

JACEK W. KACZMAR, ALEKSANDRA BRZOSTEK

Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji
Laboratorium Tworzyw Sztucznych
ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław
e-mail: jacek.kaczmar@pwr.wroc.pl

Aspekty projektowania i wytwarzania mikroelementów oraz zastosowanie technologii mikrowtryskiwania

Streszczenie — Na podstawie literatury omówiono wybrane problemy dotyczące projektowania wyrobów z tworzyw polimerowych formowanych metodą mikrowtryskiwania. Scharakteryzowano stosowane w tej metodzie termoplastyczne materiały polimerowe, uwypuklając ich specyficzne właściwości. Przedstawiono przykłady podstawowych zastosowań technologii mikrowtryskiwania oraz uzyskanych na tej drodze mikrodetali z tworzyw polimerowych, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości wytwarzania w taki sposób również metalowych mikrodetali.

Słowa kluczowe: mikrowtryskiwanie, tworzywa termoplastyczne, mikrodetale, projektowanie, mikroformy.

ASPECTS OF DESIGNING AND MANUFACTURING OF MICRO-PARTS AND APPLICATION OF MICRO INJECTION MOLDING TECHNOLOGY

Summary — Selected problems related to the designing of the products made of polymeric materials formed by micro injection molding were discussed. Polymeric thermoplastic materials used in this method were characterized and their specific properties (Table 1) were stressed. Examples of basic applications of micro injection molding technology as well as of the polymeric micro-parts produced by this way (Fig. 1—5), with especially stressed possibility of metal micro-parts (Fig. 6) fabrication, were presented.

Key words: micro injection molding, thermoplastics, micro-parts, designing, micro-molds.

Produkowane na coraz szerszą skalę mikrosystemy nielektroniczne powszechnie stosuje się obecnie w lotnictwie, przemyśle samochodowym, medycynie, telekomunikacji oraz w przemyśle komputerowym. Zalety miniaturyzacji urządzeń technicznych to przede wszystkim zmniejszenie zajmowanej przez nie przestrzeni a także oszczędności materiałowe i energetyczne.

W niniejszym opracowaniu przyjmuje się, że mikrosystem jest układem składającym się z elementów o wymiarach do ok. milimetra, wpływających na funkcjonowanie końcowego urządzenia [1], natomiast określenie mikrodetal odnosi się tu do elementu o wymiarach do kilku milimetrów.

Jedną z podstawowych metod wytwarzania dowolnych elementów z tworzyw polimerowych, którą można zaadoptować do otrzymywania detali o niewielkich wymiarach (mikrodetali) jest wtryskiwanie [2].

MATERIAŁY STOSOWANE DO WYTWARZANIA MIKRODETALI

W większości przypadków do mikrowtryskiwania używa się tworzyw termoplastycznych, stosowanych

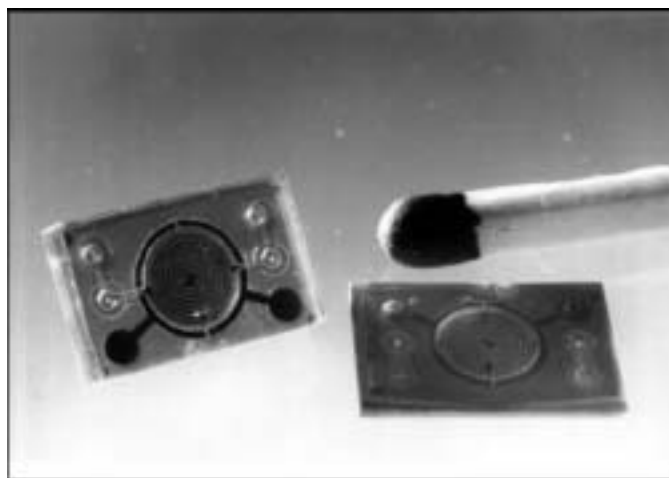
także w tradycyjnym wtryskiwaniu. Stanowią one bardzo dużą grupę materiałów znajdujących wielorakie zastosowania techniczne (tabela 1), obejmujące produkty stabilne w wysokiej temperaturze a również polimery odporne na działanie agresywnych odczynników chemicznych, np. PSU (por. rys. 1). Są wśród nich materiały zarówno przezroczyste, jak i nieprzezroczyste, co umożliwia wykonywanie elementów o pożądanym właściwościach optycznych.

