

ELŻBIETA BOCIĄGA<sup>\*)</sup>, PAWEŁ PALUTKIEWICZ

Politechnika Częstochowska

Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją

Al. Armii Krajowej 19c, 42-201 Częstochowa

## Wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości i stan powierzchni wyprasek z polipropylenu

**Streszczenie** — Dokonano oceny wpływu zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości wyprasek wtryskowych z polipropylenu z udziałem 0,125–0,5 % poroforu endotermicznego. W badaniach stosowano cztery zmienne parametry wtryskiwania: procentową zawartość poroforu ( $c$ ), temperaturę formy ( $T_f$ ), temperaturę wtryskiwania ( $T_w$ ) i prędkość wtryskiwania ( $v_w$ ). Wykazano, że na masę i gęstość wyprasek wpływa głównie temperatura formy, przy czym z jej wzrostem masa i gęstość wyprasek maleje. Właściwości wytrzymałościowe wyprasek zależą zaś w znacznym stopniu od temperatury formy i temperatury wtryskiwania. Zastosowanie wyższych wartości pogarsza wydłużenie względne wyprasek przy maksymalnym naprężeniu rozciągającym ( $\epsilon_M$ ). Wyższa temperatura formy, sprzyjająca niekorzystnemu rozrostowi porów, jest jednak wskazana ze względu na wydłużenie czasu krystalizacji tworzywa, co w efekcie powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie wytworzonych wyprasek. Wypraski uzyskane z tworzywa z udziałem poroforu charakteryzują się mniejszą udarnością niż wypraski z tworzywa litego. Na stan powierzchni wyprasek, określane na podstawie wielkości zapadnięć, połysku i koloru, w sposób istotny wpływa zawartość poroforu i temperatura formy. Dodatek poroforu do tworzywa skutkuje zmniejszeniem zapadnięć, zwłaszcza w warunkach niższej temperatury formy, jednocześnie następuje pogorszenie połysku i zmiana koloru.

**Słowa kluczowe:** wtryskiwanie, porofory, porowanie, właściwości wyprasek.

### EFFECTS OF BLOWING AGENT CONTENT AND INJECTION MOULDING CONDITIONS ON SELECTED PROPERTIES AND SURFACE QUALITY OF POLYPROPYLENE MOULDED PARTS

**Summary** — The effects of blowing agent content and injection moulding conditions on the selected properties of polypropylene moulded parts containing 0,125–0.5 % endothermic blowing agent, were investigated. Four variable injection process parameters: the percentage of blowing agent ( $c$ ), mould temperature ( $T_f$ ), injection temperature ( $T_w$ ) and injection velocity ( $v_w$ ) were used in the experiments. It was found that the mass and density of moulded parts depend mainly on the mould temperature — with an increase in temperature, the decrease in mass and density of the parts was observed (Figs. 4–7). The mechanical properties of the parts were mostly influenced by the mould temperature and injection temperature (Figs. 8 and 9). The parts moulded at higher temperatures showed lower elongation at maximum force ( $\epsilon_M$ ). High mould temperature, which is conducive to the growth of pores, is advantageous because of the longer time of polymer crystallization and, as a result, the increase in tensile strength of the obtained parts. The moulded specimens made of polypropylene with the addition of blowing agent have lower impact strength than the parts obtained from solid polymer (Figs. 10 and 11). The surface state of the moulded parts (sink marks, colour and gloss) was mainly influenced by the blowing agent content and mould temperature (Figs. 12–19). The addition of blowing agent results in the reduction of sink marks, particularly at low mould temperature, but can lead to a loss of gloss and change of colour of the moulded products.

**Keywords:** injection moulding, blowing agents, foaming, moulded parts properties.

### WPROWADZENIE

Strukturę porowatą wyprasek wtryskowych uzyskuje się w wyniku rozkładu poroforu lub jego reakcji z two-

rzywem — ciekłym w temperaturze przetwórstwa — a następnie mieszanii się z uplastycznionym materiałem wydzielających się gazowych produktów (azotu, wodoru lub ditlenku węgla) [1, 2]. Proces porowania może być realizowany z wykorzystaniem wtryskarek konwencjonalnych, bez specjalistycznego oprzyrządowania, co

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji; bociaga@ipp.pcz.pl

w istotnym stopniu wpływa na koszty wytwarzania. Porofory w niewielkich ilościach można stosować, m.in. w celu polepszenia jakości wyprasek, a zwłaszcza redukcji ich skurczu i zapadnięć [1–6].

W badaniach opisanych w [7] potwierdzono korzystny wpływ porofoforów endotermicznych serii Hydrocerol, ograniczający masę wyprasek, skurcz przetwórczy, wielkość zapadnięć i wypaczeń oraz poprawiający stan ich powierzchni. W przypadku wyprasek z mieszaniny PE-HD i PP z porofoforem uzyskano zmniejszenie o 15 % masy w porównaniu z masą wyprasek litych, skracając czas całego cyklu wtryskiwania o 20 %. W procesie wytwarzania małych wyprasek z mieszaniny polimerowej EVA-PE-TPE z porofoforem Hydrocerol uzyskano aż dwukrotną redukcję masy. Stwierdzono jednak pogorszenie wyglądu powierzchni wyprasek (matowienie). W celu wytworzenia wypraski charakteryzującej się powierzchnią o korzystnym połysku zalecano zmianę parametrów przetwórstwa oraz dodanie środków powodujących lepsze rozpuszczenie poroforu w uplastycznionym tworzywie. W przypadku wyprasek z PP i ABS, zastosowanie poroforu umożliwiło wyeliminowanie wypaczeń i zmniejszenie masy wyprasek o 20 %.

Autorzy [8] zasugerowali stosowanie porofoforów w celu wzmocnienia wytrzymałości wyprasek, w których występują obszary łączenia strumieni tworzywa. Zbadano wypraski z polietylenu z zawartością 25 % miki i 0,6 % poroforu endotermicznego (mieszaniny kwasu wielokarboksylowego i węgla nieorganicznego). Zaobserwowano, że wytworzone wypraski nie pękały w obszarach łączenia strumieni tworzywa, ponadto wypraski porowate z obszarami łączenia strumieni tworzywa wykazywały większą wytrzymałość na rozciąganie niż wypraski lite, zarówno bez takich obszarów, jak i z obszarami łączenia strumieni tworzywa.

W publikacji [9] badano właściwości wyprasek z PE-HD porowanych przy użyciu 0,5–1,5 % poroforu endotermicznego (Hydrocerol CF40E) lub egzotermicznego (Genitron EPE). Wykazano istotny wpływ dodatku poroforu na pogorszenie wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia względnego przy zerwaniu, naprężenia przy zerwaniu i udarności.

Dodanie do tworzywa poroforu może mieć wpływ na wygląd powierzchni wyprasek, a zwłaszcza jej barwę i połysk [10, 11]. Struktura i właściwości wyprasek w dużej mierze zależą od warunków wtryskiwania, głównie temperatury tworzywa wtryskiwanego, temperatury formy, ciśnienia i prędkości wtryskiwania oraz czasu trwania poszczególnych faz cyklu wtryskiwania [12–14]. Podjęto zatem badania wpływu wymienionych warunków na jakość wyprasek wtryskowych wytwarzanych z tworzyw zawierających niewielką ilość poroforu, ocenianą na podstawie właściwości mechanicznych, dokładności odwzorowania kształtu i stanu powierzchni. Wprowadzenie do tworzywa odpowiedniej ilości poroforu daje możliwość uzyskania wyprasek charakteryzujących się małym skurczem, bez zapadnięć, dobrze

odwzorowujących gniazdo formujące formy wtryskowej. Zawartość poroforu musi być jednak tak dobrana, aby nie powodowała znacznego pogorszenia innych właściwości wyprasek, przede wszystkim właściwości wytrzymałościowych oraz stanu ich powierzchni. Zastosowanie porofoforów w procesie wytwarzania wyprasek wtryskowych powinno się także przyczynić do zmniejszenia liczby wytworów wadliwych, co jest ważne ze względów zarówno ekonomicznych, jak i ekologicznych (mniejsza ilość tworzywa niezbędna do wytworzenia określonej partii wyprasek, mniejsze zużycie energii, mniej odpadów poddawanych recyklingowi, itp.). Porowanie może być wykorzystywane również w procesie wytlączania [15, 16].

Poniższe opracowanie jest kontynuacją zagadnień przedstawionych w artykule opublikowanym w czasopiśmie *Polimery* 2011, 56, nr 10.

