

Dr inż. Aneta Tor-Świątek
Dr inż. Bronisław Samujło

Katedra Procesów Polimerowych
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: a.tor@pollub.pl; b.samujlo@pollub.pl

Wykorzystanie badań termowizyjnych do analizy stabilności procesu wytłaczania mikroporującego poli(chlorku winylu)

Słowa kluczowe: *Wytłaczanie mikroporujące, środek mikroporujący, mikrosfery, tworzywa polimerowe, termowizja*

Keywords: *Microcellular extrusion process, blowing agent, microspheres, polymer materials, thermovision*

Streszczenie: Znaczącą rolę w procesach przetwórstwa tworzyw odgrywają warunki procesu takie jak temperatura, ciśnienie, szybkość obrotowa ślimaka, czas. Podczas modyfikacji tworzywa polimerowego w procesie wytłaczania porującego oraz mikroporującego na skutek działania podwyższonej temperatury oraz jednocześnie działania poroforu następują istotne zmiany w przebiegu procesu wytłaczania. Kolejną zmianą, jaką niesie za sobą wpływ obu czynników jest zmiana właściwości oraz struktury fizycznej otrzymanych wytworów. Z tego względu konieczny staje się taki dobór poszczególnych warunków przetwórstwa, w tym szczególnie temperatury oraz parametrów maszyn i urządzeń przetwórczych, aby proces mógł być prowadzony efektywnie i stabilnie.

Abstract: Essential role in polymer processing takes processing conditions i.e. temperature, pressure, screw rotational speed and time. During the polymer modification in cellular and microcellular extrusion process significant changes in the process ensue. Influence of this two factors caused also another changes in properties and physical structure of obtained extruded products. Because of that, proper selection of processing conditions, specially temperature, machines and equipment parameters is necessary. In such a case, process will be effective and stable.

1. Wprowadzenie

Przebieg każdego z procesów przetwórstwa tworzyw polimerowych, zarówno termoplastycznych, jak i termoutwardzalnych uzależniony jest od szeregu czynników, m.in. wyboru odpowiedniej metody przetwórstwa. Każdą z metod charakteryzują znamienne warunki, które muszą zostać spełnione, aby proces nie tylko mógł zaistnieć, ale przede wszystkim był efektywny, stabilny i wydajny [6, 7, 12, 14]. Wśród popularnych metod przetwórstwa takich jak wtryskiwanie, wytłaczanie konwencjonalne czy wytłaczanie powlekające na uwagę zasługuje proces wytłaczania mikroporującego [2, 12, 16]. Umożliwia on otrzymywanie wytworów o zmienionych właściwościach fizycznych, mechanicznych i użytkowych oraz o odmiennej strukturze fizycznej. Elementy powstałe na skutek modyfikacji tworzywa polimerowego za pomocą środków mikroporujących charakteryzują się znacznie zmniejszoną gęstością, sztywnością oraz twardością. Wykazują ponadto mniejszy skurcz przetwórczy oraz dobre właściwości tłumiące. Powoduje to powstanie

nowych kierunków zastosowań tworzyw polimerowych, wszędzie tam, gdzie duże znaczenie ma masa, elastyczność czy twardość wytworów [3].

Modyfikacja w procesie wytłaczania, powstała na skutek mikrooporowania tworzywa polimerowego, ma miejsce na końcu układu uplastyczniającego wytłaczarki i musi być przeprowadzona tak, aby użyty środek mikrooporujący (porofor) rozłożył się w odpowiednim miejscu [9]. Właściwy przebieg procesu przetwórstwa metodą wytłaczania mikrooporującego zapewnia odpowiedni dobór tworzywa polimerowego i poroforu, warunków przetwórstwa oraz konstrukcji poszczególnych maszyn i narzędzi przetwórczych umieszczonych odpowiednio w linii technologicznej [1].

Wytłaczanie mikrooporujące polega na wprowadzeniu do tworzywa przetwarzanego środka mikrooporującego, który w odpowiednich warunkach przetwórstwa rozkłada się jednocześnie powodując zmianę struktury tworzywa na mikrooporowatą. Możliwe jest otrzymywanie wytworów mikrooporowatych w całym przekroju lub posiadających litą warstwę wierzchnią i mikrooporowaty rdzeń wytłoczony. Wiąże się to z zastosowaniem odpowiednio intensywnego chłodzenia wytłaczanego elementu, uniemożliwiającego zapoczątkowanie procesu mikrooporowania w warstwie wierzchniej [2, 4].

Na strukturę mikrooporowatą wytłoczony otrzymanej w wyniku procesu wytłaczania mikrooporującego wpływają przede wszystkim takie czynniki jak ilość dozowanego poroforu oraz temperatura przetwórstwa w kolejnych strefach układu uplastyczniającego wytłaczarki oraz w głowicy wytłaczarskiej. Wartości tych czynników powinny być odpowiednio dobrane, a w trakcie prowadzenia procesu kontrolowane w celu uzyskania struktury jednolitej w całym przekroju wytwarzanego kształtownika. Najważniejsze staje się ustalenie i ustabilizowanie zakresu zadanych wartości temperatury, dlatego zasadne wydaje się zobrazowanie termiczne takiego procesu za pomocą badań termowizyjnych [15].

