

Janusz W. SIKORA^{1)*}, Anna KLISZOWSKA¹⁾, Björn NOACK²⁾

¹⁾ Politechnika Lubelska

²⁾ Westsächsische Hochschule Zwickau

* janusz.sikora@pollub.pl

Właściwości mechaniczne kompozytu polietylenowego z proszkiem szklanym

Streszczenie: W Institut für Produktionstechnik of Westsächsische Hochschule Zwickau przeprowadzono badania kompozytu polimerowego na osnowie polietylenu dużej gęstości o nazwie Hostalen GD 7255 z 10% udziałem proszku szklanego o nazwie Mikrover. Kompozyt ten został otrzymany w procesie dwuślimakowego wytłaczania z granulowaniem na zimno. W skład stanowiska wchodziła współbieżna wytłaczarka dwuślimakowa ZSK 18 MEGAlab z głowicą wytłaczarską zaopatrzoną w dyszę kołową, wanna chłodząca oraz granulator. Właściwości mechaniczne otrzymanego kompozytu zbadano poprzez wytworzenie odpowiednich próbek metodą wtryskiwania (Krauss Maffei KM 50-55CX) przy zmiennym czasie chłodzenia wypraski oraz objętościowym natężeniu wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej. Określono podstawowe właściwości wytrzymałościowe w próbie statycznego rozciągania oraz twardość metodą Shore'a. Stwierdzono wpływ warunków wtryskiwania na badane właściwości mechaniczne. **Słowa kluczowe:** kompozyty, wytłaczanie z granulowaniem na zimno, wytrzymałość na rozciąganie, twardość

THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYETHYLENE COMPOSITE WITH GLASS POWDER

Abstract: The studies of polymer composite on high density polyethylene matrix named Hostalen GD 7255 with the 10% addition of glass powder named Mikrover were conducted in the Institut für Produktionstechnik of Westsächsische Hochschule Zwickau. The composite was received in the process of twin screw extrusion with cold pelletizing. The stand included a co-rotating twin screw extruder ZSK 18 MEGAlab with the extruder head equipped with a circular die, as well as a water cooling bath and a pelletizer. The mechanical properties of the received composite were studied by manufacturing appropriate samples in the injection moulding process (Krauss Maffei KM 50-55CX) at changeable cooling times of the injection moulding parts and volume rate of polymer composite flow to the injection mold cavity. The basic strength properties were determined in the uniaxial tensile testing and hardness was determined by Shore method. It was stated that injection molding conditions influence the studied mechanical properties.

Keywords: composites, cold pelletizing, tensile test, hardness

Wprowadzenie

Tworzywa polimerowe są materiałami mającymi wiele zalet, ale wciąż poszukuje się nowych o jeszcze lepszych właściwościach. Jednym ze sposobów otrzymywania nowatorskich materiałów polimerowych o ulepszonych właściwościach, których nie można otrzymać

w procesie bezpośredniej polimeryzacji jest mieszanie polimerów z różnego rodzaju napełniaczami w rozmaitych stosunkach masowych. W działaniach tych nie bez znaczenia jest również aspekt obniżenia kosztów wytwarzania takich materiałów. Właściwości mechaniczne napełnionych polimerów zależą w znacznym stopniu od wielkości, kształtu

i rozmieszczenia cząstek napełniacza w matrycy polimerowej, jak również od jakości adhezji pomiędzy napełniaczem a matrycą [1, 2]. Zwykle zawartość napełniacza waha się w granicach od kilku do kilkudziesięciu np. 60, ale i więcej procent.

Kompozyty takie wytwarza się poprzez mieszanie w walcarkach lub mieszanie w układach uplastyczniających maszyn przetwórczych jakimi są wytłaczarki i wtryskarki. Często, mieszanie takie wspomagane jest oddziaływaniem mechanicznym, przejawiającym się np. w skracaniu łańcuchów polimerowych [3, 4].

Napełniaczami w tego rodzaju kompozytach mogą być w zasadzie wszystkie materiały, w każdej postaci: ziaren, włókien, arkuszy, dodatkowo od nano-, mikro- do makro-rozmiarów [5, 6, 7].

W kompozytach ziarnistych napełniacz ma postać cząstek różnych rozmiarów, od bardzo małych – proszku [8], poprzez większe – mikrokulki do największych – granulek [9, 10]. Cząstki te mogą być lite a mogą też być puste wewnątrz. Zadaniem ich jest nie tylko podwyższenie wytrzymałości materiału stanowiącego osnowę, co nadanie mu odpowiedniej kombinacji właściwości. Napełniacze te dodawane są do kompozytu najczęściej w celu zmniejszenia udziału drogiego polimeru, podwyższają sztywność i twardość, zwiększają odporność na pęcznienie, jednak obniżają wytrzymałość i plastyczność otrzymanego kompozytu [11, 12, 13].

