

Andrzej Skalski, Dionizy Biało*, Waldemar Wiśniewski

Politechnika Warszawska, Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Poland

** Corresponding author. E-mail: dbialo@mchtr.pw.edu.pl*

Otrzymano (Received) 28.03.2008

OCENA WPŁYWU WARUNKÓW WTRYSKIWANIA NA PRZEBIEG NAPEŁNIANIA MIKROKANAŁÓW TERMOPLASTYCZNYM MATERIAŁEM Z PROSZKAMI

Praca przedstawia problemy związane z formowaniem mikroelementów z materiałów proszkowych i obejmuje pierwszy etap - wtryskiwanie do gniazd formujących i napełnianie mikrokanalów. Wtryskiwano materiał stanowiący kompozycję złożoną ze specjalnego termoplastycznego lepiszcza i proszku metalowego. Do badań zastosowano proszki żelaza karbonylowego o ziarnistości 1 i 4 μm oraz proszek stali kwasoodpornej o ziarnistości 16 μm . Składnikami lepiszcza były: wosk, polietylen i parafina. Mieszalinę proszku z lepiszczem przygotowano w mieszalniku typu 2Z w temperaturze 125°C przez 1 godzinę, co zapewniało uzyskanie masy homogenicznej. Udział proszku w przygotowywanych masach wynosił $V_p = 60\%$ obj. Wtryskiwanie przeprowadzono na specjalnej mikrowtryskarce własnej konstrukcji, umożliwiającej wtryskiwanie porcji materiału (masy) w zakresie od 1 do 200 mm^3 . Do przeprowadzenia badań w tym zakresie została wykonana specjalna wkładka formująca, zawierająca mikrokanaly o szerokości od 50 do 500 μm . Stosowano następujące parametry wtrysku: temperatura masy (T_w) 115 i 125°C, ciśnienie (p) 60 MPa, temperatura formy (T_f) od 25 do 80°C. Przedstawiono badania dotyczące wpływu parametrów wtryskiwania: temperatury formy, temperatury materiału oraz składu materiału na jakość wypełniania przez materiał mikroformy. Jako wskaźnik zachowania masy podczas wtryskiwania przyjęto drogę L wpływania masy do mikrokanalów i do gniazd mikroform. Wykazano, że najważniejszym parametrem decydującym o przebiegu napełniania mikrokanalów jest temperatura formy i dla badanych mas nie powinna być niższa niż 70°C. Uzyskane informacje wykorzystano w próbach wtryskiwania kształtek do prób na zginanie i rozciąganie oraz koła zębatego.

Słowa kluczowe: formowanie wtryskowe, mikroelementy, proszki metali

INFLUENCE OF INJECTION CONDITION ON MICRO CHANNEL FILLING BY THERMOPLASTIC - POWDER FEEDSTOCKS

In the last few years micro system technology has gained increasing development and new method of fabrication of micro components are needed. Micro metal injection moulding (μMIM) is the process which allows to manufacture very small elements (micro parts) with dimensions below 1 mm in large - scale production cycle, complex shape, wide range of materials and in economic way. In μMIM very fine powders are mixed with special, complex binder with thermoplastic properties. Obtained mass (feedstock for injection) is injected to the micro mould. Next the binder is removed and shapes undergo sintering. Selected problems of micro injection moulding of micro parts is presented in this paper. It deals with first step of the micro forming process. The metal powder used in this study was carbonyl iron powder with particles of 1, 4 μm and stainless steel powder with particles of 16 μm . The binder system was based on wax, polyethylene and paraffin. Powder / binder feedstock was prepared in 2Z type mixer with heating system at temperature of 125°C in 1 hour. Volume fraction of powder in the feedstock V_p was 60%. For the purpose of micro injection, special micro form was designed. Micro form was equipped in heating - cooling system and insert having 6 micro channel with cross - section ranged from 2 to 210 μm^2 . The following injection parameters were used: feedstock temperature of 115 and 125°C, pressure of 60 MPa and mould temperature of 25 to 80°C. The way of channel feeling i.e. the distance L on which the feedstock flow - in to the channel was taken as the indicator of feedstock behavior during injection. The research has shown that the principal parameter influenced on distance L is temperature of the mould T_f . The higher is T_f , the longer is L . It is worth to note that characteristic threshold value of temperature above which feeling of channel is possible occurs. For the feedstock tested it was above 70°C. The following conclusion which may be drawn from the presented research is that the higher is volume fraction of the powder in the feedstock the more difficult is micro channel feeling. It has strong connection with higher viscosity of the feedstock.