Celem badań była ocena wpływu zawartości poroforu oraz warunków wtryskiwania (temperatury wtryskiwania, temperatury formy i prędkości wtryskiwania) na wybrane właściwości wyprasek wtryskowych wytwarzanych z polipropylenu z porofoforem chemicznym. Przeprowadzono pomiary masy, gęstości, wytrzymałości na rozciąganie i udarności wyprasek oraz określono stan ich powierzchni w badaniach profilu, połysku i zmiany koloru.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

W badaniach stosowano polipropylen o nazwie handlowej Moplen HP648T firmy Basell Orlen Polyolefins.

Strukturę porowatą wyprasek uzyskano dzięki dodaniu do granulatu PP środka porującego Hydrocerol CF w postaci proszku o endotermicznym przebiegu rozkładu. Porofor dodawano w ilościach  $c = 0,125 \%$ ,  $0,25 \%$ ,  $0,375 \%$  lub  $0,5 \%$  masy granulatu.

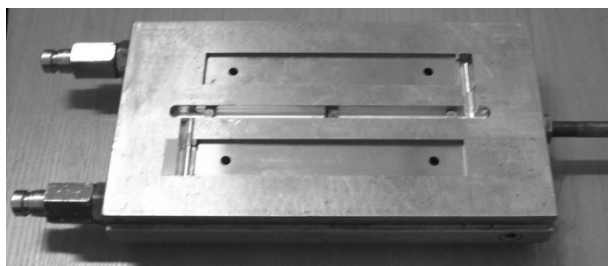
### Metodyka badań

Szczegółowy plan badań i parametry wtryskiwania przedstawiono we wspomnianej już, poprzedniej pracy.

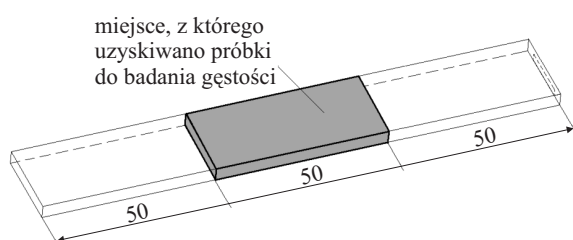
— Próbkę do oceny masy, gęstości i stanu powierzchni miały postać wyprasek prostopadłościennych o wymiarach  $150 \times 23 \times 4$  mm. Wykonano je stosując dwugniazdową formę z równoległym układem kanałów doprowadzających (rys. 1). Tworzywo doprowadzane do gniazda przez przewężkę szczelinową o wysokości 2 mm i szerokości 15 mm.

Pomiary masy wyprasek przeprowadzono z dokładnością  $\pm 0,1$  mg, przy użyciu wagi laboratoryjnej typu CP225 firmy Sartorius, z zamkniętą przestrzenią pomiarową. Zważono wypraski z dwóch gniazd formy, a uzyskane wyniki uśredniono stosując średnią arytmetyczną.

— Próbkę do pomiarów gęstości wycięto ze środka wyprasek prostopadłościennych użytych w pomiarach



Rys. 1. Wkładka formująca dwugniazdowej formy wtryskowej  
Fig. 1. Mould insert of two-cavity injection mould



Rys. 2. Wypraska z zaznaczonym obszarem, z którego uzyskiwano próbki do badania gęstości  
Fig. 2. Moulded part with marked area from which samples for density measurement were taken

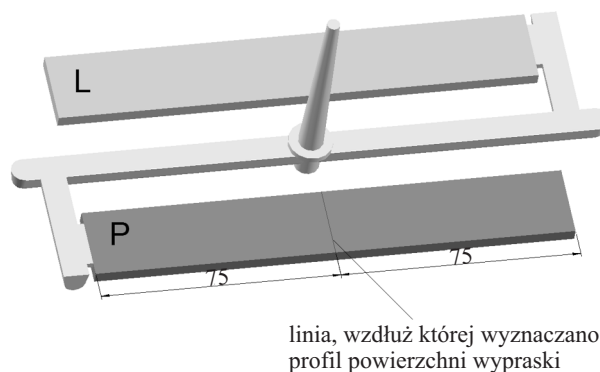
masy (rys. 2). Gęstość wyznaczono za pomocą wagi hydrostatycznej.

– W badaniach wytrzymałościowych, w statycznej próbie rozciągania stosowano próbki w postaci wiosełek, o grubości 4 mm, wykonane zgodnie z normą PN-EN ISO 527-2:1998.

Badania przeprowadzono stosując maszynę wytrzymałościową Inspekt Desk 20 firmy Hegewald & Peschke. Prędkość rozciągania wynosiła 50 mm/min.

– Oceny udarności ( $a_{CU}$ ) kształtek bez karbu, metodą Charpy'ego, dokonano używając młota udarowego Charpy-Izod 25 J Model IT 503 firmy Toropol, z oprogramowaniem Impact, zgodnie z PN-EN ISO 179-2:2001 II 2001. Próbki do pomiarów udarności, o wymiarach  $80 \times 10 \times 4$  mm, wycięto z próbek do badania wytrzymałości na rozciąganie.

– Dokładność odwzorowania wymiarów wyprasek określano na podstawie profili ich powierzchni i głębokości zapadnięć. Wykresy odwzorowujące profil powierzchni wyprasek prostopadłościennych wykonano w odniesieniu do strony ukształtowanej przez płaską płytę formującą (rys. 3). Do wyznaczenia profili powierzchni zastosowano stanowisko pomiarowe z profilografometrem New Form Talysurf 2D/3D 120, z oprogramowaniem „Ultra Surface 5.16”, „TalyMap Platinum 5.0” i „Ultra Contour 4.04”. Ze względu na możliwości pomiarowe urządzenia profile wyznaczano tylko w kierunku szerokości wyprasek. Z dokładnością  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  zmierzono odległość pomiędzy najwyższym i najniższym punktem profilu powierzchni wypraski ( $\Delta t$ ) będącą miarą stanu powierzchni wyprasek i dokładności odwzorowania



Rys. 3. Miejsce wyznaczania profilu powierzchni wyprasek  
Fig. 3. An area of the moulded part where profile was measured

kształtu gniazda formującego. W celu uniknięcia błędów pomiarowych wywołanych różnicą dokładności wykonania obu gniazd formujących i płaskiej płyty, pomiary wartości  $\Delta t$  wykonano w odniesieniu do wyprasek uzyskanych z gniazda P (rys. 3).

– Stan powierzchni wyprasek określano na podstawie jej połysku i koloru. Pomiar połysku wykonywano połyskomierzem 406L firmy Elcometer, badanie polegało na zmierzeniu intensywności odbitego i rozproszonego światła, w wąskim zakresie kąta odbicia. Intensywność światła odbitego zależy od materiału i kąta padania światła. Wyniki pomiarów połysku wyrażane są w jednostkach połysku  $GU$  (ang. *Gloss Units*). Wysoki połysk charakteryzuje duża wartość  $GU$  (do 100), natomiast mała wartość  $GU$  wskazuje na matowość powierzchni (brak połysku). Pomiar połysku może odbywać się z zastosowaniem dwóch różnych kątów padania światła, mianowicie:  $20^\circ$  (zalecany dla powierzchni o dużym połysku) i  $60^\circ$  (zalecany dla powierzchni o małym połysku). Zastosowano oznaczenia:  $\alpha_{20^\circ}$  – wartość połysku ( $GU$ ) przy kącie padania światła  $20^\circ$ ,  $\alpha_{60^\circ}$  – wartość połysku ( $GU$ ) przy kącie padania światła  $60^\circ$  [17].

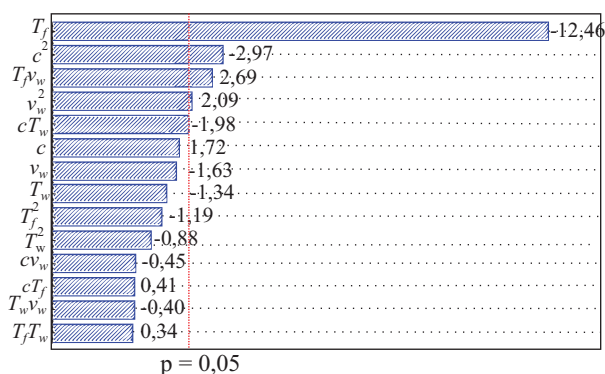
– Badanie koloru przeprowadzono za pomocą kolorymetru SP60 firmy X-rite, opierając się na przestrzeni barw CIELab, obejmującej w przybliżeniu zakres barw postrzegalnych przez oko ludzkie. Wyniki badań otrzymane tą metodą przedstawione są w postaci zmiennych  $a$ ,  $b$  oraz  $L$ . Wartość „ $a$ ” określa zmianę koloru od zielonego do czerwonego, natomiast „ $b$ ” od niebieskiego do żółtego.  $L$  oznacza wartość luminancji wyrażoną w  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Dla zerowych wartości „ $a$ ” i „ $b$ ”, luminancja  $L$  określa zmianę koloru od czarnego ( $L = 0$ ) do białego ( $L = 100$ ) [18].