Większość kompozytów włóknistych projektowana jest w celu uzyskania materiału o wysokiej wytrzymałości, sztywności, odporności na zmęczenie, a przy tym wysokiej wytrzymałości właściwej. Efekt ten otrzymuje się poprzez wprowadzenie do plastycznej, polimerowej osnowy sztywnych włókien charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i kruchością. Włókna mogą być cięte lub nie i mogą być wykonane z najróżniejszych materiałów [14, 15, 16]. Napełniacze włókniste stosuje się w materiałach polimerowych głównie w celu zwiększenia ich wytrzymałości mechanicznej

(najczęściej włókna szklane), ale także w celu zwiększenia przewodności cieplnej (włókna metaliczne lub węglowe) lub zmniejszenia współczynnika tarcia (włókna PTFE, włókna węglowe i grafitowe) i przez to polepszenia warunków odprowadzenia ciepła tarcia z węzła ślizgowego.

Kompozyty warstwowe składają się z co najmniej dwóch warstw jednego materiału złączonych ze sobą za pomocą spoiwa polimerowego. Napełniaczem w tego rodzaju kompozytach są przede wszystkim arkusze, maty, tkaniny i matotkaniny różnych materiałów połączonych w rezultacie adhezji najczęściej żywicą fenolową, aminową, mocznikową lub inną. Właściwości takich kompozytów kształtuje się poprzez odpowiednie ukierunkowanie elementów makrostruktury napełniacza względem siebie, poprzez ułożenie jego w odpowiednich kierunkach. Ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne stosowane są przede wszystkim w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym a nawet kosmicznym [17, 18, 19, 20].

W związku z tym, że materiały kompozytowe na osnowie polimerów termoplastycznych jakimi są polietyleny dużej gęstości napełnione proszkiem szklanym mogą być wytwarzane relatywnie prostymi (tanymi) metodami mieszania mechanicznego składników kompozytu, a następnie metodą wytłaczania lub wtryskiwania, należy sądzić, że są one interesującym materiałem do zastosowań praktycznych. Celem badań było określenie wpływu wybranych parametrów procesu wtryskiwania na podstawowe właściwości mechaniczne kompozytu polietylenowego z 10% udziałem masowym proszku szklanego.

Stanowiska badawcze

Badania przeprowadzono w laboratorium Instytutu Technologii Produkcji (Institut für Produktionstechnik) Zachodniosaksońskiego Uniwersytetu w Zwickau (Westfälische Hochschule Zwickau). Do badań wykorzystano współbieżną wytłaczarkę dwuślimakową

o symbolu ZSK 18 MEGAlab firmy Coperion Werner and Pfleiderer GmbH, wchodząca w skład linii technologicznej wytaczania z granulowaniem na zimno, obejmującego oprócz wytłaczarki ZSK 18, wannę chłodzącą oraz granulator. Wytłaczarka ma ślimaki walcowe o średnicy 18 mm i stosunku długości do średnicy $L/D = 24$.

Głowica wytłaczarska zamocowana jest do ostatniego segmentu za pomocą dwóch śrub i ma dyszę o kołowym kształcie przekroju poprzecznego średnicy 3 mm i długości 16 mm.

Kolejnym stanowiskiem wykorzystanym w badaniach jest stanowisko wtryskiwania, w skład którego wchodzi wtryskarka Krauss Maffei KM 50-55CX wyposażona w narzędzie przetwórcze jakim jest dwugniazdowa forma wtryskowa do otrzymywania próbek wytrzymałościowych według normy ISO 294-1:2002. Wtryskarka ma ślimak średnicy 18 mm i siłę zamykania 500 000 N. Największe ciśnienie wtryskiwania wynosi 250 MPa, a prześwit między kolumnami 370×370 mm.

Materiały

Do wykonania granulatu wykorzystano polietylen o nazwie handlowej Hostalen i symbolu GD 7255 produkcji Basell Orlen Polyolefins oraz mączkę szklaną o nazwie handlowej Mikrover firmy Dennert Poraver GmbH.

Hostalen GD 7255 jest polietylenem dużej gęstości (PE-HD), który używany jest do zastosowań wtryskowych. Jest to polimer cechujący się dużą gęstością, dobrą płynnością i przetwarzalnością w zakresie temperatury od 180 do 220°C, dużą sztywnością oraz udarnością. Wybrane właściwości polietyleno Hostalen GD 72555, według producenta, przedstawiono w tabeli 1.

Mączkę szklaną Mikrover firmy Dennert Poraver otrzymano z nieorganicznych, pirolitycznych termicznie granulek ze szkła odpadowego, poprzez ich mielenie i modyfikowanie wodorotlenkiem wapnia. Skład i właściwości użytej mączki szklanej, według danych producenta, przedstawiono w tabelach 2 oraz 3.