Keywords: injection moulding, micro parts, metal powders

WPROWADZENIE

Rozwój miniaturyzacji elementów elektronicznych i mechanicznych wymusza opracowywanie coraz nowocześniejszych technologii ich wytwarzania [1-3]. Stosowane obecnie metody produkcji elementów MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ograniczają wykorzystanie materiałów do tych, które poddają się produkcji za pomocą technologii LIGA, obróbkami laserowymi i erozyjnymi, trawieniem itp. [1, 2, 4, 5]. Pojawił się problem z adaptacją dobrze znanych technologii ze skali makro do skali mikro. Okazuje się, że nie zawsze jest to możliwe i parametry obróbcze ze skali makro nie dają pożądaných efektów do wykonania elementów, których wymiary są mniejsze od 1 mm. Widoczne to jest w kształtowaniu elementów z tworzyw sztucznych oraz kompozytów. Jednym z bardziej obiecujących jest formowanie mikroelementów poprzez wtryskiwanie. Taki sposób kształtowania umożliwia wytwarzanie mikroelementów o złożonych kształtach, dużej dokładności w wielkich seriach, przy dużej wydajności i konkurencyjności w stosunku do innych sposobów wytwarzania.

Formowanie wtryskowe mikroelementów (micro moulding) bazuje na znanym i szeroko stosowanym sposobie wytwarzania wyrobów z tworzyw termoplastycznych. Pierwsze prace badawcze i zastosowania dotyczyły mikroelementów wytwarzanych wtryskowo właśnie z termoplastów [3, 5-7].

Mikroelementy wtryskiwane z proszków metalowych i ceramicznych są przeznaczone do pracy w trudniejszych warunkach, w podwyższonej temperaturze i przy większych obciążeniach mechanicznych niż elementy z tworzyw sztucznych. W tej technologii problemem jest nie tylko wykonanie formy wtryskowej, ale również dobór parametrów całego procesu wtrysku. Nie ma opracowanych testów umożliwiających w jednoznaczny sposób określenie przydatności materiału do wykonania mikroelementu metodą wtryskiwania.

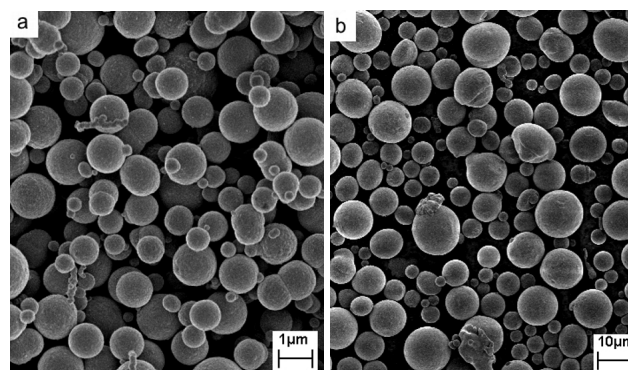
Przedstawiony artykuł dotyczy badań związanych z pierwszym etapem wytwarzania mikroelementów z proszków metali. Cały proces wytwarzania mikroelementu obejmuje przygotowanie masy złożonej z proszku i specjalnego termoplastycznego lepiszcza, wtryskiwania, usuwania lepiszcza (debinderyzacja) i spiekania [8, 9, 10]. Przedstawiono wyniki napełniania kanałów i gniazd formujących mikroelementy, a także przykłady uzyskanych kształtek.

BADANE MATERIAŁY

Masa przewidziana do formowania wtryskowego jest kompozycją składającą się z termoplastycznego lepiszcza i określonego mikroproszku żelaza lub stali kwasoodpornej. Stosowano proszki o trzech ziarnistościach 1, 4 i 16 μm . Charakterystykę poszczególnych proszków zawiera tabela 1, a fotografie wybranych proszków przedstawiono na rysunku 1.