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

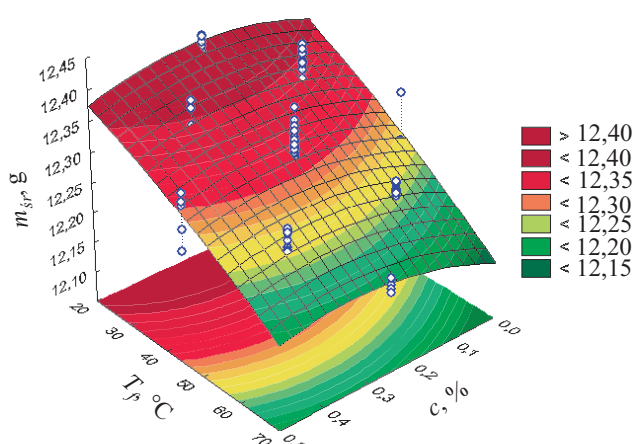
### Masa

Na podstawie pomiarów masy wyprasek wykonanych wg 18. wariantów planu badań stwierdzono, że ich masa zmieniała się w zakresie od 12,20 g do 12,40 g, w wariantach, odpowiednio, 12 i 13, w których zastoso-





wartość bezwzględna standaryzowanej oceny efektu

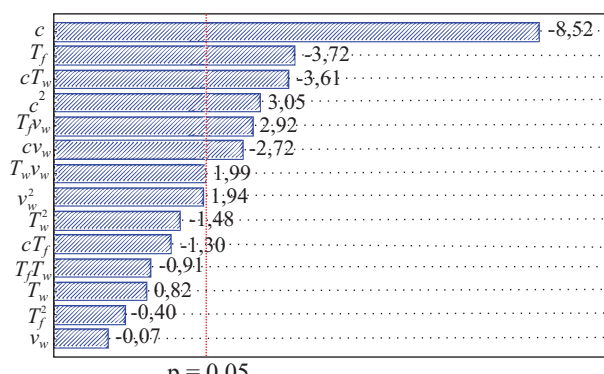
Rys. 4. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do masy wyprasek ( $m_{sr}$ )Fig. 4. Results of the Pareto analysis with reference to the moulded part mass ( $m_{sr}$ )Rys. 5. Zmiana masy wyprasek ( $m_{sr}$ ) w funkcji zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury formy ( $T_f$ ) ( $T_w = 235$  °C,  $v_w = 67,5$  mm/s)Fig. 5. Change in the moulded part mass ( $m_{sr}$ ) as a function of blowing agent content ( $c$ ) and mould temperature ( $T_f$ ) ( $T_w = 235$  °C,  $v_w = 67.5$  mm/s)

wano najwyższą (70 °C) i najniższą (20 °C) temperaturę formy. Z wykresu Pareto (rys. 4) można wywnioskować, że największy wpływ na masę wyprasek ma temperatura formy. Wraz z jej wzrostem masa wyprasek maleje, co jest konsekwencją bardziej intensywnego porowania w wyższej temperaturze.

Rysunek 5 przedstawia zależność masy wyprasek  $m_{sr}$  od zawartości poroforu oraz temperatury formy. Można zaobserwować, że największe wartości  $m_{sr}$  uzyskują wypraski wytworzone w niższej temperaturze formy, natomiast mała zawartość poroforu nie wpływa w znaczącym stopniu na masę wyprasek.

### Gęstość

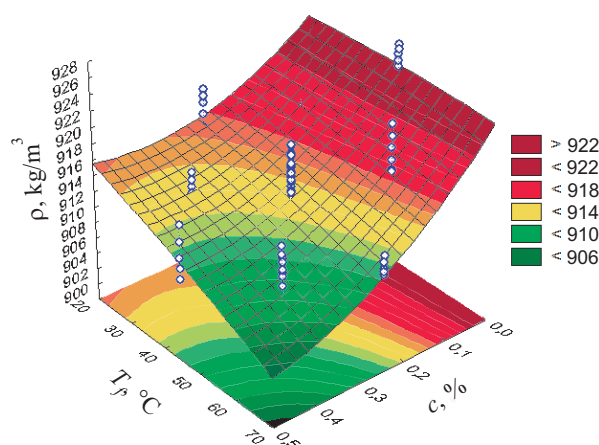
Gęstość wyprasek zmieniała się w przedziale 908–924 kg/m<sup>3</sup>. Z wykresu Pareto (rys. 6) wynika, że naj-



wartość bezwzględna standaryzowanej oceny efektu

Rys. 6. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do gęstości wyprasek ( $\rho$ )Fig. 6. Results of the Pareto analysis with reference to the moulded part density ( $\rho$ )

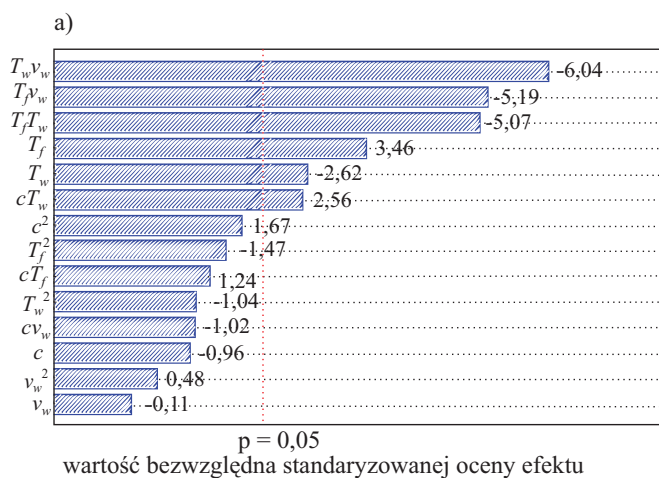
wiekszy wpływ na gęstość wyprasek ma zawartość poroforu, co jest oczywiste, a ponadto — w mniejszym stopniu — temperatura formy. Należy jednak zauważyć, że różnice wartości  $p$  nie są duże i nie przekraczają 4 %, co jest konsekwencją zastosowanej, niewielkiej zawartości poroforu w tworzywie.

Rys. 7. Zmiana gęstości ( $\rho$ ) w funkcji zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury formy ( $T_f$ ) ( $T_w = 235$  °C,  $v_w = 67,5$  mm/s)Fig. 7. Change in density ( $\rho$ ) as a function of blowing agent content ( $c$ ) and mould temperature ( $T_f$ ) ( $T_w = 235$  °C,  $v_w = 67.5$  mm/s)

Rysunek 7 ilustruje zależność gęstości wyprasek od procentowej zawartości poroforu i temperatury formy. W warunkach wyższej temperatury formy, wraz ze wzrostem udziału poroforu w tworzywie następuje zauważalne zmniejszenie gęstości wyprasek, w przypadku natomiast niższej temperatury formy zmiany gęstości są niewielkie. Mniejsza gęstość wyprasek wytworzonych w wyższej temperaturze formy jest efektem wydłużonego czasu porowania oraz rozrostu porów, wynikającego z dłuższego czasu chłodzenia wyprasek.

## Właściwości wytrzymałościowe

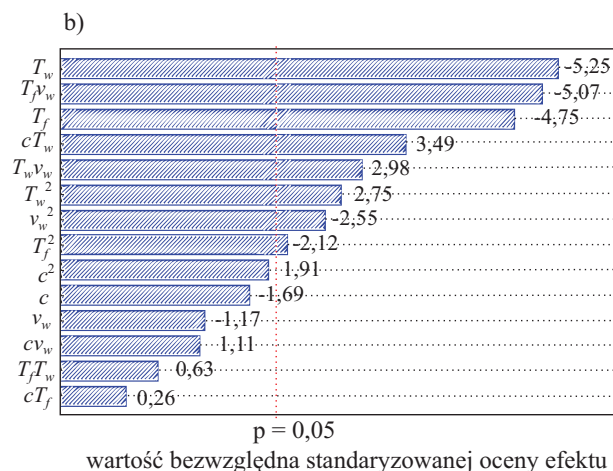
Rysunki 8 i 9 przedstawiają wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie  $\sigma_m$  i wydłużenia względnego przy maksymalnym naprężeniu rozciągającym  $\varepsilon_M$  wyprasek ze wszystkich wariantów planu badań. Największy wpływ na wartość  $\sigma_m$  mają interakcje pomiędzy dwoma czynnikami: temperaturą wtryskiwania ( $T_w$ ) i prędkością wtryskiwania ( $v_w$ ), temperaturą formy ( $T_f$ ) i prędkością wtryskiwania ( $v_w$ ) oraz temperaturą formy ( $T_f$ ) i temperaturą wtryskiwania ( $T_w$ ). Zawartość poroforu natomiast w niewielkim tylko stopniu wpływa na  $\sigma_m$ .



tura sprzyja rozrostowi porów, które w takich warunkach mogą łączyć się ze sobą tworząc strukturę o nielicznych dużych porach, a skutkiem takiego zjawiska jest zmniejszenie wartości  $\varepsilon_M$ .