Obecnie badania termowizyjne są szeroko wykorzystywane w różnych dziedzinach nauki i życia, takich jak energetyka, budownictwo, diagnostyka maszyn, elektronika, ochrona środowiska, medycyna, ratownictwo morskie, przemysł [10, 13]. Termowizja, określana również jako termografia, zajmuje się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem oraz wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty. Otrzymany w wyniku pomiarów termowizyjnych obraz (termograf) jest odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni obserwowanego obiektu. Badania intensywności zjawisk cieplnych są bogatym źródłem informacji zarówno o stanie technicznym maszyn, poprawności działania, jak i o zmianach zachodzących podczas ich eksploatacji [8, 9]. Umożliwiają dostosowanie cech funkcjonalnych poszczególnych elementów linii technologicznej do konkretnego procesu oraz dobranie takich warunków przetwórstwa, aby proces był prowadzony właściwie, a otrzymany produkt charakteryzował się wysoką jakością [11, 16].

2. Stanowisko badawcze i przebieg badań

Badania termowizyjne procesu wytłaczania mikrooporującego prowadzono w linii technologicznej wytłaczania kształtowników. W skład linii wchodziły: wytłaczarka jednoślindakowa T-32-25, głowica wytłaczarska trzpieniowa o średnicy dyszy 5mm, urządzenie chłodzące oraz odbierające. W trakcie prowadzonego procesu zmieniano szybkość obrotową ślimaka wytłaczarki stosując wartości 0,75; 1,02; 1,30; 1,57; 1,85 s⁻¹ oraz zawartość środka mikrooporującego w tworzywie przetwarzanym w zakresie 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 % mas. w stosunku do masy tworzywa. Modyfikacji poddano poli(chlorek winylu) plastyfikowany Alfavinyl GFM-31-TR za pomocą środka mikrooporującego w postaci mikrosfer Expancel 930 MB 120 [5]. Temperatura w poszczególnych strefach układu

uplastyczniającego wycłaczarki wynosiła odpowiednio 100, 110, 120, 130 °C, temperatura głowicy wycłaczarskiej 140 °C a temperatura czynnika chłodzącego 17 °C.

Do badań termowizyjnych procesu wycłaczania mikroporującego wykorzystano kamerę termowizyjną V-20, model ER005-25. Umożliwia ona zdalne bezkontaktowe rejestrowanie rozkładu temperatury na powierzchni badanych obiektów. Kamera jest wyposażona w detektor fotowoltaiczny typu PDI-2TE-5 o dużej czułości. Obraz tworzono metodą przeszukiwania mechanicznego przy pomocy układu zwierciadeł i precyzyjnych zespołów napędowych. Obraz tworzony był punkt po punkcie, linia po linii. Przy pomocy zespołu soczewek, promieniowanie podczerwone ogniskuje się na detektorze. Napięcie generowane przez detektor jest zależne od mocy promieniowania. Poprzez precyzyjne sterowanie ruchem zwierciadeł możliwy jest pomiar tego promieniowania punkt po punkcie.

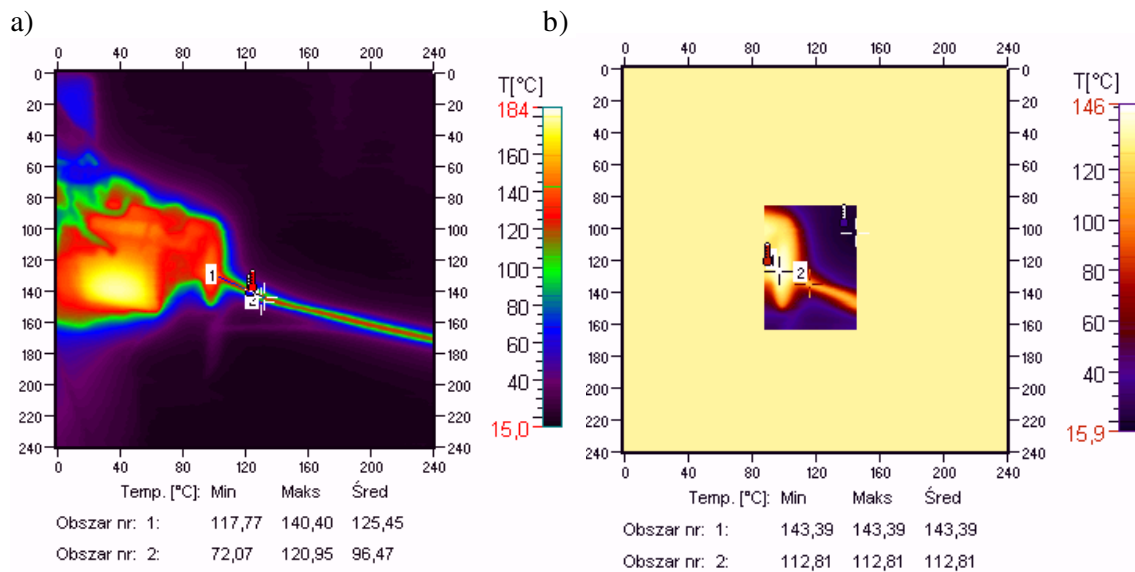
Układ detekcji promieniowania podczerwonego w kamerze V-20 jest oparty na chłodzonym termoelektrycznie detektorze HgCdTe, który umożliwia wykonywanie pomiaru temperatury w zakresie od -10 do 500°C, przy rozdzielczości temperaturowej NEDT wynoszącej od 0,05 do 5°C, odpowiednio do wartości rejestrowanej temperatury. Kąt skanowania wynosi 30°, natomiast tworzony termogram składa się z 57600 punktów (240 punktów w 240 liniach), przy czasie skanowania linii wynoszącym 7,2 ms. Kamera ta umożliwia zdalny pomiar, rejestrację oraz wizualizację promieniowania podczerwonego, emitowanego przez maszyny, narzędzia, urządzenia przetwórcze oraz wytwarzane elementy z tworzyw, odpowiadającego temperaturze ich powierzchni [11, 13].