Dzięki wprowadzeniu odpowiednich napełniaczy można zmieniać właściwości użytkowe używanych materiałów polimerowych. Obecnie w mikrowtryskiwaniu stosuje się wprawdzie głównie nienapełniane termoplasty, jednakże konieczność otrzymywania mikrodetali o lepszych właściwościach mechanicznych, termicznych, chemicznych i elektrycznych powoduje również coraz częstsze napełnianie ich niektórymi stopami metali i materiałami ceramicznymi [5].

Przetwórstwo tworzyw napełnianych przewodzącą sadzą, np. PA-12C lub POM-C pozwala na wytworzenie mikroelementów elektroprzewodzących, które następnie odwzorowywane metodami galwanicznymi (traczone mikroformy — ang. *lost micromolds*) na elementach

T a b e l a 1. Polimery termoplastyczne stosowane do formowania metodą mikrowtryskiwania [3, 4]
T a b l e 1. Thermoplastic polymers used for micro injection molding [3, 4]

Polimer	Stabilność termiczna, °C	Struktura	Specyficzne właściwości	Przykłady zastosowania w mikrotechnologii
Poli(metakrylan metylu) (PMMA)	80	amorficzna	duża przezroczystość	złączki kabli światłowodowych
Poliwęglan (PC)	130	amorficzna	duża przezroczystość	pojemniki do hodowli komórek
Polistyren (PS)	80	amorficzna	przezroczystość	soczewki
Polioksymetylen (POM)	90	semikrystaliczna	mała ścieralność	sączone z określonymi średnicami porów
Poliamid (PA)	80–120	semikrystaliczna	dobre właściwości mechaniczne	kółka zębate mikroprzekładni
Polisulfon (PSU)	150	amorficzna	odporność termiczna i chemiczna	pokrycia urządzeń mikrostrukturalnych
Polieteroeteroketon (PEEK)	250	semikrystaliczna	duża odporność termiczna	pokrycia mikropomp



Rys. 1. Mikropompa z polisulfonu otrzymana metodą mikrowtryskiwania [3] (fotografia uzyskana dzięki uprzejmości Forschungszentrum Karlsruhe)

Fig. 1. Polysulfone micropump manufactured by micro injection molding [3] (courtesy of Forschungszentrum Karlsruhe)

metalowych (np. płytach ze stopów metali) prowadzą do uzyskania mikrodetali ze stopów metalowych [5, 6].

Metoda mikrowtryskiwania reaktywnego, zgodnie z którą do formy wprowadza się dwa reagujące ze sobą składniki, daje możliwość formowania detali z układów polimer termoutwardzalny + elastomer. Początkowo techniką tą posługiwano się niezbyt często z powodu trudności związanych z dokładnym wymieszaniem składników oraz długim czasem przebiegu reakcji chemicznej. Obecnie, ze względu na możliwość sieciowania prowadzonego za pomocą promieni UV, znajduje ona coraz więcej zastosowań [3, 7]. W mikrowtryskiwaniu reaktywnym wykorzystuje się materiały akrylowe, amidowe i silikonowe. Usuwanie wypraski z formy ułatwia dodanie do przetwarzanego materiału środków antyadhezyjnych (tzw. wewnętrznych), co może wprawdzie nieco zmieniać jego właściwości cieplne i mechaniczne, jednak stosowanie zewnętrznych środków antyadhezyjnych okazało się niekorzystne ze względu na utrudnienie wypełniania mikrogniazd [6].

PROJEKTOWANIE MIKRODETALI

Detale otrzymywane w procesie mikrowtryskiwania charakteryzują się małymi wymiarami przekrojów poprzecznych i dużym stosunkiem wysokości do szerokości (ang. *aspect ratio*). Ponadto, równoległe powierzchnie ścian kształtek oraz brak wyrzutników stwarzają problemy z usuwaniem tych mikrodetali z formy [6].