Tabela 1. Wybrane właściwości polietyleno Hostalen GD 7255

Table 1. Selected properties of polyethylene Hostalen GD 7255

Właściwości	Jednostka	Wartość
Fizyczne		
Gęstość	kg/m ³	955
Wskaźnik szybkości płynięcia (MFR)		
(190 °C / 2,16 kg)	g/10 min	4
(190 °C / 5,0 kg)	g/10 min	11
Udarność wg Charpy'ego z karbem		
(23°C, Typ 1, karb A)	kJ/m ²	4
(-30°C, Typ 1, karb A)	kJ/m ²	4,5
Twardość		
Twardość Shore'a (Shore D)	°ShD	60
Twardość kulkowa (H 132/30)	MPa	52
Ciepłne		
Temperatura mięknięcia wg Vicata B50(50°C/h 50N)	°C	73

Tabela 2. Skład mączki szklanej Mikrover

Table 2. Composition of glass powder Mikrover

Lp.	Składnik	Wzór chemiczny	Udział masowy %
1	Tlenek krzemu	SiO ₂	71
2	Tlenek sodu	Na ₂ O	13
3	Tlenek wapnia	CaO	10
4	Tlenek glinu	Al ₂ O ₃	2
5	Tlenek magnezu	MgO	2
6	Tlenek potasu	K ₂ O	1
7	Tlenek żelaza	Fe ₂ O ₃	1

Tabela 3. Właściwości mączki szklanej Mikrover

Table 3. Properties of glass powder Mikrover

Lp.	Właściwość	Opis właściwości
1	Postać	nieregularne ziarna (proszek)
2	Temperatura topnienia	900 °C
3	Temperatura mięknięcia	700 °C
4	Gęstość nasypowa	720 kg/m ³
5	Gęstość właściwa	2300 kg/m ³
6	Rozmiar ziaren	od 1,5 do 30 μm
7	Powierzchnia właściwa	0,5 m ² /g
8	Rozpuszczalność	nierozpuszczalne w wodzie
9	Wartość pH	około 8 – 11 (20 °C /100 g/l)

Charakterystyka badań

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio

- udarność badana metodą Charpy,
- twardość badana metodą Shore'a,

2) pośrednio

- wytrzymałość na rozciąganie σ_m , MPa,
- odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej ϵ_m , %,
- odkształcenia przy zerwaniu ϵ_{br} , %,
- naprężenia przy zerwaniu σ_{br} , MPa.

Jako czynniki zmienne przyjęto:

- czas chłodzenia wypraski: 15 s, 20 s, 25 s, 30 s, 35 s,
- wydajność objętościowa wypływu kompozycji polimerowej (tworzywa) do gniazda formy wtryskowej: 5 cm³/s, 30 cm³/s, 50 cm³/s, 95 cm³/s.

Ważniejsze czynniki stałe:

- temperatura w poszczególnych strefach grzejnych wylączarki i głowicy wylączarskiej: 130, 140, 150, 160, 170, 180 oraz 180 °C,
- ciśnienie w głowicy wylączarskiej: 2 MPa,
- prędkość obrotowa ślimaków wylączarki współbieżnej: 30 obr/min,
- prędkość obwodowa ostrzy noża freza granuladora: 4 m/min,
- temperatura w poszczególnych strefach grzejnych układu uplastyczniającego wtryskarki, dyszy wtryskowej i formy wtryskowej: 140, 160, 170, 180 oraz 30 °C,
- ciśnienie wtryskiwania: 105 MPa.

Czynniki zakłócające, mogące mieć niekorzystny wpływ na wyniki badań, są to przede wszystkim niestabilności:

- temperatury otoczenia; zmiany od 22 do 24 °C,
- wilgotności względnej powietrza; zmiany od 55 do 65%,
- prądu elektrycznego; zmiany od 220 do 240 V.

Przed przystąpieniem do wytłaczania z granulowaniem na zimno przygotowano mieszaninę, w której na 1 kg polietylenu Hostalen GD 7255 przypadało 100 g mączki szklanej Mikro-

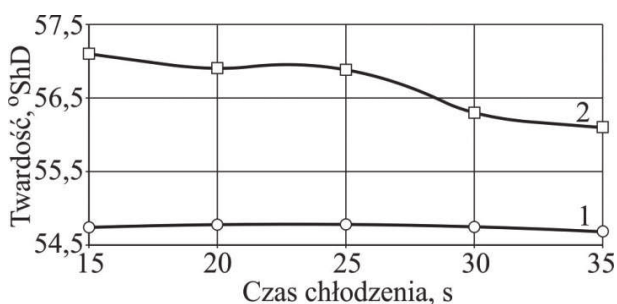
ver. Po uplastycznieniu mieszaniny kompozytowej w układzie uplastyczniającym wylączarki dwuślimakowej, tworzywo wypływało przez dyszę w postaci pręta do wanny chłodzącej, a następnie do granuladora, w którym następowała jego granulacja. Otrzymany granulit poddano procesowi wtryskiwania uzyskując próbki do badań wytrzymałościowych.