Badanymi obiektami podczas prowadzonego procesu wycłaczania mikroporującego były: dysza głowicy wycłaczarskiej oraz wytłoczyna mikroporowata opuszczająca dyszę głowicy. Rejestrowano wartości promieniowa podczerwonego emitowanego przez powierzchnię badanych obiektów, co po przetworzeniu umożliwiło jego wizualizację w postaci obrazów termalnych. Szczegółową analizę zmian temperatury przeprowadzono na odcinku pomiarowym wytłoczyny, obejmującym 29 punktów pomiarowych. Analizie poddano także zmianę temperatury w czasie procesu wycłaczania wybranego punktu na powierzchni dyszy głowicy wycłaczarskiej oraz na powierzchni wytłoczyny w odległości 40 mm od dyszy.

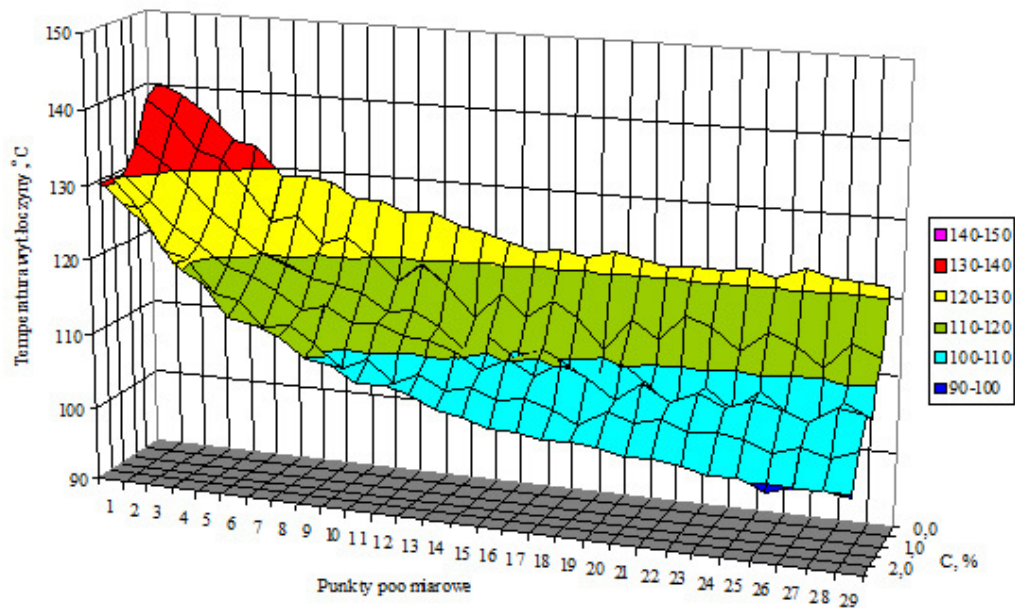
3. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych pomiarów termowizyjnych otrzymano obrazy termalne (rys. 1) wraz z wartościami temperatury powierzchni badanych obiektów oraz jej rozkładem. Następnie obrazy poddano analizie za pomocą specjalistycznego programu komputerowego Therm V20 ver. 2.2.2.

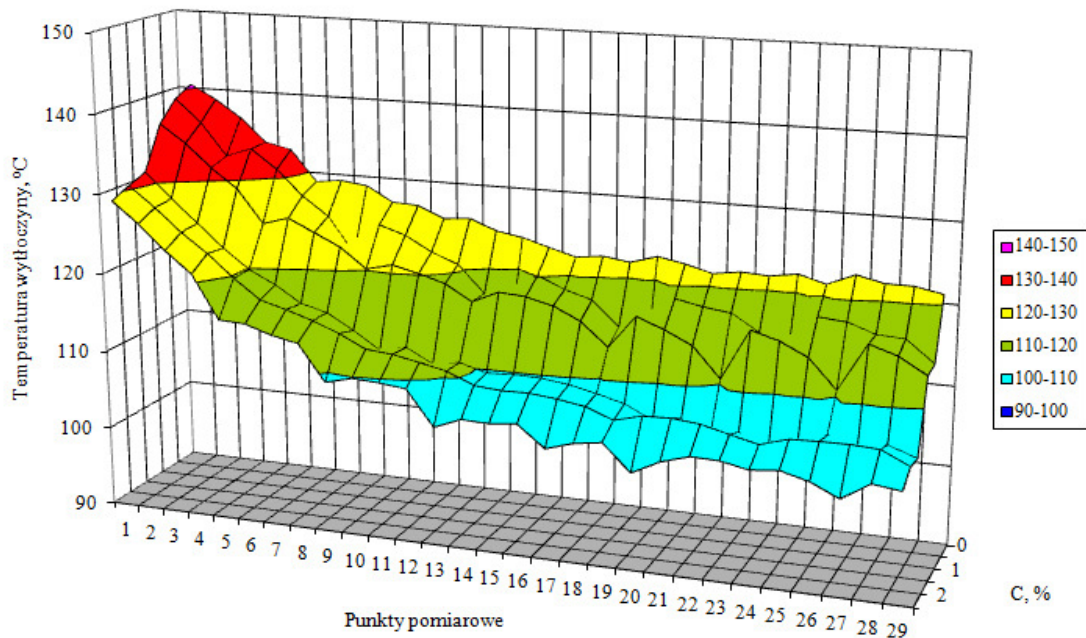
Na podstawie przeprowadzonych wyników pomiarów temperatury wytłoczyny mikroporowatej bezpośrednio po wyjściu z dyszy głowicy wycłaczarskiej w poszczególnych punktach pomiarowych sporządzono wykresy obrazujące zależności mierzonej temperatury wytłoczyny mikroporowatej, zawierającej środek mikroporujący w ilości 0÷2,5% mas. przy poszczególnych zmienianych szybkościach obrotowych ślimaka w zakresie 0,75÷1,85 s⁻¹. Stosowne wykresy przedstawiono na rysunkach 2÷6.