Projektując detal formowany metodą mikrowtryskiwania należy uwzględnić specyficzne cechy polimerów, takie jak rozszerzalność cieplna, pełzanie, dyfuzja gazów w materiał polimerowy, a także właściwości chemiczne. Z punktu widzenia przetwórstwa szczególnie niekorzystna jest duża rozszerzalność cieplna polimerów w porównaniu z rozszerzalnością innych materiałów konstrukcyjnych. W wielu przypadkach niezbędne jest stosowanie rozmaitych materiałów, z różnymi wartościami współczynników rozszerzalności cieplnej, co powoduje powstawanie naprężeń będących funkcją temperatury. Prawidłowe zaprojektowanie wypraski pozwala na uniknięcie takich trudności, mimo to jednak polimery nie nadają się do wytwarzania z nich precyzyjnych detali z małą tolerancją wymiarową [3].

Ze względów praktycznych problemem jest także niewielka odporność polimerów na pełzanie. Wprawdzie mała grubość powłok polimerowych powoduje, że charakteryzują się one najczęściej małą skłonnością do pełzania, jednak zjawisko to jest szczególnie niekorzystne np. w odniesieniu do elastycznych elementów czujników wykonanych z materiałów polimerowych. Często rozwiązuje się to zagadnienie formując, za pomocą mikrowtryskiwania, powłoki polimerowe na elastycznym detalu wykonanym z innego materiału [3]. Niekorzystna jest także dyfuzja gazów w głąb polimerów, często powodująca wzrost wymiarów mikrodetalu. Zjawisko to eliminuje się pokrywając polimer metalową powłoką grubości ok. 100 nm [3].

Do wytwarzania mikrodetali metodą mikrowtryskiwania stosuje się termoplasty o małej lepkości, wykazujące dobre właściwości mechaniczne w temperaturze, w której następuje usuwanie detalu z formy. Najczęściej używa się polimerów o ciężarze cząsteczkowym zawar-

tym w przedziale 40 000 — 100 000. W przypadku detali łatwo ulegających zniszczeniu podczas usuwania ich z formy, używa się amorficznych termoplastów modyfikowanych plastyfikatorami. Istotny jest tu także dobór rodzaju polimeru do rodzaju materiału, z którego wykonana jest mikroforma — na przykład obecność agresywnych reagentów w polimerze powoduje korozję materiału formy. Zjawisko takie zwiększa chropowatość powierzchni formy, utrudnia usuwanie detali i przyczynia się do niszczenia gniazd formujących — zatem polimery przeznaczone do mikroformowania muszą charakteryzować się dużą czystością chemiczną [7].

W projektowaniu mikrodetali należy także brać pod uwagę sposób ich późniejszego łączenia. Najbardziej powszechne jest klejenie, przeprowadzane w stosunkowo niskiej temperaturze, co ogranicza powstawanie w detalu naprężeń mechanicznych. Czasem jednak elementy łączy się zgrzewając je za pomocą ultradźwięków [3].

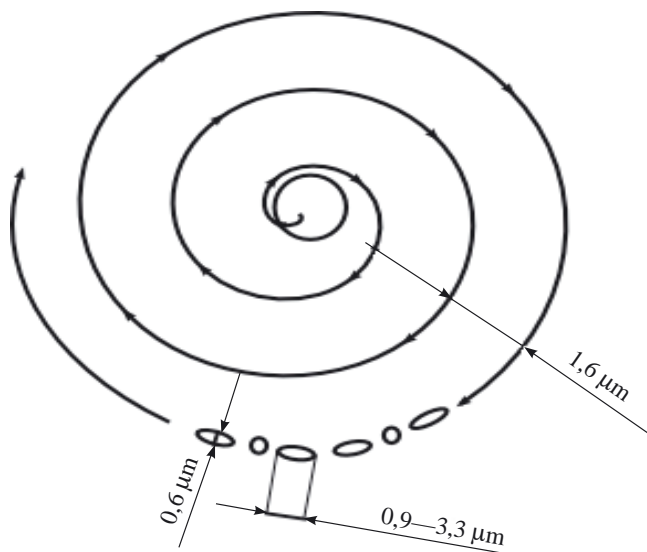
Niewielkie wymiary i mała masa mikrodetali powodują, że łączenie ich w mikrosystemy jest procesem trudnym i długotrwałym. Prace dotyczące ograniczenia kosztów i skracania czasu wytwarzania elementów łączonych i hybrydowych za pomocą mikrowtryskiwania prowadzi się m.in. w Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen oraz w Forschungszentrum, Karlsruhe [4].

