, 6, 209. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01976438>
- [67] El Kissi N., Piau J.M., Toussaint F.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **1997**, 68, 271. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257\(96\)01507-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257(96)01507-8)
- [68] Delgadillo-Velázquez O., Hatzikiriakos S.G.: *Polymer Engineering and Science* **2007**, 47, 1317. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20811>
- [69] Bergem N.: "Visualisation studies of polymer melt anomalies in extrusion", Proceedings of 7th International Congress of Rheology, Swed. Soc. Rheol., Göthenburg, Szwecja 1976, str. 50.
- [70] Allal A., Vergnes B.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **2009**, 164, 1. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2009.06.007>
- [71] Georgiou G.: "Polymer Processing Instabilities. Control and Understanding" (red. Hatzikiriakos S.G., Migler K.B.), Marcel Dekker, Nowy Jork 2005.
- [72] Hatzikiriakos S.G., Dealy J.M.: *Journal of Rheology* **1991**, 35, 497. <http://dx.doi.org/10.1122/1.550178>
- [73] Kloziński A., Sterzyński T.: *Polimery* **2007**, 52, 583.
- [74] Münstedt H., Schmidt M., Wassner E.: *Journal of Rheology* **2000**, 44, 413. <http://dx.doi.org/10.1122/1.551092>
- [75] Rodríguez-González F., Pérez-González J., de Vargas L., Marín-Santibáñez B.M.: *Rheologica Acta* **2010**, 49, 145. <http://dx.doi.org/10.1007/s00397-009-0398-0>
- [76] Dealy J.M., Kim S.: "Polymer Processing Instabilities. Control and Understanding" (red. Hatzikiriakos S.G., Migler K.B.), Marcel Dekker, Nowy Jork 2005.
- [77] Howells E.R., Benbow J.: *Transactions in Plastics Industry* **1962**, 30, 240.
- [78] Bagley E.B., Birks A.M.: *Journal of Applied Physics* **1960**, 31, 556. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1735627>
- [79] Kim S., Dealy J.M.: *Polymer Engineering and Science* **2002**, 42, 482. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10965>
- [80] Carreras E.S., El Kissi N., Piau J.M. i in.: *Rheologica Acta* **2006**, 45, 209. <http://dx.doi.org/10.1007/s00397-005-0010-1>
- [81] Borke B.H.: "Oscillatory flow of PP and its effect on conductor eccentricity", International Wire & Cable Symposium Proceedings, IWCS Inc., Eatontown, New Jersey 1998, str. 294.

Otrzymano 15 IV 2015 r.