## Udarność

Z wykresu Pareto (rys. 10) wynika, że największy wpływ na udarność  $a_{CU}$  wyprasek ma zawartość poroforu, interakcja między procentową zawartością poroforu i temperaturą wtryskiwania oraz temperatura formy. Udarność nie zależy natomiast od prędkości wtryskiwania.



Rys. 8. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie ( $\sigma_m$ ) — (a) i wydłużenia względnego przy maksymalnym naprężeniu rozciągającym ( $\varepsilon_M$ ) — (b)

Fig. 8. Results of the Pareto analysis with reference to tensile strength ( $\sigma_m$ ) — (a) and elongation at maximum force ( $\varepsilon_M$ ) — (b)

Można także zauważyć, że wyższa temperatura formy i niższa temperatura wtryskiwania powodują niewielkie polepszenie właściwości wytrzymałościowych (rys. 9a). Można to tłumaczyć tym, że w uzyskanych w niższej temperaturze wtryskiwania wypraskach występują liczne, ale drobne pory, co nie wpływa znacząco na pogorszenie wytrzymałości wytworu, natomiast w warunkach wyższej temperatury następuje rozrost porów do większych rozmiarów, co z kolei skutkuje pogorszeniem wytrzymałości. Wzrost wytrzymałości wyprasek wytworzonych w wyższej temperaturze formy może być efektem zwiększenia udziału fazy krystalicznej w tworzywie w następstwie wydłużonego czasu chłodzenia.

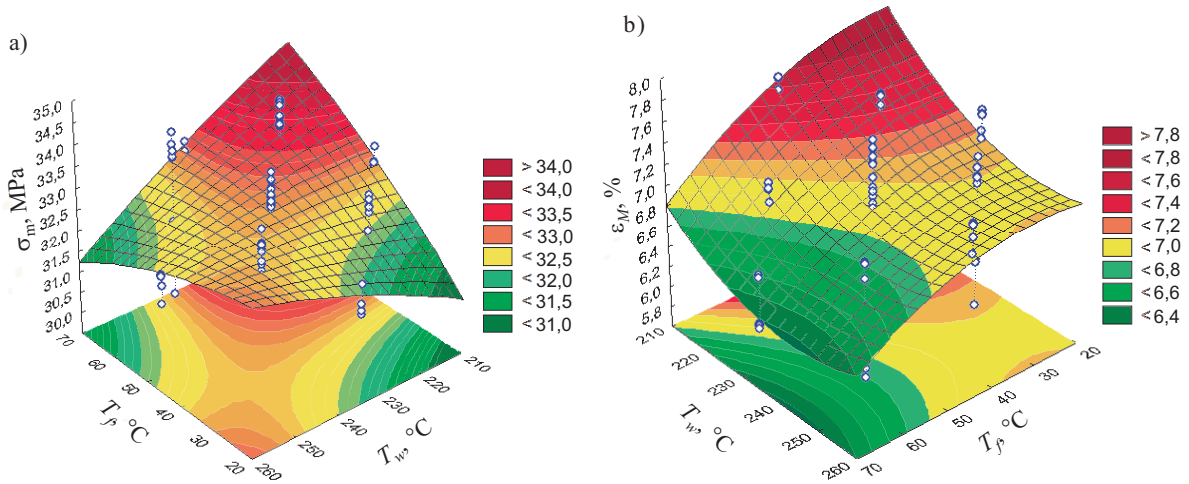
Wartość wydłużenia względnego przy maksymalnym naprężeniu rozciągającym  $\varepsilon_M$  (rys. 8b) zależy głównie od temperatury wtryskiwania, interakcji między temperaturą formy i prędkością wtryskiwania oraz od temperatury formy. Na wartość  $\varepsilon_M$  w mniejszym stopniu wpływa zawartość poroforu. Z rys. 9b wynika, że największe wartości  $\varepsilon_M$  charakteryzują wypraski wytworzone w niższej temperaturze formy i niższej temperaturze wtryskiwania, najmniejsze natomiast — uzyskane w wyższej temperaturze wtryskiwania. Wysoka tempera-

Najmniejsze wartości  $a_{CU}$  odnoszą się do wyprasek o dużej zawartości poroforu (rys. 11). Wyższa temperatura formy i wyższa temperatura wtryskiwania wpływają niekorzystnie na udarność. Podobnie jak poprzednio, można to tłumaczyć tym, że w takich warunkach uzyskuje się wypraski z porami o dużej średnicy, co przyczynia się do pogorszenia udarności wytworu.

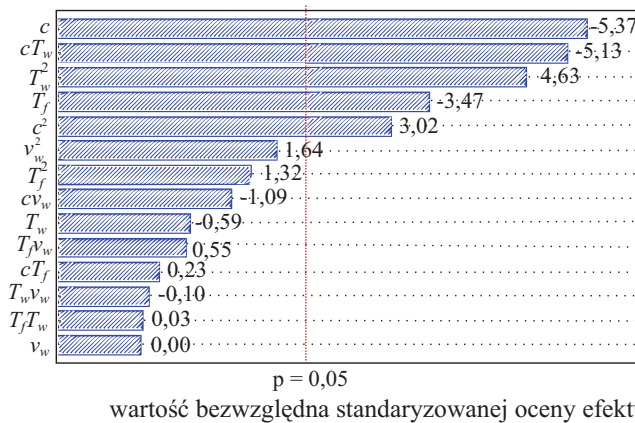
## Dokładność odwzorowania wymiarów i stan powierzchni wyprasek

### Profile powierzchni wyprasek

Przykłady profili powierzchni wyprasek przedstawia rys. 12. W przypadku wypraski z tworzywa zawierającego 0,375 % poroforu, wytwarzanej w warunkach temperatury formy 57,5 °C i temperatury wtryskiwania 247,5 °C (wariant 1 planu badań), zmniejszeniu uległo zapadnięcie w środkowej części wypraski, gdzie znajduje się punkt najbardziej odległy od bazy pomiarowej (rys. 12a). Kształt profilu świadczy o bardziej intensywnym porowaniu tworzywa. Wartość  $\Delta t$  między najniższym a najwyższym punktem pomiarowym wynosi tu 34  $\mu\text{m}$ .



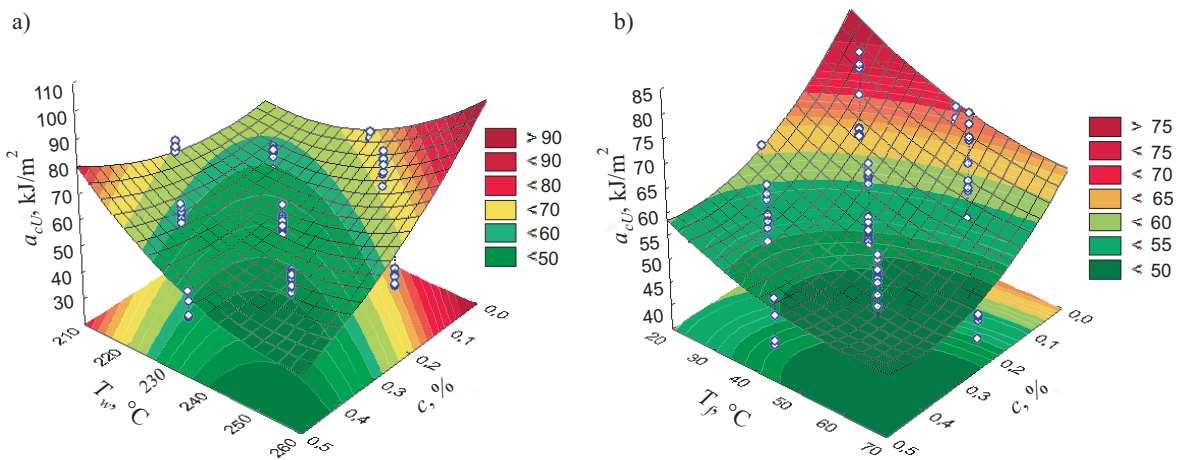
Rys. 9. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie ( $\sigma_m$ ) — (a) i wydłużenia względnego przy maksymalnym naprężeniu rozciągającym ( $\epsilon_M$ ) — (b) w funkcji temperatury formy ( $T_f$ ) i temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ) ( $c = 0,25\%$ ,  $v_w = 67,5$  mm/s)  
 Fig. 9. Change in tensile strength ( $\sigma_m$ ) — (a) and elongation at maximum force ( $\epsilon_M$ ) — (b) as a function of mould temperature ( $T_f$ ) and injection temperature ( $T_w$ ) ( $c = 0.25\%$ ,  $v_w = 67.5$  mm/s)