Najpierw przeprowadzono wtryskiwanie polietylenu GD 7255 bez zawartości mączki szklanej z ustalonym zmiennym czasem chłodzenia wypraski i wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wynoszącej 5 cm³/s, a później polietylenu z napelnianiem w tych samych warunkach. Następnie, wykonano wtryskiwanie przy zmiennej wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej, a czas chłodzenia otrzymanych wyprasek był stały i wynosił 20 s. Próbkę posłużyły do wykonania badań wytrzymałościowych w próbie statycznego rozciągania, twardości Shore'a oraz były podstawą do przygotowania próbek do badań udarności Charpy. Pomiar badanych właściwości wykonywano pięciokrotnie a przedstawione wyniki są ich średnia arytmetyczną.

Badania twardości metodą Shore'a wykonano zgodnie z normą ISO 868:2003. Badania udarności metodą Charpy przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie ISO 179-1:2010, natomiast próbę statycznego rozciągania oraz oznaczenie wybranych właściwości wytrzymałościowych zrobiono zgodnie z normą ISO 527-1. Prędkość rozciągania wynosiła 100 mm/min. Podczas badań udarności stwierdzono, że w żadnym przypadku próbka nie uległa złamaniu.

Wyniki badań

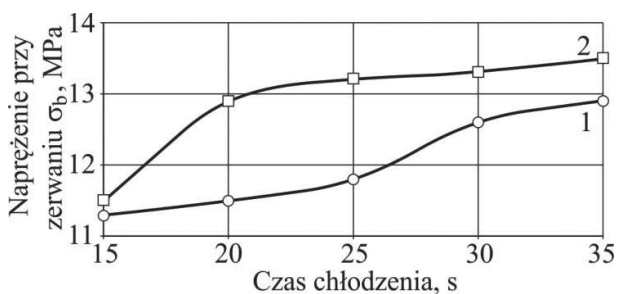
Po wykonaniu badań sporządzono wykresy zależności wybranych właściwości wyprasek wtryskowych od zmiennych parametrów procesu wtryskiwania. Określono twardość, naprężenia przy zerwaniu, wytrzymałość przy rozciąganiu, odkształcenia przy zerwaniu oraz odkształcenia przy ma-



Rys. 1. Zależność twardości od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255: 1 – nienapełnionego, 2 – napełnionego mączką szklaną (10%)

ksymalnej sile rozciągającej od czasu chłodzenia wypraski w formie.

Zależność twardości od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255 nienapełnionego oraz napełnionego mączką szklaną w ilości 10% części masowych przedstawiono na rysunku 1. Twardość wyprasek z napełniaczem w postaci mączki szklanej jest większa od wyprasek bez tego napełniacza. Wartości twardości wyprasek bez napełniacza uzyskanych przy czasie chłodzenia w formie w zakresie od 15 do 35 s różnią się o około 0,2%. Można więc uznać, że w badanym zakresie wzrost czasu chłodzenia nie wpływa na zmianę twardości badanych próbek. Wartości twardości wyprasek z 10% zawartością proszku szklanego uzyskane przy tym samym czasie chłodzenia różnią się o około 2%. Można więc stwierdzić, że w badanym zakresie wzrost czasu chłodzenia również nie wpływa na zmianę twardości badanych próbek, choć



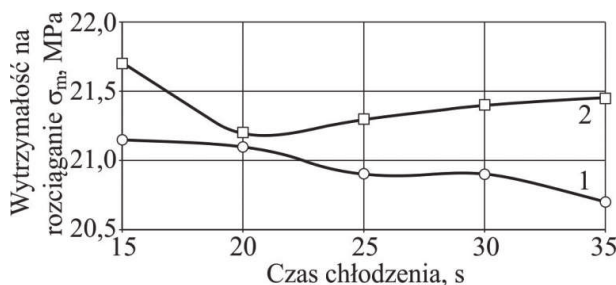
Rys. 2. Naprężenie przy zerwaniu w funkcji czasu chłodzenia otrzymanych wyprasek: 1 – nienapełnionych, 2 – napełnionych mączką szklaną (10%)

rozzrzt wyników jest większy niż w przypadku wyprasek z samego polietylenu.

Kolejną wyznaczoną zależnością jest zależność naprężenia przy zerwaniu od czasu chłodzenia otrzymanych wyprasek, którą przedstawiono na rysunku 2.

Czas chłodzenia wyprasek wpływa na zmianę wartości naprężenia przy zerwaniu. Ogólnie, wraz ze wzrostem czasu chłodzenia wzrasta wartość naprężenia przy zerwaniu. Dla czasu chłodzenia wyprasek nienapełnionych od 15 do 25 s naprężenia wzrastają o około 0,5 MPa. Natomiast, przy dalszym wzroście czasu chłodzenia do 30 s naprężenia przy zerwaniu wzrastają o prawie 0,8 MPa, a dla 35 s wzrastają o dalsze 0,3 MPa. Całkowity wzrost naprężenia przy zerwaniu wynosi niecałe 15%. Natomiast, dla wyprasek napełnionych 10% części masowych mączki szklanej, wzrost czasu chłodzenia od 15 do 25 s powoduje bardziej gwałtowny wzrost naprężenia przy zerwaniu, wynosi on około 1,4 MPa, czyli 12% ich wartości oznaczonej przy czasie chłodzenia 15 s. W zakresie czasu chłodzenia od 25 do 35 s naprężenia przy zerwaniu wzrastają już mniej intensywnie, tylko o około 0,3 MPa, co stanowi 0,2% ich wartości oznaczonej przy czasie chłodzenia 25 s.