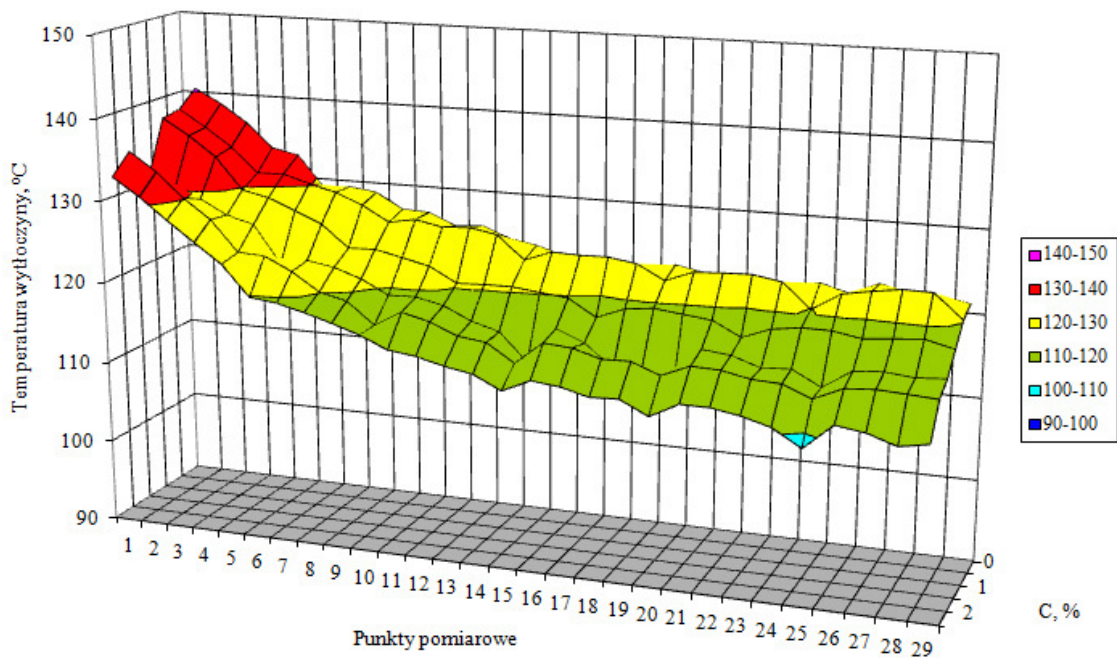
Rys. 1. Przykładowe obrazy termalne głowicy wytłaczarskiej i wytłoczyny mikroporowatej: a) z zaznaczonym odcinkiem pomiarowym na powierzchni wytłoczyny, b) z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na powierzchni dyszy głowicy oraz wytłoczyny



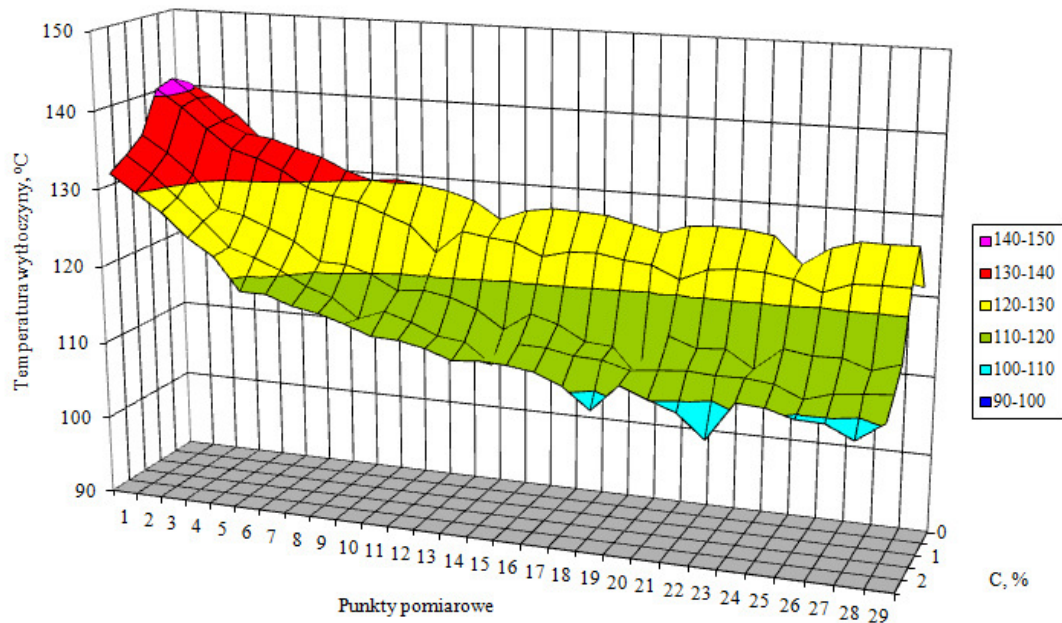
Rys. 2. Zależność temperatury wytłoczyny w poszczególnych punktach pomiarowych przy szybkości obrotowej ślimaka $v_1 = 0,75 \text{ s}^{-1}$ oraz zawartości środka mikroporującego w zakresie $0 \div 2,5\%$ mas.