Rys. 10. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do udarności ( $a_{cU}$ )  
 Fig. 10. Results of the Pareto analysis with reference to impact strength ( $a_{cU}$ )

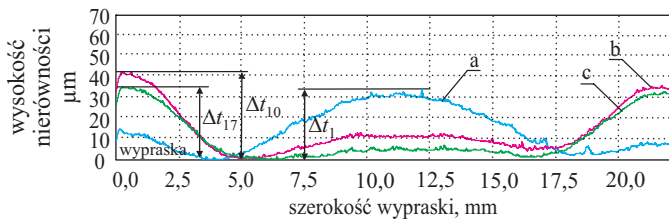
W wypraszce z tworzywa bez poroforu (wariant 10) obserwuje się znaczne zapadnięcie, a  $\Delta t$  tej wypraski jest równe 41  $\mu\text{m}$ . W przypadku zaś wypraski z tworzywa zawierającego 0,25 % poroforu, wytwarzanej z największą prędkością wtryskiwania (120 mm/s) (wariant 17), warunki procesu porowania były niewystarczające do wyeliminowania zapadnięcia. Wartość  $\Delta t$  w tym przypadku wynosiła 34  $\mu\text{m}$ . W wypraskach wytwarzanych w warunkach określonych w 10. i 17. wariantcie planu badań, punkty najbardziej oddalone od bazy pomiarowej znajdują się na brzegach wyprasek.

Na podstawie wykresu Pareto (rys. 13), można stwierdzić, że największy wpływ na wartość  $\Delta t$  ma temperatura formy ( $T_f$ ), wraz z jej wzrostem  $\Delta t$  zwiększa się. Najmniejsze wartości  $\Delta t$  występują w przypadku zastosowania niższej temperatury formy. Szybkie ochładzanie tworzywa w formie o niższej temperaturze skraca czas jego



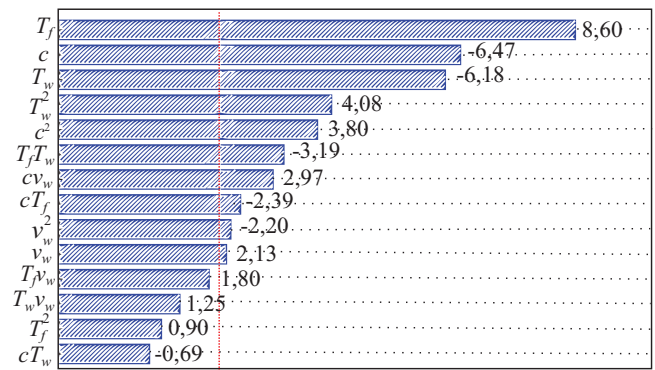
Rys. 11. Zmiana udarności ( $a_{cU}$ ) w funkcjach: a) zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ) ( $T_f = 45$  °C,  $v_w = 67,5$  mm/s); b) zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury formy ( $T_f$ ) ( $T_w = 235$  °C,  $v_w = 67,5$  mm/s)  
 Fig. 11. Change in impact strength ( $a_{cU}$ ) as a function of: a) blowing agent content ( $c$ ) and injection temperature ( $T_w$ ) ( $T_f = 45$  °C,  $v_w = 67.5$  mm/s); b) blowing agent content ( $c$ ) and mould temperature ( $T_f$ ) ( $T_w = 235$  °C,  $v_w = 67.5$  mm/s)





Rys. 12. Profile powierzchni wyprasek z różnych wariantów planu badań: a) wariant 1 ( $c = 0,375 \%$ ,  $T_f = 57,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 247,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 41,25 \text{ mm/s}$ ), b) wariant 10 ( $c = 0 \%$ ,  $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5 \text{ mm/s}$ ), c) wariant 17 ( $c = 0,25 \%$ ,  $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 120 \text{ mm/s}$ )

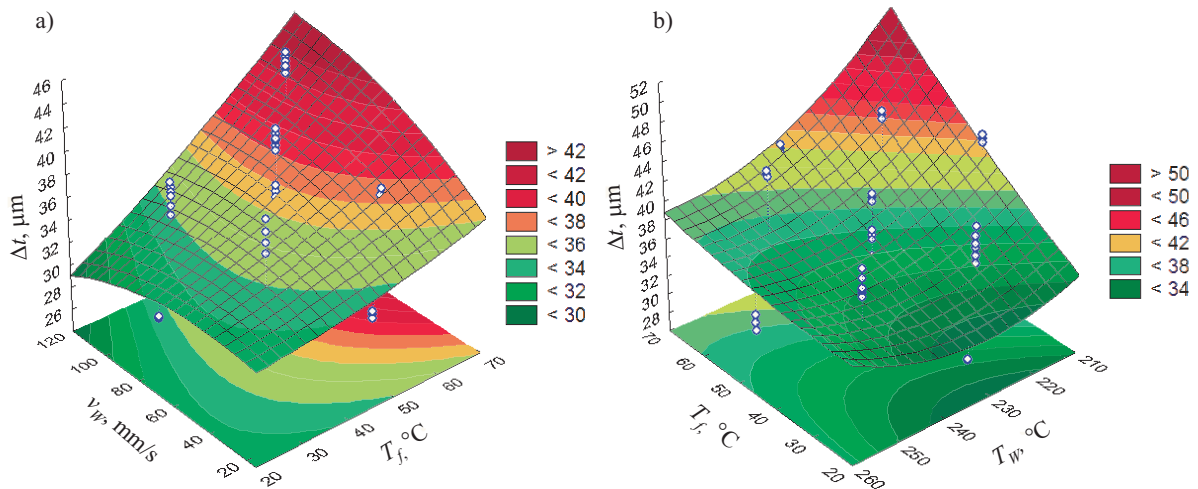
Fig. 12. Exemplary profiles of the moulded part surface obtained using different experimental designs: a) variant 1 ( $c = 0.375 \%$ ,  $T_f = 57.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 247.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 41.25 \text{ mm/s}$ ), b) variant 10 ( $c = 0 \%$ ,  $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67.5 \text{ mm/s}$ ), c) variant 17 ( $c = 0.25 \%$ ,  $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 120 \text{ mm/s}$ )



$p = 0,05$   
wartość bezwzględna standaryzowanej oceny efektu

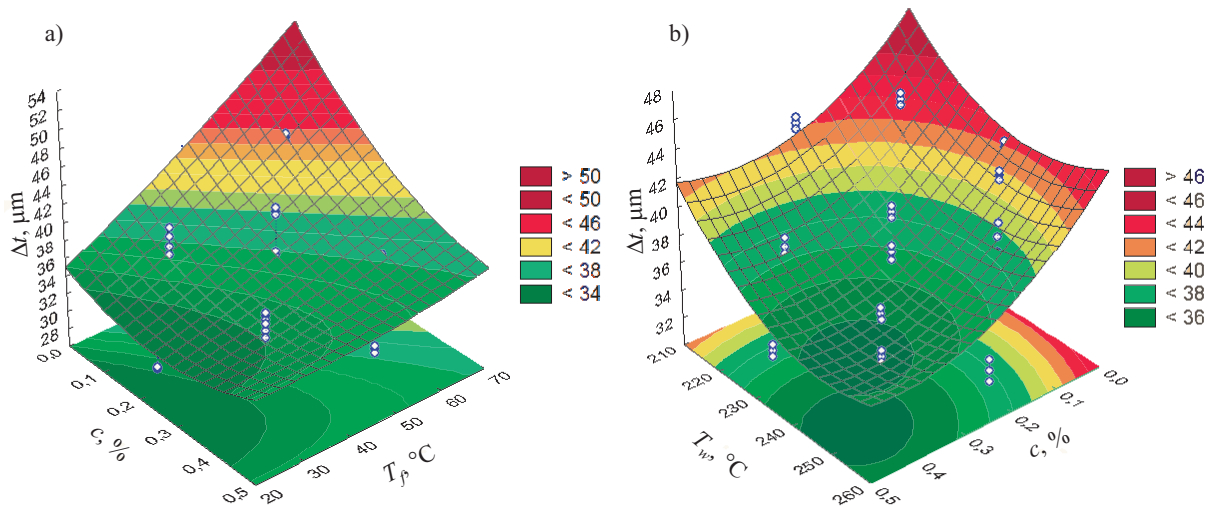
Rys. 13. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do wartości  $\Delta t$  profilu powierzchni wyprasek