Zgodnie z zasadami projektowania obowiązującymi w przypadku konwencjonalnego wtryskiwania, także w mikroelementach należy unikać ostrych naroży powodujących koncentrację naprężeń. Dużym problemem w procesie mikrowtryskiwania jest usuwanie mikrodetalu z formy, albowiem może nastąpić wówczas jego zniszczenie lub zniekształcenie.

Ważnym zagadnieniem w przypadku mikrowtryskiwania dwu- lub wielokomponentowego jest odpowiedni, zapewniający dobrą wzajemną adhezję, dobór parametrów procesu ze względu na różne właściwości wtryskiwanych materiałów [4]. Istotne jest również zaprojektowanie i wykonanie formy uwzględniające możliwość współpracy dwóch układów wtryskowych, niezbędna we wtryskiwaniu wielokomponentowym [8].

ZASTOSOWANIA PROCESU MIKROWTRYSKIWANIA

Miniaturowe elementy znajdują zastosowanie m.in. w elektronice, telekomunikacji, medycynie i przemyśle samochodowym [4]. Dobrze znanym przykładem wykorzystywania mikrowtryskiwania jest wytwarzanie z poliwęglanu płyt CD lub DVD. Podczas produkcji płyt CD oryginalna struktura, tzw. matryca, jest formowana z zastosowaniem litografii laserowej i powlekania galwanicznego, a następnie powielana w procesie mikrowtryskiwania [9]. Wymiary mikrostruktur ścieżki informacyjnej wynoszą $0,6 \times (0,9—3,3)$ mikrometra (z tolerancją ± 50 nm), natomiast odległość ścieżek to 1,6 mikrometra (rys. 2) [10].



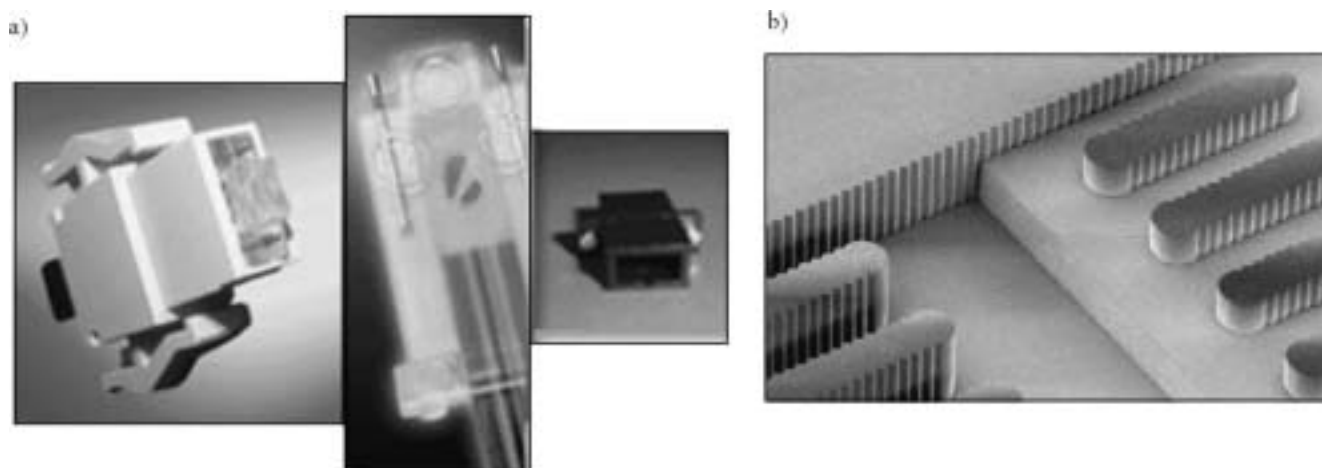
Rys. 2. Wymiary ścieżki informacyjnej na płycie kompaktowej [10]