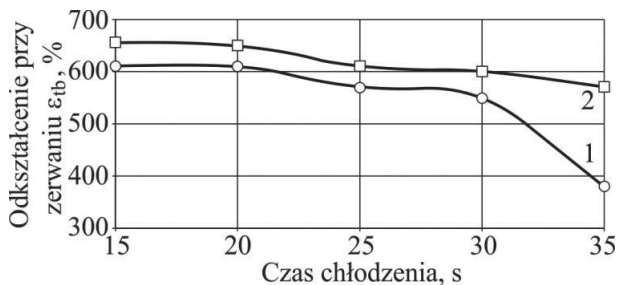
Na rysunku 3 przedstawiono zależność wytrzymałości na rozciąganie od czasu chłodzenia wyprasek otrzymanych z polietylenu GD 7255 bez udziału napełniacza w postaci mączki szklanej i z 10% udziałem masowym



Rys. 3. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255: 1 – nienapełnionego, 2 – napełnionego mączką szklaną (10%)

mączki szklanej. Wartości wytrzymałości na rozciąganie wyprasek, które uzyskano dla czasów chłodzenia w zakresie od 15 do 35 s różnią się pomiędzy sobą o około 2%, zarówno dla wyprasek polietylenowych bez napełniacza, jak i z napełniaczem w postaci mączki szklanej w ilości 10% części masowych. W badanym zakresie wzrost czasu chłodzenia nie wpływa więc na zmianę wytrzymałości na rozciąganie.

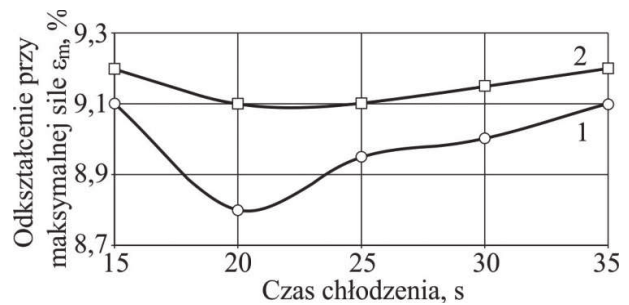
Zależność odkształcenia przy zerwaniu od czasu chłodzenia otrzymanych wyprasek wtryskowych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Odkształcenie przy zerwaniu w funkcji czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255: 1 – nienapełnionego, 2 – napełnionego mączką szklaną (10%)

Wzrost czasu chłodzenia wyprasek w formie wpływa na zmianę wartości odkształcenia przy zerwaniu, powodując ich spadek, przy czym odkształcenia przy zerwaniu oznaczone dla wyprasek napełnionych mączką szklaną w badanej ilości są większe od odpowiadających im odkształceń wyznaczonych dla wyprasek nienapełnionych. Dla wyprasek napełnionych całkowity spadek odkształcenia przy zerwaniu wynosi 12%, co odpowiada wartości 80 MPa, natomiast całkowity spadek tego odkształcenia dla wyprasek nienapełnionych jest większy i wynosi 230 MPa, co stanowi prawie 38% wartości początkowej.

Natomiast na rysunku 5 przedstawiono zależność odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255 bez napełniacza i z badaną ilością napełniacza.



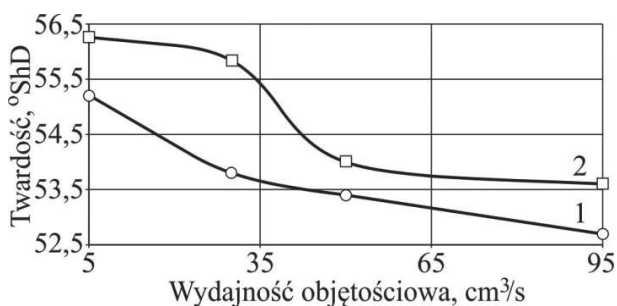
Rys. 5. Zależność odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej od czasu chłodzenia dla wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255: 1 – nienapełnionego, 2 – napełnionego mączką szklaną (10%)

Wartości odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej, które uzyskano dla czasów chłodzenia w zakresie od 15 do 35 s różni się o około 1% w przypadku wyprasek nienapełnionych i o około 2% w przypadku wyprasek napełnionych mączką szklaną. Można więc stwierdzić, że w obu przypadkach wzrost czasu chłodzenia od 15 do 35 s, badanych próbek nie wpływa na zmianę odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej.

Wypraski, które w swoim składzie nie zawierają mączki szklanej mają większą jednorodność od wyprasek, które były napełnione mączką szklaną. Świadczy o tym mały rozrzut wyników badań twardości.