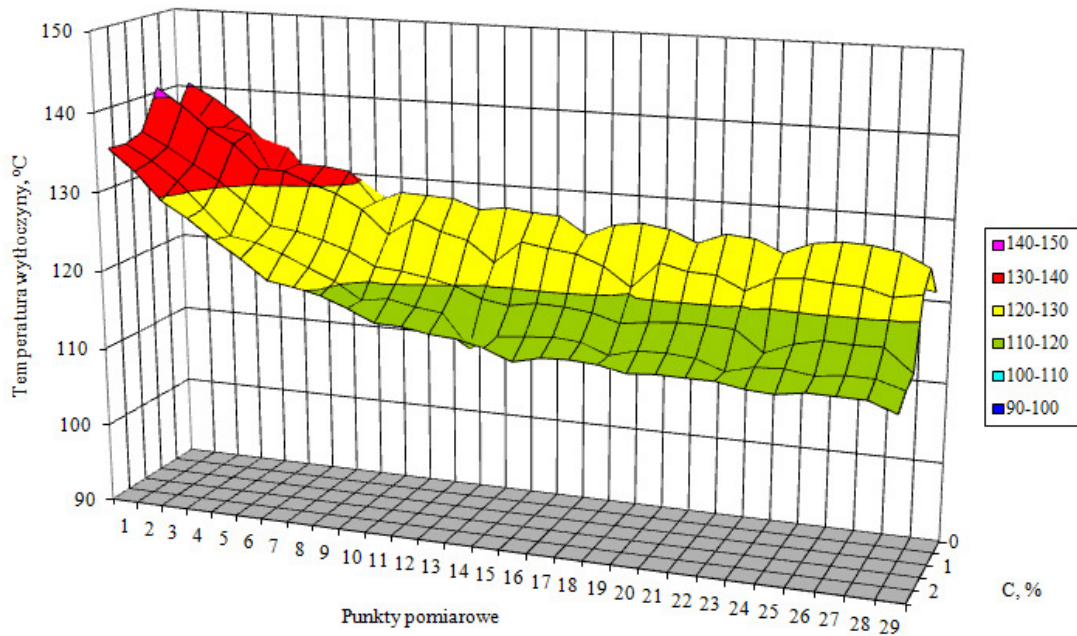
Rys. 3. Zależność temperatury wycieczyny w poszczególnych punktach pomiarowych przy szybkości obrotowej ślimaka $v_2 = 1,02 \text{ s}^{-1}$ przy zawartości środka mikroporującego w zakresie $0 \div 2,5\%$ mas.



Rys. 4. Zależność temperatury wycieczyny w poszczególnych punktach pomiarowych przy szybkości obrotowej ślimaka $v_3 = 1,30 \text{ s}^{-1}$ przy zawartości środka mikroporującego w zakresie $0 \div 2,5\%$ mas.



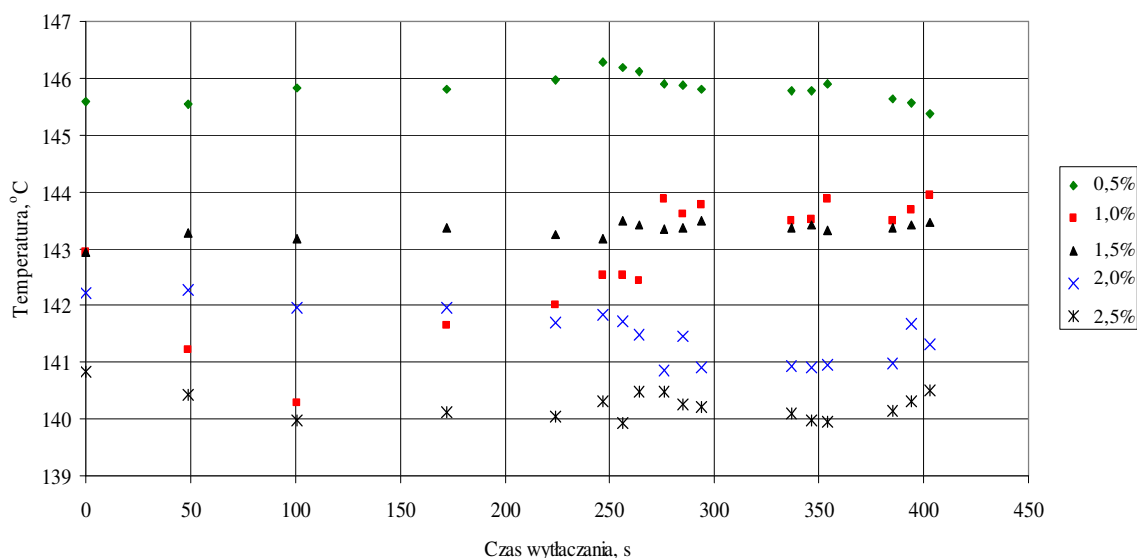
Rys. 5. Zależność temperatury wycłoczyny w poszczególnych punktach pomiarowych przy szybkości obrotowej ślimaka $v_4 = 1,57 \text{ s}^{-1}$ przy zawartości środka mikroporującego w zakresie 0÷2,5% mas.