Fig. 13. Results of the Pareto analysis with reference to  $\Delta t$  value of the part surface profile



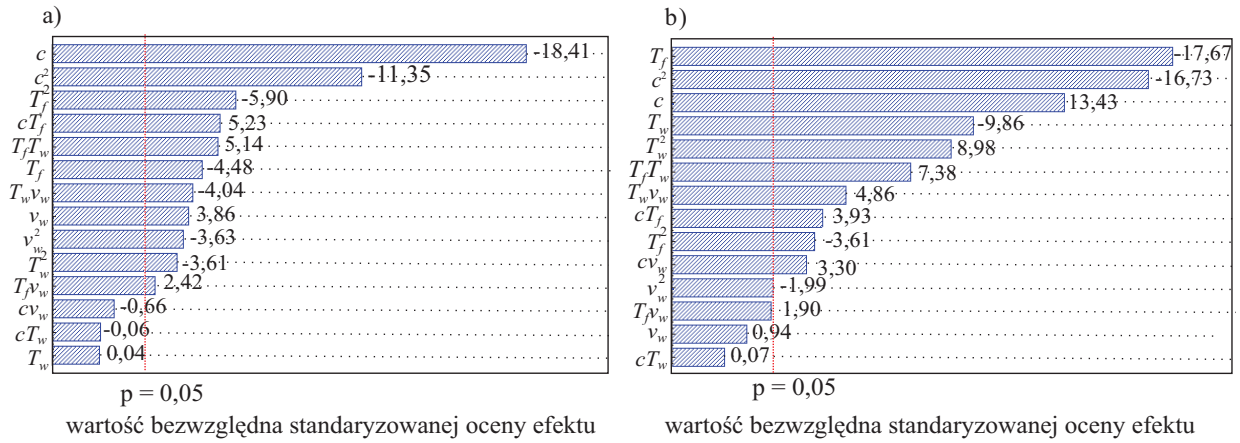
Rys. 14. Zmiana wartości  $\Delta t$  w funkcji: a) temperatury formy ( $T_f$ ) i prędkości wtryskiwania ( $v_w$ ) ( $c = 0,25 \%$ ,  $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ); b) temperatury formy ( $T_f$ ) i temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ) ( $c = 0,25 \%$ ,  $v_w = 67,5 \text{ mm/s}$ )

Fig. 14. Change in  $\Delta t$  as a function of: a) mould temperature ( $T_f$ ) and injection velocity  $v_w$  ( $c = 0.25 \%$ ,  $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ); b) mould temperature ( $T_f$ ) and injection temperature ( $T_w$ ) ( $c = 0.25 \%$ ,  $v_w = 67.5 \text{ mm/s}$ )



Rys. 15. Zmiana wartości  $\Delta t$  w funkcji: a) zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury formy ( $T_f$ ) ( $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5 \text{ mm/s}$ ); b) zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ) ( $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5 \text{ mm/s}$ )

Fig. 15. Change in  $\Delta t$  as a function of: a) blowing agent content ( $c$ ) and mould temperature ( $T_f$ ) ( $T_w = 235 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67.5 \text{ mm/s}$ ); b) blowing agent content ( $c$ ) and injection temperature ( $T_w$ ) ( $T_f = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67.5 \text{ mm/s}$ )

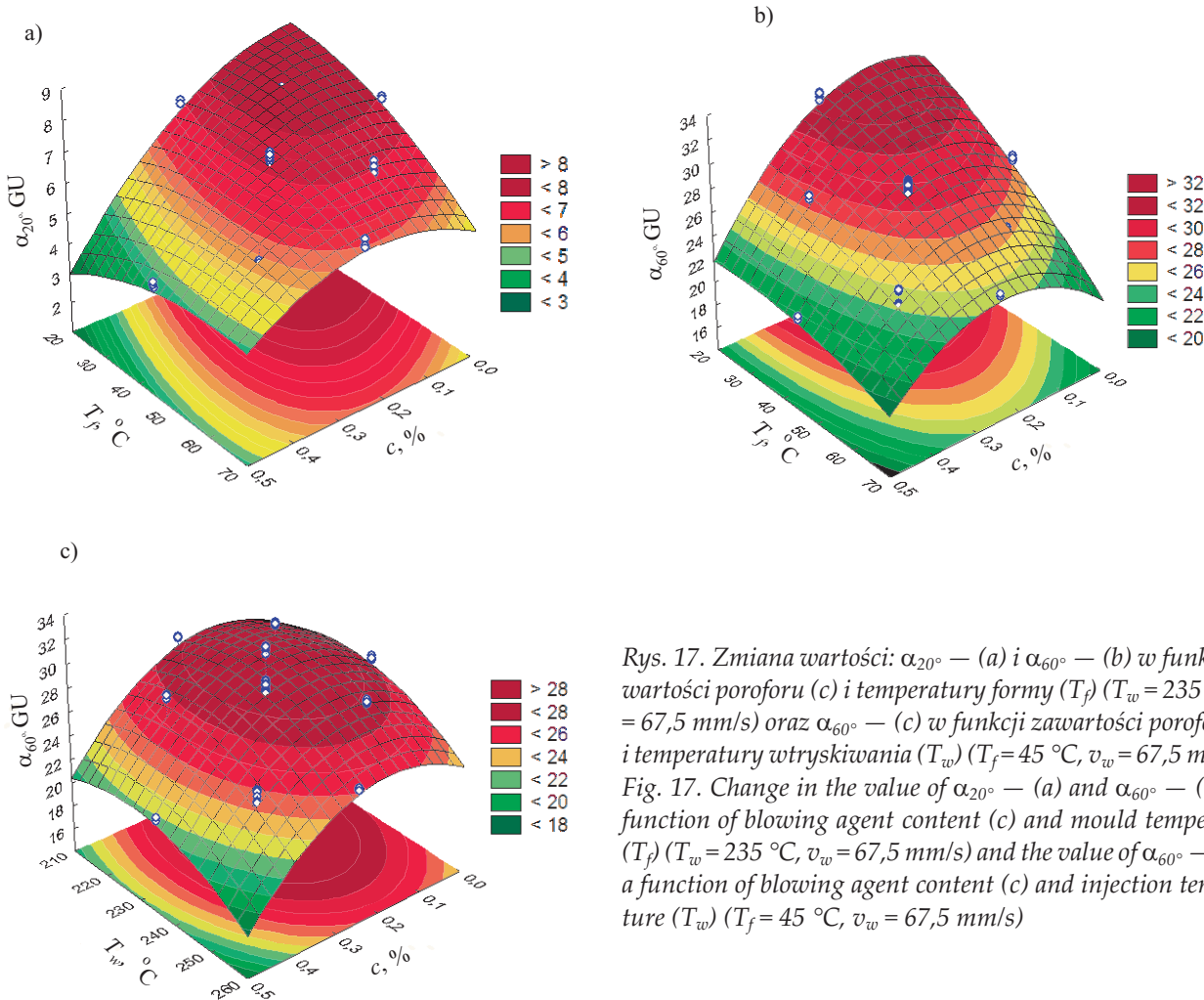


Rys. 16. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do połysku wyprasek; kąt padania światła 20° – (a) i 60° – (b)  
Fig. 16. Results of the Pareto analysis with reference to the moulded parts gloss for 20° – (a) and 60° – (b) angle of light incidence

krystalizacji, czego efektem jest mały stopień krystaliczności, a zatem mniejszy skurcz oraz mniejsze zapadnięcia w wypraskach. Istotny jest również wpływ zawartości poroforu (c) oraz temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ). Zastosowanie większych wartości tych parametrów prowadzi do mniejszych zapadnięć na powierzchni wytwarzanych wyprasek (rys. 14, 15). Wyższa temperatura wtryskiwania wpływa na łatwiejsze wypełnianie gniazda, lep-