Drugim, zmiennym parametrem wtryskiwania była wydajność objętościowa wypływu kompozycji polimerowej (tworzywa) do gniazda formy wtryskowej. Wyniki badań zinterpretowano graficznie. Określono twardość, naprężenia przy zerwaniu, wytrzymałość przy rozciąganiu, odkształcenia przy zerwaniu oraz odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej. Zależność twardości od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej podczas otrzymywania wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255 oraz napełnionych 10% zawartością mączki szklanej przedstawiono na rysunku 6.

Wraz ze wzrostem wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy

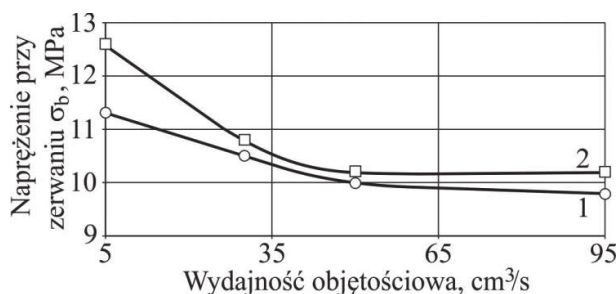


Rys. 6. Zależność twardości od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej dla: 1 – tworzywa nienapełnionego, 2 – tworzywa z 10% zawartością mączki szklanej

wtryskowej maleje twardość badanych próbek, przy czym twardość wyprasek bez napełniacza jest nieznacznie niższa od twardości wyprasek z napełniaczem. W przypadku wyprasek napełnionych 10% udziałem masowym mączki szklanej wzrost wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej w zakresie od 5 do 30 cm³/s skutkuje nieznacznym zmniejszeniem twardości wynoszącym 0,5°ShD. Dalszy wzrost wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej do 45 cm³/s powoduje spadek twardości o 1,7°ShD, natomiast kolejny wzrost do 90 cm³/s skutkuje spadkiem twardości o kolejne 0,4°ShD. W całym zbadanym zakresie zwiększania wydajności objętościowej wypływu tworzywa zmniejszenie twardości wyniosło 2,6°ShD, co stanowi 4,6% wartości początkowej. Natomiast, dla wyprasek bez napełniacza zmniejszenie twardości otrzymanych wyprasek przy takim samym zwiększeniu wydajności objętościowej wypływu tworzywa jest prawie takie samo i wynosi 2,8°ShD.

Zależność naprężenia przy zerwaniu od wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej (tworzywa) do gniazda formy wtryskowej w przypadku wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255 oraz napełnionych 10% zawartością mączki szklanej przedstawiono na rysunku 7.

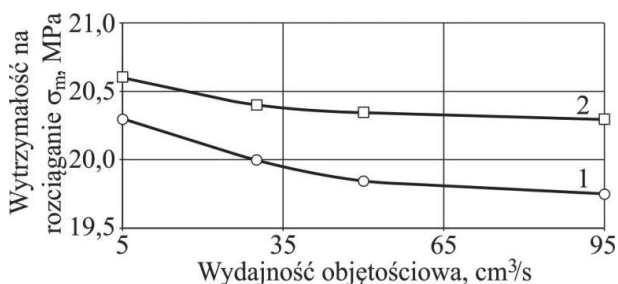
Wraz ze wzrostem wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do



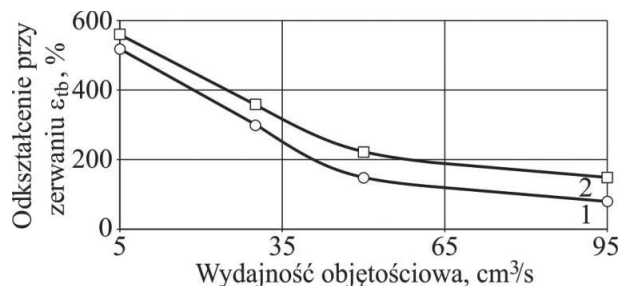
Rys. 7. Zależność naprężenia przy zerwaniu od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej dla: 1 – tworzywa nienapełnionego, 2 – tworzywa z 10% zawartością mączki szklanej

gniazda formy wtryskowej maleją naprężenia przy zerwaniu otrzymanych wyprasek polietylenowych napełnionych 10% udziałem mączki szklanej, jak i nienapełnionych. W badanym zakresie zmienności wydajności objętościowej wypływu tworzywa, naprężenia przy zerwaniu zmalały o 2,4 MPa, w przypadku wydajności objętościowej oraz o 1,4 MPa w przypadku wyprasek nienapełnionych. Stanowi to odpowiednio ponad 19% oraz ponad 12,5% wartości początkowej. W obu przypadkach można także zaobserwować intensywniejszy spadek twardości przy niższych wartościach wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda. Dla wyprasek napełnionych podczas wzrostu wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej z 5 do 30 cm³/s, czyli o 25 cm³/s naprężenia przy zerwaniu zmalały o 1,8 MPa. Przy wzroście wydajności objętościowej wypływu o kolejne 20 cm³/s spadek wartości naprężenia przy zerwaniu jest już mniejszy i wynosi około 0,6 MPa. Dla wydajności objętościowej wypływu tworzywa w zakresie od 50 do 95 cm³/s wartość naprężeń przy zerwaniu jest niezmienna i wynosi 10,2 MPa.