Fig. 2. Dimensions of information path on compact disc [10]

Mikrowtryskiwanie stosuje się także do wytwarzania czujników ciśnienia i przepływu, siatkowych rusztowań chipów oraz pokryć pomp [5]. Dobrym przykładem osiągnięć w technologii mikrowtryskiwania jest produkcja dwuczęściowych złączek do wielożyłowych kabli światłowodowych „RibCon®” [11, 12] (rys. 3a). Jedną część złączki z PMMA służy do poprawnego ułożenia przewodów, a druga do ich zamocowania i ochrony [12]. Rysunek 3b przedstawia fotografię SEM dolnej części obudowy złączki umożliwiającej prawidłowe poprowadzenie włókien światłowodowych. Środki włókien oraz przewodnice ułożone są liniowo, maksymalna średnica włókien możliwych do zastosowania przy użyciu omawianych złączek „RibCon®” wynosi 250 mikrometrów, a elastyczne pofałdowania na bocznych ściankach elementów ustalających pozwalają na użycie złączki do włókien różnej średnicy. Odległości pomiędzy tymi elementami wynoszą 140 mikrometrów w ostatnim rzędzie i są sukcesywnie redukowane do 123 mikrometrów w rzędzie pierwszym, znajdującym się na czole złączki, w miejscu łączenia z inną złączką [12].

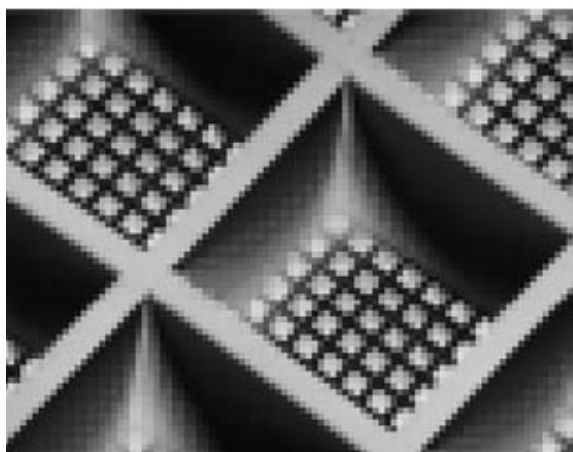
Wkładki formujące do wytwarzania złączek wykonywane są w procesie łączącym obróbkę mikromechaniczną z technologią LIGA (niem. *Lithografie, Galvanoformung, Abformung* — Litografia, Formowanie galwaniczne, Odwzorowanie) [6, 13, 14].

Technologię mikrowtryskiwania stosuje się także w produkcji z poli(metakrylanu metylu) lub z poliwęglanów [15] pojemników na komórki, stosowanych w hodowlach *in vitro* (rys. 4). Pojemniki te ułatwiają orientację komórek w hodowanych tkankach, stanowiąc przy tym podłoże, do którego przylegają rosnące tkanki. Pojemniki są układem 900 mikropojemników ułożonych na obszarze 1 cm^2 . Każdy mikropojemnik ma porowate,



Rys. 3. a) Złączka do wielożyłowych kabli światłowodowych „RibCon®” [11], b) Fotografia SEM dolnej części obudowy (umożliwiającej prawidłowe ułożenie przewodów) złączki „RibCon®” do wielożyłowych kabli światłowodowych [11] (fotografia uzyskana dzięki uprzejmości Spinner GmbH)

Fig. 3. a) RibCon® connector for multicore light cables, b) SEM image of the lower part of RibCon® connector body for multicore light cables (making possible the proper arrangement of conduits) [11] (courtesy of Spinner GmbH)