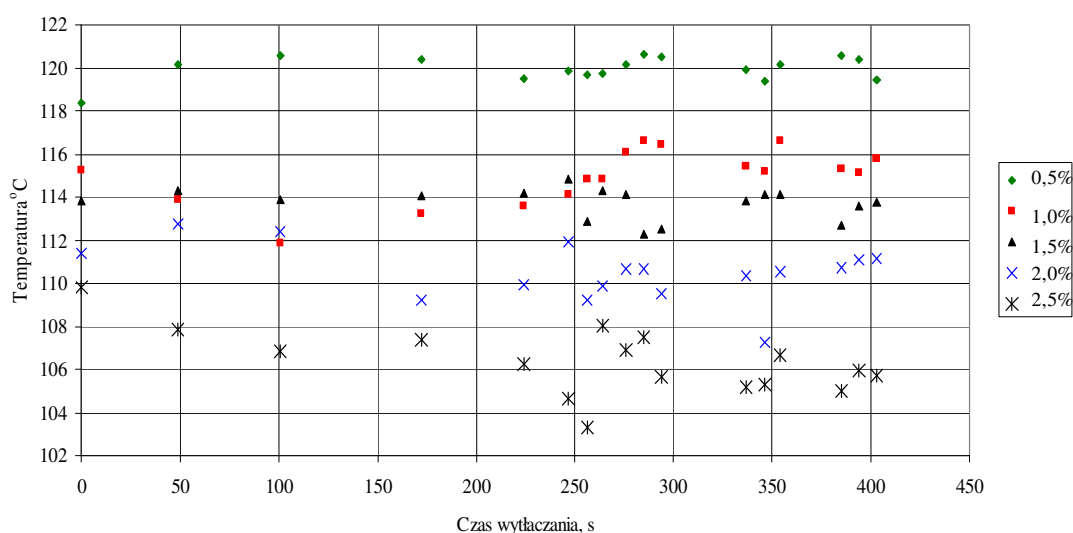
Rys. 6. Zależność temperatury wycłoczyny w poszczególnych punktach pomiarowych przy szybkości obrotowej ślimaka $v_5 = 1,85 \text{ s}^{-1}$ przy zawartości środka mikroporującego w zakresie 0÷2,5% mas.

Wraz ze zwiększeniem zawartości środka mikroporującego temperatura poli(chloru winylu) opuszczającego dyszę głowicy wycłaczarskiej uległa obniżeniu, przy czym w zmienianym zakresie dozowania był to spadek o $10,04^{\circ}\text{C}$. Można również przyjąć, że przy zawartości środka mikroporującego wynoszącej $1,5\%$ mas. temperatura wycłoczyny uległa pewnej stabilizacji i wynosiła około 120°C , zwłaszcza w punktach pomiarowych $13\div 29$. Podczas zwiększenia szybkości obrotowej ślimaka powyżej wartości $1,30\text{ s}^{-1}$ nastąpił wzrost temperatury wycłoczyny mikroporowatej dla zawartości środka mikroporującego w zakresie $0,5\%$ i 1% mas. oraz jej spadek dla zawartości mikrosfer powyżej $1,5\%$ mas.

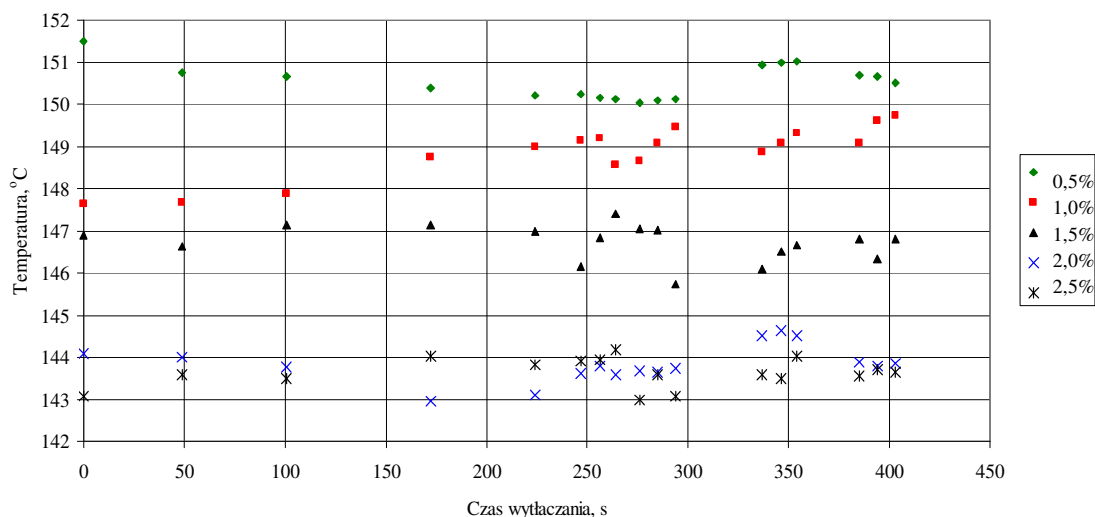
Na rysunkach 7÷10 przedstawiono przykładowe zakresy zmian temperatury podczas wycłaczania poli(chloru winylu) z różną zawartością mikrosfer na powierzchni dyszy głowicy wycłaczarskiej oraz wycłoczyny mikroporowatej przy minimalnej i maksymalnej wartości szybkości obrotowej ślimaka wycłaczarki.