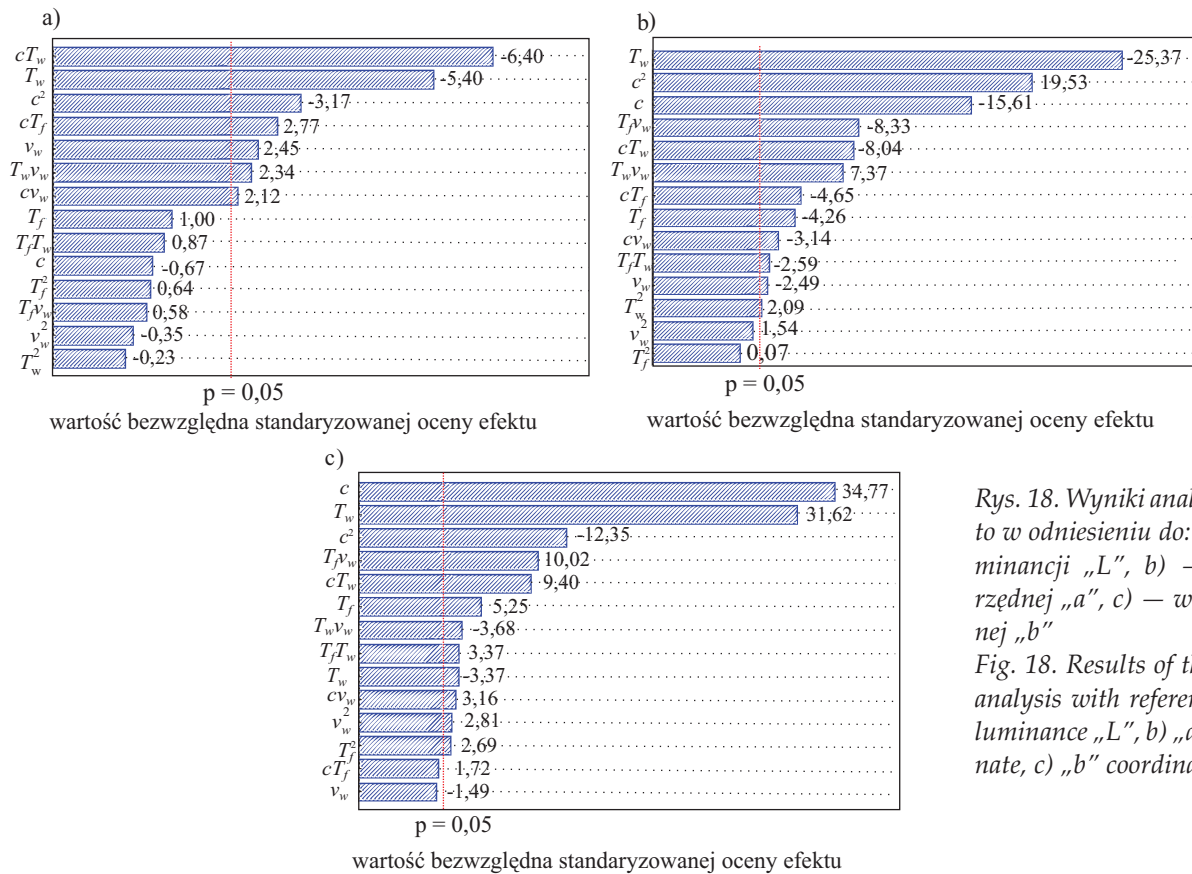
sze upakowanie tworzywa w gnieździe a zarazem na bardziej intensywne porowanie sprzyjające eliminacji zapadnięć w wypraskach.

Wielkość zapadnięć w mniejszym stopniu zależy od prędkości wtryskiwania. Podsumowując, najmniejsze zapadnięcia powstawały w warunkach większej zawartości poroforu, niższej temperaturze formy oraz wyższej temperaturze wtryskiwania.



Rys. 17. Zmiana wartości:  $\alpha_{20^\circ}$  – (a) i  $\alpha_{60^\circ}$  – (b) w funkcji zawartości poroforu (c) i temperatury formy ( $T_f$ ) ( $T_w = 235^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5\text{ mm/s}$ ) oraz  $\alpha_{60^\circ}$  – (c) w funkcji zawartości poroforu (c) i temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ) ( $T_f = 45^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5\text{ mm/s}$ )  
Fig. 17. Change in the value of  $\alpha_{20^\circ}$  – (a) and  $\alpha_{60^\circ}$  – (b) as a function of blowing agent content (c) and mould temperature ( $T_f$ ) ( $T_w = 235^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5\text{ mm/s}$ ) and the value of  $\alpha_{60^\circ}$  – (c) as a function of blowing agent content (c) and injection temperature ( $T_w$ ) ( $T_f = 45^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5\text{ mm/s}$ )





Rys. 18. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do: a) — luminancji „L”, b) — współrzędnej „a”, c) — współrzędnej „b”

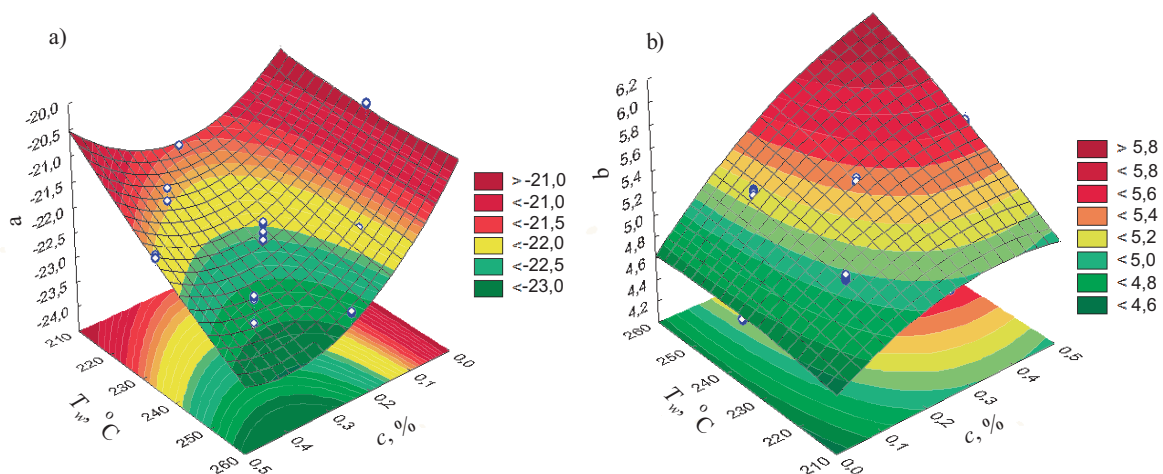
Fig. 18. Results of the Pareto analysis with reference to: a) luminance „L”, b) „a” coordinate, c) „b” coordinate

### Połysk powierzchni wyprasek

Z wykresu Pareto (rys. 16a) wynika, że największy wpływ na wartość połysku  $\alpha_{20^\circ}$  ma zawartość poroforu w przetwarzanym tworzywie. Ze wzrostem wartości  $c$  połysk powierzchni wyprasek pogarsza się. Mniejsze jest oddziaływanie temperatury formy; jej wzrost powoduje, że wytwarzane wypraski mają mniejszy połysk. Podobnie, duży wpływ na wartość  $\alpha_{60^\circ}$  ma temperatura formy oraz zawartość poroforu. Wraz ze

wzrostem tych wielkości  $\alpha_{60^\circ}$  maleje. Wyższa temperatura wtryskiwania również, aczkolwiek w mniejszym stopniu, powoduje pogorszenie połysku wytwarzanych wyprasek.

Z rysunku 17 wynika, że najmniejsze wartości  $\alpha_{20^\circ}$  i  $\alpha_{60^\circ}$  odpowiadają dużej zawartości poroforu, zarówno przy niższej, jak i wyższej temperaturze formy. W przypadku tworzywa bez poroforu, lub ze stosunkowo małą jego ilością, wartości  $\alpha_{20^\circ}$  i  $\alpha_{60^\circ}$  są największe, gdy temperatura formy wynosi  $20^\circ\text{C}$ .



Rys. 19. Zmiana współrzędnych: „a” — (a) i „b” — (b) w funkcji zawartości poroforu ( $c$ ) i temperatury wtryskiwania ( $T_w$ ) ( $T_f = 45^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67,5\text{ mm/s}$ )

Fig. 19. Change in the values of colour coordinates: „a” — (a) and „b” — (b) as a function of blowing agent content ( $c$ ) and injection temperature ( $T_w$ ) ( $T_f = 45^\circ\text{C}$ ,  $v_w = 67.5\text{ mm/s}$ )

Wypraski otrzymywane w warunkach wyższej temperatury formy i temperatury wtryskiwania charakteryzują się gorszym połyskiem, gdyż intensywne porowanie prowadzące do wzrostu porów może skutkować zwiększeniem chropowatości a zatem połysku powierzchni wytworu. Ponadto, w przypadku zastosowanego poroforu endotermicznego, na skutek chłodzenia, na powierzchni wypraski pory nie rozrastają się, mogą natomiast występować nierozłożone produkty rozkładu poroforu wywołujące efekt „srebrzenia”.

