

ALEKSANDRA BRZOSTEK, JACEK W. KACZMAR^{*)}

Politechnika Wrocławska
 Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji
 Laboratorium Tworzyw Sztucznych
 ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław

Mikrowtryskiwanie tworzyw polimerowych — technologia, narzędzia i maszyny

Streszczenie — Scharakteryzowano dwie podstawowe metody wytwarzania mikrouządzeń — wgniatanie na gorąco i mikrowtryskiwanie, uwypuklając przy tym ten drugi sposób. Omówiono etapy procesu technologicznego oraz przebieg mikrowtryskiwania tworzyw polimerowych. Przedstawiono budowę narzędzi formujących oraz stawiane im wymagania procesowe. Opisano techniki wytwarzania wkładek formujących, takie jak obróbka mikromechaniczna, drążenie elektroerozyjne, a w szczególności proces LIGA. Wskazano na różnice istniejące pomiędzy mikrowtryskiwaniem a konwencjonalnym formowaniem wtryskowym.

Słowa kluczowe: mikrowtryskiwanie, tworzywa polimerowe, wkładki formujące.

MICRO INJECTION MOLDING OF POLYMERS — TECHNOLOGY, TOOLS AND MACHINES

Summary — Two basic methods of micro-devices' manufacturing: hot embossing and micro injection molding were characterized, the latter method was stressed. The stages of technological process and the course of micro injection molding of polymers were described. The constructions of forming tools and the processing requirements were presented. The techniques of fabrication of mold inserts, such as micromachining, electro-erosion machining and especially LIGA process (Fig. 2), were described. The differences between micro injection molding and conventional injection molding were pointed.

Key words: micro injection molding, polymers, mold inserts.

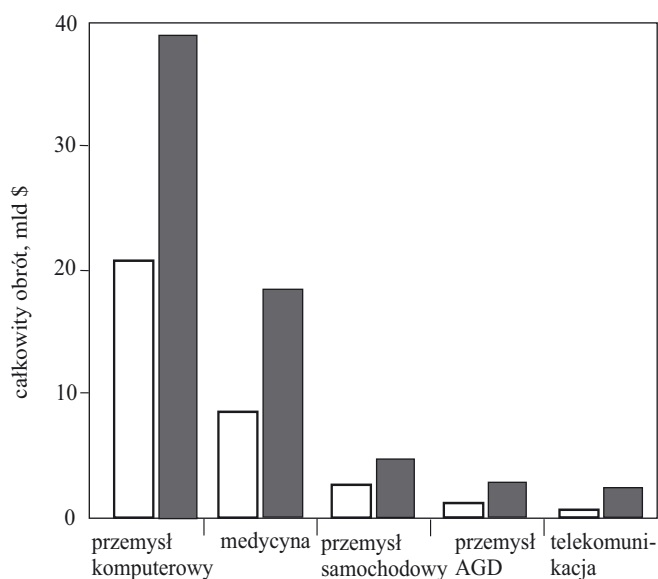
W ciągu ostatnich pięciu lat wartość światowego rynku mikrosystemów (należących do grupy produktów mikrotechnologicznych) wzrosła z 30 mld USD w 2000 r. do ok. 68 mld USD w roku 2005 [1]. Rysunek 1 przedstawia te dane w rozbiściu na główne obszary zastosowań. Dla porównania — światowy rynek mikroelektroniki wyceniono w 2000 r. na 204 mld USD.

Wdrażanie mikrosystemów do rozwiązań przemysłowych jest wolniejsze niż pierwotnie przewidywano, czego powodem są skomplikowane, a zatem kosztowne technologie produkcji [1]. Dodatkowym czynnikiem ograniczającym rozwój w tej dziedzinie jest także mała elastyczność metod wytwarzania mikrouządzeń. Tak więc wdrażanie nowych produkowanych na niewielką skalę mikrostruktur nieelektronicznych pociąga za sobą konieczność ponoszenia dużych nakładów inwestycyjnych [1].

METODY WYTWARZANIA MIKROURZĄDZEŃ

Mikroformowanie polimerów termoplastycznych jest jedną z najbardziej obiecujących technik produkcji mikrodetali i mikrouządzeń nieelektronicznych. Kosz-

ty wytwarzania zależą od złożoności mikroelementów, ponieważ w większości przypadków zużycie materia-



Rys. 1. Wartości rynku mikrosystemów nieelektronicznych w najważniejszych obszarach ich zastosowań [1]: □ — 2000 r., ■ — 2005 r.

Fig. 1. Values of non-electronic microsystems' market in the major fields of their applications [1]; □ — 2000, ■ — 2005

^{*)} jacek.kaczmar@pwr.wroc.pl

łów (a więc i ich koszt) są niewielkie. Z tego powodu nawet te elementy, które otrzymuje się metodą mikroformowania z najdroższych materiałów o specyficznych właściwościach znajdują zastosowanie w rozwiązaniach wymagających precyzyjnych, a zarazem tanich detali.

Do mikroformowania tworzyw polimerowych najczęściej stosuje się wygniatanie na gorąco (ang. *hot embossing*) oraz wtryskiwanie [2, 3].