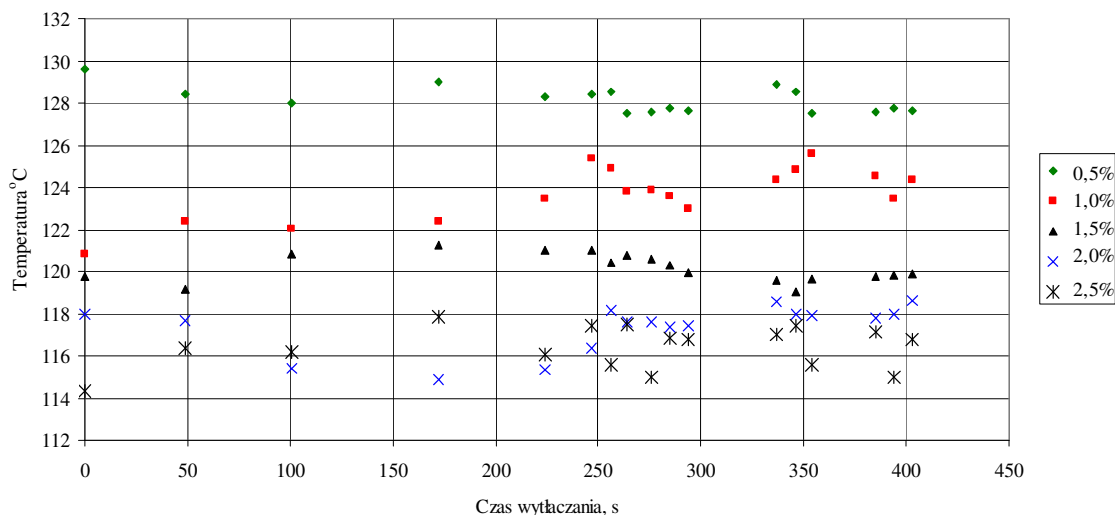
Rys. 7. Zależność temperatury dyszy od czasu procesu wytłaczania przy szybkości obrotowej ślimaka $v_1 = 0,75\text{ s}^{-1}$ oraz zawartości środka mikroporującego w zakresie $0\div 2,5\%$ mas.



Rys. 8. Zależność temperatury wycłoczyny od czasu procesu wytłaczania przy szybkości obrotowej ślimaka $v_3 = 1,30\text{ s}^{-1}$ oraz zawartości środka mikroporującego w zakresie $0\div 2,5\%$ mas.



Rys. 9. Zależność temperatury dyszy od czasu procesu wyłaczania przy szybkości obrotowej ślimaka $v_4 = 1,57 \text{ s}^{-1}$ oraz zawartości środka mikroporującego w zakresie 0÷2,5% mas.



Rys. 10. Zależność temperatury wycłoczyny od czasu procesu wyłaczania przy szybkości obrotowej ślimaka $v_5 = 1,85 \text{ s}^{-1}$ oraz zawartości środka mikroporującego w zakresie 0÷2,5% mas.

Analiza zmian temperatury w czasie trwania procesu wyłaczania poszczególnych tworzyw umożliwia w pewnym zakresie ocenę stabilności cieplnej procesu, a więc także utrzymanie w czasie procesu jednorodnej struktury fizycznej i właściwości wycłoczyny mikroporowatej. Wraz ze zwiększaniem szybkości obrotowej ślimaka od $0,75 \text{ s}^{-1}$ do $1,30 \text{ s}^{-1}$ maleje stabilność procesu, o czym świadczy zwiększenie rozrzutu zmierzonych wartości temperatury zarówno powierzchni dyszy głowicy wyłaczarskiej (od $1,49$ do $2,08^\circ\text{C}$) jak i wycłoczyny mikroporowatej (od $4,32$ do $5,31^\circ\text{C}$) oraz maksymalnych odchyłeń od wartości średniej. Dalsze zwiększanie szybkości obrotowej ślimaka do $1,85 \text{ s}^{-1}$ stabilizuje proces od strony cieplnej, gdyż omawiane wielkości zmniejszają swoje wartości odpowiednio do $1,61^\circ\text{C}$ oraz $3,27^\circ\text{C}$.

W podobny sposób zmieniają się wartości maksymalne odchylen temperatury powierzchni dyszy głowicy wycłaczarskiej oraz wycłoczyny mikroporowatej od wartości średniej. Przy najmniejszej wartości szybkości obrotowej ślimaka wynosi ona $0,96^{\circ}\text{C}$ dla dyszy głowicy wycłaczarskiej i zmienia się poprzez $1,39^{\circ}\text{C}$ do końcowej wartości wynoszącej $1,01^{\circ}\text{C}$. Analogiczne zmiany na powierzchni wycłoczyny mikroporowatej osiągają większe wartości i wynoszą odpowiednio $2,58$; $3,38$ oraz $1,43^{\circ}\text{C}$. Wraz ze zwiększaniem zawartości poroforu w tworzywie stabilność temperatury dyszy głowicy wycłaczarskiej zwiększa się, natomiast temperatury powierzchni wycłoczyny mikroporowatej ulega zmniejszeniu. Zwiększanie szybkości obrotowej ślimaka powoduje zwiększenie stabilności temperatury wycłoczyny mikroporowatej.