TABELA 1. Charakterystyka proszków
TABLE 1. Characteristic of powders

Rodzaj proszku	Symbol	Producent	Ziarnistość	Kształt cząstek
żelazo karbonylkowe	HQ	BASF	1 μm	kulisty
żelazo karbonylkowe	OM	BASF	4 μm	kulisty
stal kwasoodporna	316L	Anval	16 μm	kulisty



Rys. 1. Proszek żelaza karbonylkowego HQ (a) i proszek stali kwasoodpornej 316L (b)

Fig. 1. Carbonyl iron powder HQ (a) and stainless steel powder 316L (b)

Do badań wykonano lepiszcze o następującym składzie:

- polietylen wysokociśnieniowy 20%
- parafina 69%
- воск karnauba 10%
- kwas stearynowy 1%

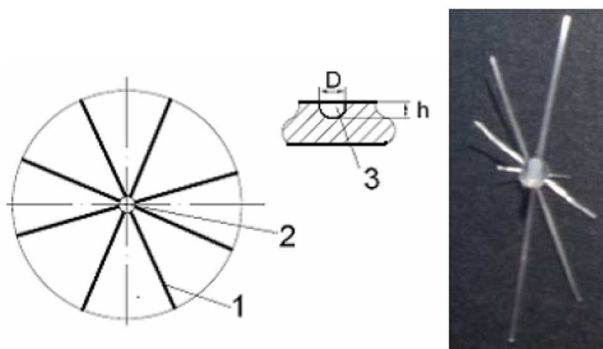
Przygotowanie masy wtryskowej złożonej z proszku i lepiszcza przeprowadzono w mieszalniku typu 2Z z ogrzewanym płaszczem w temperaturze 125°C przez okres 1 godziny. Był to wystarczający okres dla uzyskania jednorodnej masy. Do prób wtryskiwania i napełniania mikrokanalów zastosowano stosunkowo dużą wartość napełnienia masy proszkiem $V_p = 60\%$ obj. Jest to napełnienie bliskie wartości napełnienia maksymalnego (61÷64%), przy którym jest jeszcze możliwe wtryskiwanie.

W celach porównawczych badaniu poddano polietylen wysokociśnieniowy (PE). Jak wiadomo, tworzywa termoplastyczne są także stosowane na mikroelementy [3, 5]. Szersze badania związane z wtryskiwaniem tego materiału znajdują się w publikacji [7].

PROCEDURA BADAŃ

Do badań zaprojektowano specjalną formę wtryskową z wykonanymi mikrokanalami o przekrojach: 0,002; 0,018; 0,033; 0,077; 0,13 i 0,21 mm^2 . Było to konieczne, gdyż brak jest znormalizowanych testów badania mikroformowania, a test spiralny stosowany przy formowaniu makroelementów w omawianym przypadku

jest nieprzydatny. Forma ma wbudowaną grzałkę z systemem regulacji temperatury oraz układ chłodzący. Związane jest to z koniecznością pracy w szerokim zakresie temperatur. Wygląd wkładki formującej przedstawia rysunek 2. Mikrokanały ułożone są wzdłuż promienia. Dysza wtryskowa formy doprowadzała masę (lub PE) centralnie do wkładki formującej, skąd dalej wpływała do mikrokanałów. Ich wymiary zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 2. Wkładka matrycowa do oceny drogi płynięcia masy i próbka odwzorowująca mikrokanały w formie: 1 - mikrokanal, 2 - miejsca wtrysku, 3 - widok przekroju poprzecznego kanału

Fig. 2. Mould insert for estimation of distance flowing of feedstock and sample for micro channel mapping: 1 - micro channel, 2 - point of injection, 3 - view of channel cross-section

TABELA 2. Wymiary mikrokanalów

TABLE 2. Micro channel dimensions

Szerokość	D , mm	0,05	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5
Głębokość	h , mm	0,043	0,13	0,17	0,27	0,35	0,42
Przekrój	S , mm ²	0,002	0,018	0,033	0,077	0,13	0,21

Tak zaprojektowana forma umożliwia uzyskanie równocześnie szeregu informacji podczas jednego cyklu wtryskiwania, otrzymano jednocześnie informacje o przebiegu wypełniania kilku mikrokanalów o różnym przekroju jednocześnie.

Stosowano następujące wartości parametrów technologicznych wtryskiwania:

Temperatura masy T_w - 115 i 125°C

Temperatura formy T_f - 25, 40, 50, 60, 70 i 80°C

Ciśnienie p - 60 MPa

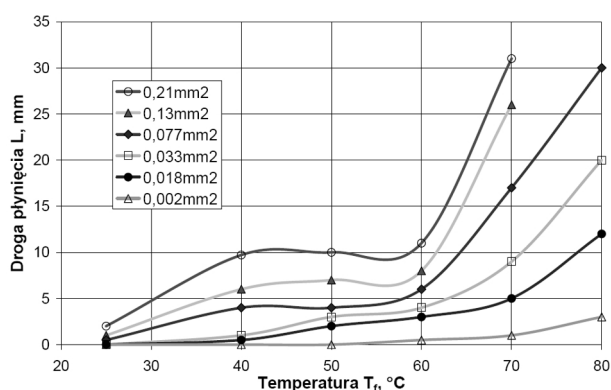
Napełnienie masy proszkiem V_p - 60%

WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 3 przedstawiono typowy, dla omawianych badań, wykres zależności napełnienia (drogi płynięcia masy L) mikrokanalów od temperatury formy. Wykres dotyczy masy zawierającej proszek żelaza o ziarnistości 4 μ m przy stopniu napełnienia masy proszkiem $V_p = 60\%$.

Otrzymane wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem temperatury T_f droga płynięcia materiału wzrasta. Na wykresie widoczna jest granica temperatury, powyżej

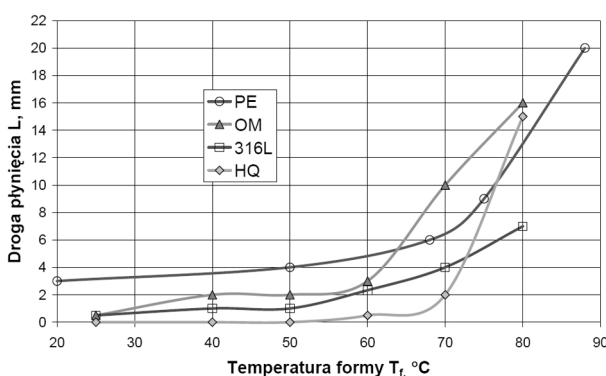
której napełnianie kanałów przez materiał przebiega zdecydowanie łatwiej. Dla większych mikrokanalów jest to około 60°C, dla mikrokanalów o mniejszych przekrojach konieczne jest stosowanie wyższej temperatury. Prawdopodobnie to zjawisko było podstawą do wprowadzenia tzw. procesu variotherm [6], w którym dla niektórych materiałów stosowano grzanie form nawet do temperatury 90 lub 100°C. Istotny jest także przekrój kanałów. Z jego wzrostem droga płynięcia L zdecydowanie rośnie. W takim przypadku struga materiału przemieszczająca się w kanale ma relatywnie większą masę i wolniej ulega schładzaniu w kontakcie z chłodniejszą formą.



Rys. 3. Zależność drogi płynięcia L od temperatury formy T_f i przekroju mikrokanalów dla masy z proszkiem OM (4 μ m) przy $V_p = 60\%$ i $T_w = 115^\circ\text{C}$

Fig. 3. Dependence of distance flowing L on mould temperature T_f and micro channel cross-section for feedstock with OM powder (4 μ m) at $V_p = 60\%$ and $T_w = 115^\circ\text{C}$

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zależności drogi płynięcia L (mm) od temperatury formy T_f dla różnych przekrojów mikrokanalów i różnych materiałów wtryskiwanych.



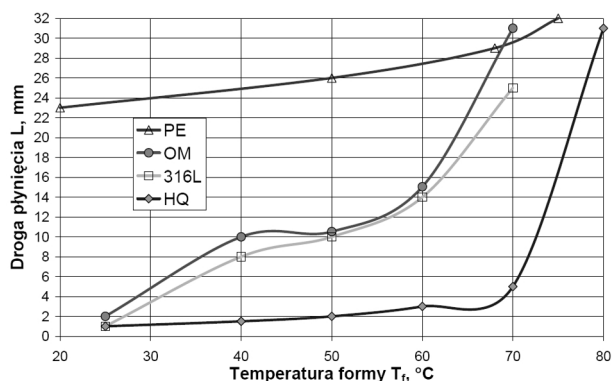
Rys. 4. Zależność drogi płynięcia L masy i PE w mikrokanale o przekroju $S = 0,033 \text{ mm}^2$ od temperatury formy T_f i przy $V_p = 60\%$ i $T_w = 115^\circ\text{C}$

Fig. 4. Dependence of distance flowing L of the feedstock and PE in micro channel with cross-section $S = 0,033 \text{ mm}^2$ on mould temperature T_f at $V_p = 60\%$ and $T_w = 115^\circ\text{C}$

Rysunek 4 dotyczy napełniania mikrokanalu o przekroju 0,033 mm². Widoczna jest tu również zależność drogi napełniania od temperatury formy. W temperatu-

rze niższej niż 60°C napełnianie kanału przez poszczególne materiały jest porównywalne i wynosi od 1 do 4 mm. Po przekroczeniu tej wartości zaczyna pojawiać się również wpływ rodzaju materiału. Polietylen jako materiał jednorodny lepiej napełnia kanał zarówno w niższej temperaturze, jak też w podwyższonej, niż masy z proszkami.