Zależność wytrzymałości na rozciąganie od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej podczas otrzymywania wyprasek z napełniaczem oraz bez napełniacza w postaci mączki szklanej przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej dla: 1 – tworzywa nienapełnionego, 2 – tworzywa z 10% zawartością mączki szklanej



Rys. 9. Odkształcenie przy zerwaniu od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej dla: 1 – tworzywa nienapełnionego, 2 – tworzywa z 10% zawartością mączki szklanej

Zmiana wartości wydajności objętościowej kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej powoduje niewielką zmianę wartości wytrzymałości na rozciąganie. Wraz ze wzrostem wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej maleje wytrzymałość na rozciąganie zarówno dla wyprasek napełnionych, jak i nienapełnionych. Przy czym, wytrzymałość na rozciąganie wyprasek napełnionych jest nieznacznie większa od wytrzymałości na rozciąganie wyprasek nienapełnionych. W przypadku wyprasek napełnionych, podczas wzrostu wydajności objętościowej kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej o 25 cm³/s, a więc z 5 do 30 cm³/s zmiana wytrzymałości na rozciąganie jest największa i wynosi ponad 0,3 MPa. Wzrost wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej od 30 do 95 cm³/s, czyli o 65 cm³/s skutkuje zmniejszeniem wartości wytrzymałości na rozciąganie otrzymanych próbek o ponad 0,2 MPa.

Na rysunku 9 przedstawiono zależność odkształcenia przy zerwaniu od wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej dla wyprasek napełnionych badaną ilością mączki szklanej oraz nienapełnionych.

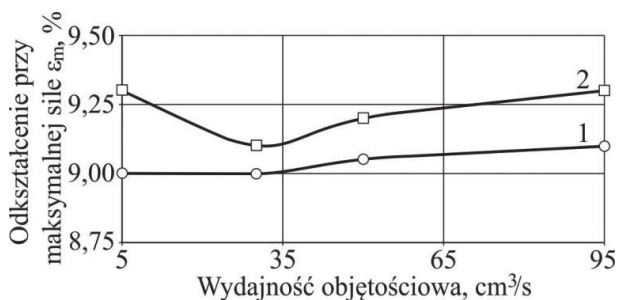
Wraz ze wzrostem wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej maleją odkształcenia przy zerwaniu otrzymanych wyprasek

polietylenowych napełnionych 10% udziałem masowym mączki szklanej oraz wyprasek nienapełnionych. Początkowo spadek ten jest bardzo intensywny. Dla wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej wynoszącej 30 cm³/s odkształcenia przy zerwaniu wyprasek napełnionych, jak i nienapełnionych zmalały o 200% w porównaniu do wartości otrzymanych przy wydajności objętościowej wynoszącej 5 cm³/s. Przy wzroście wydajności objętościowej wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej o 20 cm³/s następuje spadek odkształcenia przy zerwaniu o kolejne 140%, natomiast kolejny wzrost wydajności objętościowej do 95 cm³/s skutkuje spadkiem odkształcenia przy zerwaniu o 60%.

Całkowity spadek odkształcenia przy zerwaniu wynosi ponad 82,0% w stosunku do wartości początkowej, zarówno w przypadku wyprasek napełnionych, jak i nienapełnionych.

Zależność odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej od wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej dla wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255 z 10% zawartością mączki szklanej oraz bez tego napełniacza przedstawiono na rysunku 10.

Największa różnica wartości odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej wyprasek napełnionych mączką szklaną, którą uzyskano dla objętościowego natężenia wypływu kom-



Rys. 10. Zależność odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej od wydajności objętościowej wypływu tworzywa: 1 – tworzywo nienapełnione, 2 – tworzywo z 10% zawartością mączki szklanej

pozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej w zakresie od 5 do 95 cm³/s wynosi około 2%, w przypadku wyprasek nienapełnionych różnice te są jeszcze mniejsze. Można więc stwierdzić, że w badanym zakresie wzrost wydajność objętościowa wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej nie wpływa na odkształcenie przy maksymalnej sile rozciągającej.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że mączka szklana w ilości 10% udziału masowego nie wykazuje właściwości wzmacniających w mieszaninach polimerowych, w których osnową jest polietylen dużej gęstości o nazwie Hostalen GD 7255, a badane parametry wtryskiwania mają wpływ na wybrane właściwości otrzymanych wyprasek.