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że wprowadzenie poroforu do poli(chlorku winylu) wpływa znacząco na zjawiska cieplne wstępujące w procesie wycłaczania mikroporującego, zwłaszcza podczas przepływu tworzywa w kanałach głowicy wycłaczarskiej oraz ochładzania wycłoczyny bezpośrednio za głowicą. W badanym zakresie zawartości środka mikroporującego spadek temperatury wycłoczyny opuszczającej głowicę wycłaczarską wynosi około 7%, co można z dużym prawdopodobieństwem przypisać efektowi endotermicznemu towarzyszącemu poszerzaniu się mikrosfer podczas procesu mikroporowania. Zwiększa się także szybkość ochładzania otrzymanej wycłoczyny wraz ze zwiększaniem dozowania środka mikroporującego. Zmniejszania się różnica temperatury pomiędzy wycłoczyną mikroporowatą, a otaczającym ośrodkiem. Może to mieć wpływ na dalsze etapy procesu zachodzące już poza wycłaczarką, zwłaszcza na kalibrowanie i ochładzanie końcowe wycłoczyny, a więc w efekcie na strukturę i wynikające z niej właściwości wytworów mikroporowatych.

Obserwowany spadek temperatury wycłoczyny mikroporowatej podczas zwiększania ilości dozowanego poroforu może wynikać z charakterystyki użytego środka mikroporującego. Mikrosfery bowiem w wyniku działania podwyższonej temperatury pobierają ciepło czego skutkiem jest ich ekspansja.

Stabilność procesu wycłaczania mikroporującego polichlorku winylu w badanym zakresie zmiany szybkości obrotowej ślimaka wycłaczarki należy uznać za zadowalającą, przy czym zakres zmian temperatury elementu formującego wycłoczynę – dyszy głowicy wycłaczarskiej średnio wynosił zaledwie $1,7^{\circ}\text{C}$ przy maksymalnym zarejestrowanym odchyleniu od wartości średniej wynoszącym $3,6^{\circ}\text{C}$. Zmienność temperatury wycłoczyny mikroporowatej w czasie procesu na mierzonym odcinku sięgała $4,3^{\circ}\text{C}$.

Maksymalna różnica wartości temperatury wycłoczyny mikroporowatej w trakcie trwania procesu wyniosła nieco ponad 8°C , co już może mieć negatywny wpływ na konstituowanie jednorodnej struktury i właściwości wycłoczyny. Ogólnie uzyskaniu wysokiej stabilności cieplnej procesu sprzyjały najmniejsze oraz największe, z badanego zakresu, wartości szybkości obrotowej ślimaka wycłaczarki oraz małe zawartości środka porującego w tworzywie do 1,5% mas. W celu uzyskania wysokiej stabilności cieplnej procesu korzystne jest zastosowanie minimalnej lub maksymalnej wartości szybkości obrotowej ślimaka wycłaczarki oraz zawartości środka mikroporującego w ilości do 1,5% mas. w stosunku do masy tworzywa przetwarzanego.

Literatura

1. Bieliński M. Techniki porowania tworzyw termoplastycznych. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004; 10-25.

2. Borkowski J. Spienianie. Praca zbiorowa „Przetwórstwo tworzyw sztucznych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000; 147-149.
3. Garbacz T, Tor A. Wpływ zawartości środka porującego na właściwości użytkowe zewnętrznych powłok kabli. Polimery 2007; 4: 286-293.
4. Garbacz T., Samujło B. Wybrane właściwości geometrycznej struktury powierzchni wytworów porowatych otrzymanych z polietylenu. Polimery 2008; 6: 471-476.
5. Jonsson L., Rosskothén K.R. Mikrosphären - ein universelles Treibmittel. Kunststoffe – Plast Europe 2003; 7: 86-87.
6. Klepka T. Konstrukcje osiowo-symetrycznych wytworów o kształtach złożonych. Polimery 2008; 5: 48-54.
7. Krzyżak A, Sikora J W. Przetwarzalność tworzyw fenolowych wyznaczana metodą BIP. Polimery 2007; 1: 44-50.
8. Miękina W, Madura H. Podstawy teoretyczne pomiarów termowizyjnych. Praca zbiorowa pod red. H. Madury „Pomiary termowizyjne w praktyce”. Agenda Wydawnicza Paku, Warszawa 2004; 10-26.
9. Qiong Zhou, Chuan-Bo Cong. Exo-endermic blowing agent and its foaming behavior. Journal of Cellular Plastics 2005; 3: 225-234.
10. Różański L, Poloszyk S. Zastosowanie termowizji w diagnostyce maszyn. Praca zbiorowa pod red. H. Madury „Pomiary termowizyjne w praktyce”. Agenda Wydawnicza Paku, Warszawa 2004; 75-83.
11. Samujło B.: Selected aspects of thermovision in extrusion process. ICPP-2007, International Conference on Polymer Processing, Beijing, Chiny 2007; 126-128.
12. Stewart R. Extrusion. Plastics Engineering 2005; 5: 18-27.
13. Tor A, Samujło B. Badania termowizyjne procesu wytłaczania mikroporującego poli(chlorku winylu). Przetwórstwo Tworzyw 2010; 4: 225-227.
14. Tor A. Charakterystyka procesu wytłaczania powlekającego. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2005; 2: 18-22.
15. Tor-Świątek A, Sikora R. Modyfikacja poli(chlorku winylu) mikrosferami w procesie wytłaczania mikroporującego. Przetwórstwo Tworzyw 2011; 4: 248-251.
16. Wessel H. C. Wytłaczanie profili ze spienionego PVC. Wytłaczanie Tworzyw Sztucznych. Wydawnictwo Plastech, Warszawa 1999; 34-38.