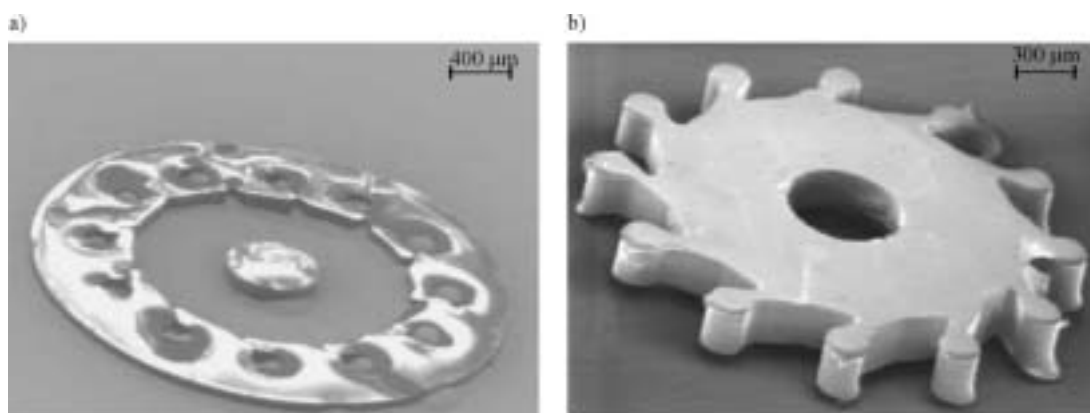
Rys. 4. Trójwymiarowe pojemniki na komórki o wymiarach $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ mm z perforowanym dnem wykonane z PMMA lub PC [15] (fotografia uzyskana dzięki uprzejmości Karlsruhe Research Center, Germany)

Fig. 4. Three-dimensional micro-containers for cells' cultivation, of dimensions: $0.3 \times 0.3 \times 0.3$ mm with perforated bottom, made of PMMA or PC [15] (courtesy of Karlsruhe Research Center, Germany)



umożliwiający dopływ tlenu dno, przez które rosnące tkanki mogą być odżywane.

Mikrowtryskiwanie może służyć także do wytwarzania soczewek lub ich układów z poli(metakrylanu metylu), polistyrenu bądź poliwęglanu. Soczewki takie otrzymuje się przy użyciu niklowych mikroform ukształtowanych w procesie LIGA. Mikrosoczewki oraz ich układy charakteryzują się bardzo małą chropowatością po-



Rys. 5. Element mikroturbiny: a) — warstwa niklu odwzorowująca strukturę polimerową (PA-12 C + PA) — etap pośredni w otrzymywaniu gotowego mikrodetalu niklowego przedstawionego na (b) [17] (fotografia uzyskana dzięki uprzejmości Karlsruhe Research Center, Germany)

Fig. 5. Microturbine element: a) — nickel layer transforming the polymer structure (PA-12 C + PA) — intermediate stage in the preparation of nickel micro-part presented in (b) [17] (courtesy of Karlsruhe Research Center, Germany)

wierzchni ($R_a = 1,606$ nm) [16] i znajdują zastosowanie m.in. w mikrooptyce, w przemyśle komputerowym (optyczne nośniki danych), a także w medycynie.

Technologia mikrowtryskiwania jest wykorzystywana również w produkcji metalowych elementów charakteryzujących się dużym stosunkiem wysokości do szerokości i dużą wytrzymałością mechaniczną. Wytwarzanie takich metalowych mikrodetali to połączenie otrzymywania elementów z tworzyw sztucznych (tracone formy) z procesami galwanizacji, podczas których w metalu powiela się otrzymywane na drodze mikrowtryskiwania detale polimerowe (rys. 5). Aby można było w procesie galwanizacji pokryć tworzywo metalem, polimer musi przewodzić prąd. W tym celu stosuje się polimery przewodzące lub technikę napyłania jonowego. Do galwanizacji można też wykorzystywać metalizację bezprądową [17, 18]. Jednak stosunek wysokości do szerokości detali otrzymywanych za pomocą galwanizacji z zastosowaniem polimerowych traconych form jest ograniczony do 5, ponieważ w przypadku małych elementów polimerowych osad elektrolityczny szybko pokrywa otwory we wzorniku i formowany kształt nie odwzorowuje się całkowicie; powoduje to obecność dziur w wyrobie. Efekt taki najczęściej występuje na krawędziach z powodu większej lokalnej gęstości pola elektrostatycznego w tych miejscach. Ponadto, nanoszenie metalu w wąskich gniazdach jest ograniczone, gdyż istniejąca w nich koncentracja jonów metali zostaje wówczas zdeterminowana wyłącznie procesami dyfuzji, podczas, gdy stężenie jonów na powierzchni jest zazwyczaj stabilizowane wymianą konwekcyjną (swobodny ruch jonów metalu) [13].