Wykazano, że czas chłodzenia (w zakresie od 15 do 35 s) wypraski wpływa na naprężenia przy zerwaniu oraz na odkształcenia przy zerwaniu. Wraz ze wzrostem czasu chłodzenia wzrastały naprężenia przy zerwaniu. W przypadku odkształcenia przy zerwaniu wzrost czasu chłodzenia powodował ich spadek. Natomiast, nie wykazano wpływu czasu chłodzenia na twardość, wytrzymałość na rozciąganie oraz na odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej, zarówno dla wyprasek nienapełnionych, jak i napełnionych mączką szklaną w ilości 10% części masowych.

Wydajność objętościowa wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej wpływa w niewielkim stopniu na twardość, naprężenia przy zerwaniu, wytrzymałość na rozciąganie oraz na odkształcenia przy zerwaniu, natomiast nie wpływa na odkształcenia przy maksymalnej sile rozciągającej. Wraz ze wzrostem wydajności objętościowej wypływu tworzywa do gniazda formy wtryskowej nastąpił wzrost wartości twardości, naprężenia przy zerwaniu, wytrzymałości na rozciąganie oraz odkształcenia przy zerwaniu.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania German Academic Exchange Service (DAAD) oraz Dyrektorowi Institut für Produktionstechnik prof. T. Merkel za umożliwienie i finansowe wsparcie badań.

Literatura

1. Valášek P., Müller M.: Polymeric composite based on glass powder – usage possibilities in agrocomplex. *Scientia Agriculturae Bohemica* 2013, 44, 2, 107–112.
2. Ku H., Trada M., Cecil T., Wong P.: Tensile Tests of Phenol Formaldehyde Glass-Powder-Reinforced Composites: Pilot Study. *Journal of Applied Polymer Science* 2010, 116, 1, 10-17.
3. Lee J., Yee A. F.: *Inorganic particle toughening I; micro-mechanical deformations in the fracture of glass bead filled epoxies*. *Polymer* 2001, 42, 577-588.
4. Kaczmar J. W., Bielański A.: *Kompozyty na osnowie polipropylenu wzmacniane mikrokulkami szklanymi*. Teka Kom. Bud. Eksp. Masz. Elektrotech. Bud. – OL PAN 2008, 63-68.
5. Jeziórska R.: *New higher added value polymeric materials made of fabrics wastes containing poly(ethylene terephthalate)*. *Polimery* 2005, 50, 6, 468-472.
6. Wang N., Yu J., Ma X.: *Preparation and characterization of thermoplastic starch/PLA blends by one-step reactive extrusion*. *Polymer International* 2007, 56, 11, 1440–1447.
7. Sikora R.: *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje właściwości i struktura*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej. Lublin 1991.

8. Głogowska K., Sikora J.W.: *Ocena właściwości przetwórczych i cieplnych wyprasek wtryskowych napełnionych proszkowym napełniaczem metalicznym*. Przetwórstwo tworzyw 2015, 21, 2, 98-103.
9. Kuciel S., Liber A.: *Ocena skuteczności wzmacniania polietylenów mączką drzewną*. Polimery 2005, 50, 6, 436-440.
10. Aruniit A., Kers J., Tall K., Majak J., Krumme A.: *Influence of hollow glass microspheres on the mechanical and physical properties and cost of particle reinforced polymer composites*. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences 2012, 61, 3, 160-165.
11. Ku H., Wong P.: *Contrast on tensile and flexural properties of glass powder reinforced epoxy composites: pilot study*. Journal of Applied Polymer Science 2012, 123, 1, 152-161.
12. Balkan O., Demirer H.: *Mechanical properties of glass bead- and wollastonite-filled isotactic-polypropylene composites modified with thermoplastic elastomers*. Polymer Composites 2010, 31, 7, 1285-1308.
13. Stricker F., Bruch M., Muhlhaupt R.: *Mechanical and thermal properties of syndiotactic polypropylene filled with glass beads and talcum*. Polymer 1997, 38, 5347-5353.
14. Liang J. Z., Li R. K. Y., Tjong S.C.: *Effect of glass bead size and content on the viscoelasticity of filled polypropylene composites*. Polymer Testing 2000, 19, 213-220.
15. Liang J. Z., Wu C. B.: *Effects of the glass bead content and the surface treatment on the mechanical properties of polypropylene composites*. Journal of Applied Polymer Science 2012, 123, 5, 3054-3063.
16. Saheb D. N., Jog J. P.: *Natural Fiber Polymer Composites: A Review*. Advances in Polymer Technology 1999, 18, 4, 351-363.
17. Breuer O., Sundararaj U.: *Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites*. Polymer composites, 2004, 25, 6, 630-645.
18. Al-Oqla F. M., Sapuan S. M.: *Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry*. Journal of Cleaner Production 2014, 66, 347-354.
19. Carlsson L. A., Adams D. F., Pipes R. B.: *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, Fourth Edition*. Taylor and Francis Group, Boca Raton-London-New York 2014.
20. Wulfsberg J., Herrmann A., Ziegmann G., Lonsdorfer G., Stöß N., Fette M.: *Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry*. Procedia Engineering 2014, 81, 1601-1607.