Rysunek 5 dotyczy napełnianie mikrokanalu o przekroju 0,21 mm². Mikrokanal ma kilkakrotnie większy przekrój w stosunku do mikrokanalu z rysunku 4. Zwiększenie przekroju prowadzi do lepszego napełniania formy. Widoczny jest także wpływ wielkości ziaren na przebieg procesu wtrysku mikroelementów, co potwierdzają dane z rysunków 4 i 5. Masa z proszkiem HQ o najmniejszej ziarnistości 1 μm przy wypełnieniu 60% możliwa jest do wtryskiwania dopiero po przekroczeniu temperatury $T_f = 70^\circ\text{C}$. W przypadku mas z proszkami o większej ziarnistości ten próg temperatury można obniżyć o około 10°C.



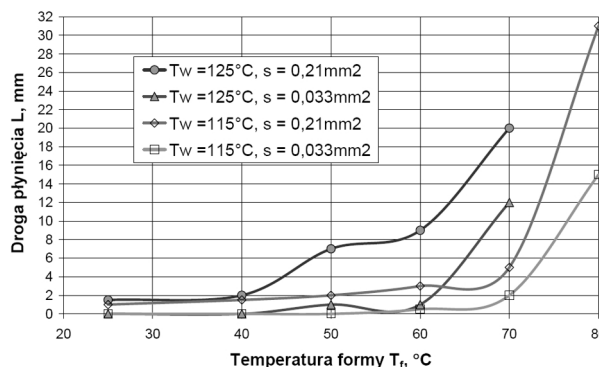
Rys. 5. Zależność drogi płynięcia L masy PE w mikrokanale o przekroju $S = 0,21 \text{ mm}^2$ od temperatury formy T_f i przy $V_p = 60\%$ i $T_w = 115^\circ\text{C}$

Fig. 5. Dependence of distance flowing L of the feedstock and PE in micro channel with cross-section $S = 0,21 \text{ mm}^2$ on mould temperature T_f at $V_p = 60\%$ and $T_w = 115^\circ\text{C}$

Kolejnym parametrem technologicznym, mogącym mieć wpływ na poprawę parametrów wykonania elementów, jest temperatura wtryskiwanego materiału (T_w). Na rysunku 6 zamieszczone zostały wyniki napełniania kanałów o przekrojach 0,033 i 0,21 mm² dla temperatury wtryskiwanego materiału 115 i 125°C. Wtryskiwana masa zawierała proszek żelaza o ziarnistości 1 μm. Widoczna jest zgodność z przewidywaniami, że wzrost temperatury materiału poprawi skuteczność napełniania mikrokanalów, a także napełniania formy. Wpływie również na możliwość obniżenia temperatury formy przy zachowaniu dobrego napełniania. Pamiętać należy, że nie można nadmiernie zwiększać temperatury materiału i formy ze względu na możliwość występowania degradacji materiału jeszcze przed jego wtryskiem do gniazda formy.

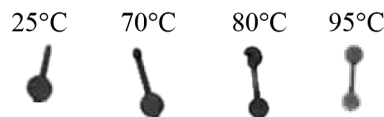
Przedstawione wyniki badań napełniania mikrokanalów były weryfikowane poprzez wykonywanie gotowych mikroelementów w postaci belek na zginanie i próbek

na rozciąganie oraz miniaturowych kół zębatych. Przykład takich elementów przedstawiają rysunki 7 i 8.



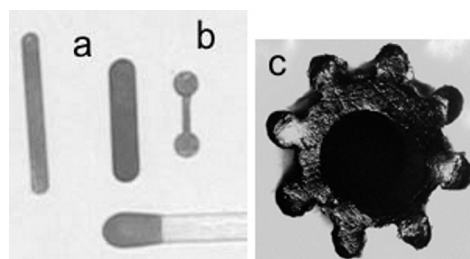
Rys. 6. Zależność drogi płynięcia L od temperatury formy T_f przy przekroju mikrokanalów 0,033 i 0,21 mm² dla masy z proszkiem 1 μm przy $V_p = 60\%$ i $T_w = 115$ i 125°C