Kształtowanie galwaniczne elementów odznaczających się dużym stosunkiem wysokości do szerokości musi być wymuszane w dolnej części takiego detalu, natomiast powstrzymywane w górnej. W związku z tym przyrost grubości nakładanej galwanicznie warstwy metalu następuje tylko w jednym kierunku. Oznacza to, że proces produkcji polimerowych traconych form musi składać się z dwóch etapów — na pierwszym kształtuje się dobrze przewodzący materiał, a na drugim nanosi nań warstwę z materiału nieprzewodzącego. Umożliwia to zastosowanie mikrowtryskiwania dwukomponentowego, gdzie najpierw do formy wtryskuje się termoplastyczny polimer mający zdolność przewodzenia prądu (napelniany sadzą lub włóknami węglowymi), a następnie polimer izolujący. Uzyskany dzięki temu gradient

przewodności umożliwi kontrolę procesu galwanizacji [17].

Podsumowując, można zatem stwierdzić, że omówione w niniejszym artykule metody mikrowtryskiwania pozwalają na tanią seryjną produkcję elementów z materiałów polimerowych, wykorzystującą wkładki formujące otrzymywane metodą LIGA, a także na uzyskiwanie mikrodetali z metali i ich stopów.

LITERATURA

1. Abraham M., Ehrfeld W., Hessel V., Kamper K. P., Lacher M., Picard A.: *Microelectronic Eng.* 1998, **41/42**, 47.
2. Bociąga E.: *Polimery* 2005, **50**, 10.
3. Hecke M., Schomburg W. S.: *Micromech. Microeng.* 2004, **14**, R1.
4. Piotter V., Mueller K., Plewa K., Ruprecht R., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 387.
5. Ruprecht R., Gietzelt T., Müller K., Piotter V., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 351.
6. Piotter V., Hanemann T., Ruprecht R., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 1997, **3**, 129.
7. Ruprecht R., Hanemann T., Piotter V., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 1998, **5**, 44.
8. Piotter V., Holstein N., Plewa K., Ruprecht R., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 2004, **10**, 547.
9. Schiff H., David C., Gabriel M., Gobrecht J., Heyderman L. J., Kaiser W., Köppel S., Scandella L.: *Microelectronic Eng.* 2000, **53**, 171.
10. Rymuza Z.: *Polimery* 1994, **39**, 354.
11. www.spinner.de
12. Wallrabe U., Dittrich H., Friedsam G., Hanemann Th., Mohr J., Müller K., Piotter V., Ruther P., Schaller Th., Zissler W.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 83.
13. Ehrfeld W.: *Electrochim. Acta* 2003, **48**, 2857.
14. Malek Ch. K., Saile V.: *Microelectronics J.* 2004, **35**, 131.
15. Piotter V., Hanemann T., Ruprecht R., Hausselt J.: „Microinjection moulding of medical device components” w *Business Briefing: „Medical Device Manufacturing and Technology, Materials/Biomaterials Plastics”* 2002, str. 63—66.
16. Lee B.-K., Kim D. S., Kwon T. H.: *Microsystem Techn.* 2004, **10**, 531.
17. Holstein N., Schanz G., Konys J., Piotter V., Ruprecht R.: *Microsystem Techn.* 2005, **11**, 179.
18. Thies A., Schanz G., Walch E., Konys J.: *Electrochim. Acta* 1997, **42**, 3033.

Otrzymano 16 I 2006 r.