### Kolor wyprasek

Podobnie jak poprzednio, sporządzono wykresy Pareto, umożliwiające dokonanie oceny wpływu zawartości poroforu i warunków wtryskiwania, na wartości zmiennych  $a$ ,  $b$  oraz  $L$ . Największy wpływ na wartość luminancji  $L$  ma interakcja procentowej zawartości poroforu i temperatury wtryskiwania oraz sama temperatura wtryskiwania (rys. 18a). Wraz z jej wzrostem wartość  $L$  maleje, co oznacza, że wypraska szarzeje.

Zmienna „ $a$ ”, najbardziej zależy od temperatury wtryskiwania, ze wzrostem ( $T_w$ ) „ $a$ ” maleje, wypraska zmienia kolor na intensywnie zielony (rys. 18b). Wartość zmiennej „ $b$ ” w największym stopniu zależy natomiast od procentowej zawartości poroforu i temperatury wtryskiwania. Ze zwiększaniem wartości  $c$  i  $T_w$  zmienna „ $b$ ” rośnie (rys. 18c).

Na rys. 19 pokazano zmiany wartości zmiennych „ $a$ ” oraz „ $b$ ” w funkcji zawartości poroforu oraz temperatury wtryskiwania. Wartość zmiennej „ $a$ ” zmniejsza się, jak już wspomniano, ze wzrostem  $c$  i  $T_w$ , a najmniejsze wartości „ $b$ ” występują w przypadku wyprasek bez poroforu, niezależnie od wartości temperatury wtryskiwania. Na uwagę zasługują wypraski otrzymane z tworzywa z zawartością 0,5 % poroforu w wysokiej temperaturze wtryskiwania, charakteryzują się one bowiem dużą wartością „ $b$ ”, co wskazuje na wystąpienie znacznej zmiany ich koloru, w kierunku koloru żółtego.

Dodanie do polipropylenu poroforu w sposób istotny wpływa na redukcję zapadnięć wytworzonych wyprasek, powoduje jednak zmianę koloru i połysku ich powierzchni. Na połysk i kolor powierzchni wyprasek największy wpływ mają zawartość poroforu, temperatura formy i temperatura wtryskiwania, mniejszy zaś — prędkość wtryskiwania. Lepszą jakość powierzchni wyprasek (wysoki połysk) uzyskiwano stosując niższą temperaturę formy. Niekorzystne zmiany koloru wyprasek otrzymanych w wyższej temperaturze wtryskiwania mogą wskazywać na procesy termicznej degradacji tworzywa lub barwnika, bądź też ich reakcji z produktami rozkładu poroforu.

### PODSUMOWANIE

Właściwości i stan powierzchni wyprasek są zależne od ilości dodawanego do tworzywa wtryskiwanego

poroforu, a jego efektywność jest zależna od warunków przetwarzania.

Masa i gęstość wyprasek maleje wraz ze wzrostem temperatury formy.

W warunkach wyższej temperatury zarówno formy, jak i wtryskiwania pogorszeniu ulegają też właściwości mechaniczne wytworów, będące skutkiem występowania w strukturze wyprasek dużych porów wywołujących efekt karbu.

Ze wzrostem temperatury formy oraz zawartości poroforu uzyskane wypraski charakteryzują się także mniejszą udarnością.

Dodanie poroforu do tworzywa powoduje również zmniejszenie powstających zapadnięć, zwłaszcza w niższej temperaturze formy, czyli w warunkach korzystnych do otrzymywania struktury o drobnych, licznych porach. Porofor jednak niekorzystnie wpływa na połysk wyprasek, ponadto zmienia się ich kolor: stają się bardziej szare i bardziej żółte. Połysk wyprasek ulega pogorszeniu w warunkach wyższej temperatury formy i wyższej temperatury wtryskiwania. Należy zatem rozważyć dodanie do tworzywa poroforu w celu wyeliminowania zapadnięć w uzyskiwanych wypraskach z jednoczesnym wprowadzaniem do przetwarzanego tworzywa dodatkowych składników, np. zwiększających połysk wyprasek, bądź też barwników zapewniających uzyskanie pożądanego koloru.

*Pracę wykonano w ramach projektu badawczego: „Badania zjawisk występujących w procesie wytwarzania wyprasek wtryskowych z tworzyw zawierających porofor” nr N N508 470734, finansowanego przez MNiSW.*

### LITERATURA

1. Bieliński M.: „Techniki porowania tworzyw termoplastycznych”, Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004.
2. Bociąga E.: „Specjalne metody wtryskiwania tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2008.
3. Błędzki A. K., Faruk O.: *J. Appl. Polym. Sci.* 2005, **97**, 1090.
4. Błędzki A. K., Faruk O.: *Macromol. Mater. Eng.* 2006, **291**, 1226.
5. Błędzki A. K., Faruk O.: *J. Cell. Plast.* 2006, **42**, 63.
6. Błędzki A. K., Faruk O.: *J. Cell. Plast.* 2006, **42**, 77.
7. Whelan N., Witte A., Holzberg T.: „Hydrocerol — The Right Chemical Foaming Agents for Your Application”, Materiały Clariant Masterbatch GmbH & Co. OHG.
8. *Pat. USA* 5 252 618 (1993).
9. Lipski R.: w pracy zbiorowej „Polimery kompozyty konstrukcyjne” (red. Wróbel G.), Cieszyn 2010.
10. Bociąga E., Palutkiewicz P., Wawrzyniak J.: „Polymer Processing Society Europe/Africa Regional Meeting”, Larnaca 2009, mat. konf., str. 57.
11. Bociąga E., Palutkiewicz P.: „Polymer Processing Society Europe/Africa Regional Meeting”, Larnaca 2009, mat. konf., str. 60.

12. Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
13. Bociąga E., Jaruga T.: *Polimery* 2009, **54**, 342.
14. Bociąga E., Jaruga T., Sikora R.: *Polimery* 2009, **54**, 522.
15. Sikora R., Tor A., Garbacz T.: „Polymer Processing Society Europe/Africa Regional Meeting”, Gothenburg 2007, mat. konf., str. 1.
16. Garbacz T., Tor A.: *Polimery* 2007, **52**, 286.
17. „Pomiar połysku”. Materiały informacyjne firmy Eurotom, [www.eurotom.pl](http://www.eurotom.pl)
18. „A Guide to Understanding Color Communication”. Materiały informacyjne firmy X-rite, [www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001\\_Understand\\_Color\\_en.pdf](http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001_Understand_Color_en.pdf)

Otrzymano 21 I 2011 r.

---

### W kolejnym zeszycie ukazać się m.in. następujące artykuły:

- J. Rybnicek, R. Lach, W. Grellmann, M. Lapcikova, M. Slouf, Z. Krulis, E. Anisimov, J. Hajek — Trójskładnikowa mieszanina PC/ABS/PMMA — Morfologia i właściwości mechaniczne w warunkach obciążenia quasi statycznego (*j. ang.*)
- T. Spychaj, B. Schmidt, K. Ulfig, A. Markowska-Szczupak — Kopolimery szczepione N-winyloformamidu na skrobi ziemniaczanej wytwarzane na drodze wytlaczania reaktywnego: synteza i charakterystyka (*j. ang.*)
- E. Kociotek-Balawejder, D. Ociński, E. Stanistawska — Kopolimery poli(styreno-diwinylbenzenowe) zawierające N-chlorosulfonamidowe grupy funkcyjne jako utleniacze arseninów w roztworach wodnych — redoksymetryczne badanie przebiegu reakcji (*j. ang.*)
- M. Dzięcioł — Wpływ temperatury na skład i ilość lotnych związków emitowanych podczas rozkładu termooksydacyjnego poli(tereftalanu trimetyleny) (*j. ang.*)
- P. Glibowski, A. Kulik, A. Masternak — Wpływ temperatury ogrzewania na właściwości reologiczne żeli inulinowych
- J. Magryta — Wpływ aerożelu na właściwości wulkanizatów kauczuku butadienowo-akrylonitrylowego (NBR)
- U. Ostaszewska, D. Pieczyńska, D. M. Bieliński, J. Jagielski — Modyfikacja polimerów za pomocą bombardowania jonowego. Cz. II. Modyfikacja funkcjonalnych właściwości gumy