Fig. 6. Dependence of distance flowing L on mould temperature T_f of two micro channel cross-section of 0.033 and 0.21 mm² for the feedstock with 1 μm powder at $V_p = 60\%$ and $T_w = 115$ and 125°C



Rys. 7. Wygląd mikropróbek na rozciąganie formowanych przy różnej temperaturze formy i przy ustalonych warunkach wtryskiwania: $T_w = 115^\circ\text{C}$, $p = 60 \text{ MPa}$ i $V_p = 60\%$

Fig. 7. View of the micro tensile samples shaped at variable mould temperature and fixed injection parameter: $T_w = 115^\circ\text{C}$, $p = 60 \text{ MPa}$ and $V_p = 60\%$



Rys. 8. Przykłady wykonanych elementów przed spiekaniem: a - belki na zginanie: 1x1x10, 2x2x12 mm, b - próbka na rozciąganie 0,5x0,5x5 mm, c - koło zębate $D_z = 1,2 \text{ mm}$, $m = 0,15$, $z = 8$

Fig. 8. Injected elements before sintering: a - samples for bending test 1x1x10 and 2x2x12 mm, b - sample for strength test 0.5x0.5x5 mm, c - gear wheel $D_z = 1,2 \text{ mm}$, $m = 0,15$, $z = 8$

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań nad przebiegiem napełniania mikrokanalów przy formowaniu wtryskowym mikroelementów z proszków metali można sformułować następujące wnioski:

- Zaproponowana metoda badania, w której wykorzystuje się specjalną wkładkę matrycową z wieloma kanałami o zróżnicowanym przekroju, okazała się w pełni przydatna do oceny zachowania mas proszek/lepiszcze przy mikrowtryskiwaniu.

- Najważniejszym parametrem decydującym o przebiegu napełniania mikrokanalów jest temperatura formy. Musi być ona znacznie wyższa niż w przypadku formowania wtryskowego makroelementów z makroproszków.
- Im większy jest stopień napełnienia masy proszkiem V_p i im drobniejsze są cząstki proszku, tym trudniej przebiega wpływanie masy do mikrokanalów. Ma to ścisły związek ze wzrostem lepkości masy.
- Z tworzywa termoplastycznego (PE) jako materiału jednorodnego łatwiej wykonać mikroelement niż z materiałów o budowie kompozytowej zawierających proszki.

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego Nr N503 002 31/0309 pt. „Badania procesu formowania wtryskowego mikroelementów z mikro- i nano-proszków metalowych i ceramicznych” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Oczóś K.E., Kształtowanie mikroczęści - charakterystyka sposobów mikroobróbki i ich zastosowanie, *Mechanik* 1999, 5-6, 309-327.
- [2] Mrugalski Z., Rymuza Z., Mikromechanizmy, *Pomiary, Automatyka i Kontrola* 1998, 6, 4-9.
- [3] Gad-el-Hak M., *The MEMS Handbook*, Second Edition, Virginia Com. University 2005.
- [4] Poiter V. et al., Micro Powder Injection Moulding, *EURO PM2000*, Oct. 18-20, 2000, Munich, Germany, vol. PIM, 259-264.
- [5] Hasselbach J. et al., Investigation on the International State of Art of Micro Production Technology. *Euspen Int. Topical Conf.*, Aachen, Germany, May 19-20, 2003, 11-18.
- [6] Piottter V. et al., Micro Injection Molding of Components for Microsystems, *1st Euspen Topical Conf. on Fabrication and Metrology in Nanotechnology*, Copenhagen, May 28-30, 2000, vol. 1, 182-189.
- [7] Biało D., Skalski A., Paszkowski L., Selected Problems of Micro Injection Moulding of Microelements, (w:) *Recent Advances in Mechatronics*, pr. zbiorowa pod red. J. Jabłońskiego, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2007, 370-374.
- [8] Benzler T. et al., Fabrication of Microstructures by MIM and CIM, *PM World Congress PIM*, Granada, Spain 1998, 3, 9-14.
- [9] Zauner R., Korb G., Micro Powder Injection Molding for Microstructured Components, *PM Plansee Seminar*, Reute, Austria, 2005, PL 5, 59-68.
- [10] Biało D., Metoda formowania wyrobów z proszków poprzez wtrysk, *Konferencja Nauk.-Techn. Postępy w Elektrotechnologii*, Szklarska Poręba, 14-16 września 1994, t. 1, 235-240.