Proces wygniatania na gorąco polega na wytłaczaniu wzoru w prefabrykowanym materiale polimerowym (najczęściej w postaci płyt) zmiekczonego w wyniku podgrzania go do temperatury wyższej niż temperatura zeszklenia. Przeciwnie niż we wtryskiwaniu, występują tu małe przepływy materiału, które ograniczają naprężenia wewnętrzne. Może to powodować powstawanie np. obszarów intensywnego rozpraszania fal świetlnych, co jest niekorzystne w niektórych zastosowaniach optycznych [4]. Ponadto, w procesie tym tworzywo może być podgrzane do temperatury niższej niż w przypadku wtryskiwania, gdyż masa polimerowa nie musi pokonywać długiej drogi zanim wypełni formę. Tym samym redukcji ulega zarówno skurcz podczas chłodzenia, jak i siły tarcia działające na wypraskę podczas usuwania jej z formy wtryskowej [2]. Dzięki temu, wygniatanie, w porównaniu z mikrowtryskiwaniem, umożliwia wykonywanie wytworów o bardziej złożonym kształcie i o większym stosunku wysokości do szerokości [2, 4].

Metodą tą otrzymuje się mikroreaktory [5] — urządzenia do przeprowadzania reakcji równoległych stosowane m.in. w systemach do kompleksowej analizy (ang. *micrototal analysis systems*, μ TAS) [6]. Etapy takiej analizy mogą obejmować wyodrębnianie składnika wykrywanego lub oznaczanego, zmianę stężenia, znakowanie izotopami promieniotwórczymi bądź inkubację. Przykładem są tu mikroreaktory do detekcji i rozdzielania DNA [6, 7] oraz elementy i urządzenia stosowane do mikroprzepływów [6].

Wtryskiwanie mikroelementów stanowi podstawową, korzystną ekonomicznie technologię produkcji średnich oraz dużych serii mikrokształtek [8, 9]. Na drodze mikrowtryskiwania można otrzymywać detale ze ściankami grubości $\geq 10 \mu\text{m}$, z elementami budowy o wymiarach $0,2 \mu\text{m}$ i chropowatością powierzchni nieprzekraczającą $0,05 \mu\text{m}$ [10, 11]. Jako przykłady tego rodzaju mikrodetali można wymienić m.in. złączki do wielożyłowych kabli światłowodowych „RibCon®” [12], mikrosoczewki i ich układy [13] bądź pojemniki na komórki pochodzenia biologicznego [14]. Bardziej szczegółowo różnorodne zastosowania wtryskiwanych mikroelementów opisaliśmy w naszej poprzedniej publikacji [15].

ETAPY TECHNOLOGICZNEGO PROCESU MIKROWTRYSKIWANIA

Na pierwszym etapie procesu wytwarzania mikroelementów metodą mikrowtryskiwania określa się wartoś-

ci parametrów wymiarowych wyprasek (maksymalny stosunek wysokości do grubości ścianek oraz wymiary minimalne) wpływających na ich wytrzymałość [16]. Dokonuje się także wyboru sposobu otrzymywania formy i związanych z nią czynników technologicznych, takich jak chropowatość powierzchni bądź kąt nachylenia ścianek.

Następnym etapem jest wykonanie formy oraz zrealizowanie właściwego procesu formowania mikrodetalu. Uzyskane mikrodetale poddaje się obróbce wykańczającej, prowadzącej do gotowego produktu. Stosuje się przy tym następujące rodzaje takiej obróbki [16]:

- wykonywanie otworów (mechanicznie lub za pomocą lasera),
- metalizacja powierzchni,
- nakładanie warstwy innego polimeru,
- odcinanie wlewków,
- funkcjonalizacja (np. aktywacja) powierzchni,
- łączenie elementów.

PRZEBIEG MIKROWTRYSKIWANIA

Proces mikrowtryskiwania obejmuje następujące operacje [2, 9]:

- zamknięcie formy zaopatrzonej we wkładkę z gniazdami formującymi, usunięcie powietrza, podgrzanie formy do temperatury wyższej niż temperatura zeszklenia polimeru;
- wtrysk uplastycznionego polimeru do formy;
- ochłodzenie wyrobu do temperatury niższej niż temperatura zeszklenia tworzywa i usunięcie wypraski z formy.

Prowadzenie procesu w warunkach tradycyjnego wtryskiwania, tzn. w stosunkowo niskiej temperaturze formy i pod zwykle stosowanym ciśnieniem wtrysku, prowadzi do niecałkowitego wypełnienia gniazd formujących stosowanych w mikrowtryskiwaniu [9]. W większości przypadków w metodzie tej temperatura ciekłego tworzywa polimerowego oraz dyszy wtryskowej jest zbliżona do maksymalnej temperatury przetwórstwa danego materiału [9].

W mikrowtryskiwaniu czasy cyklu są dłuższe niż we wtryskiwaniu konwencjonalnym. Ich wartości przedłużają się ze wzrostem lepkości ciekłego tworzywa oraz stosunkiem wysokości do grubości ścianek wypraski i osiągają nawet wartość 9 minut [9]. Najdłużej (niekiedy ponad 90 % czasu całkowitego) trwają procesy związane z ogrzewaniem i chłodzeniem formy (tzw. zmienne termostatowanie, ang. *variotherm process*) [9].

NARZĘDZIE FORMUJĄCE

Stosowane w mikrowtryskiwaniu narzędzie formujące składa się z wkładki z gniazdami formującymi oraz z elementów spełniających funkcje zamknięcia formy i usuwania z niej uformowanego detalu. Ponadto musi ono być zaopatrzone w części umożliwiające odpowie-

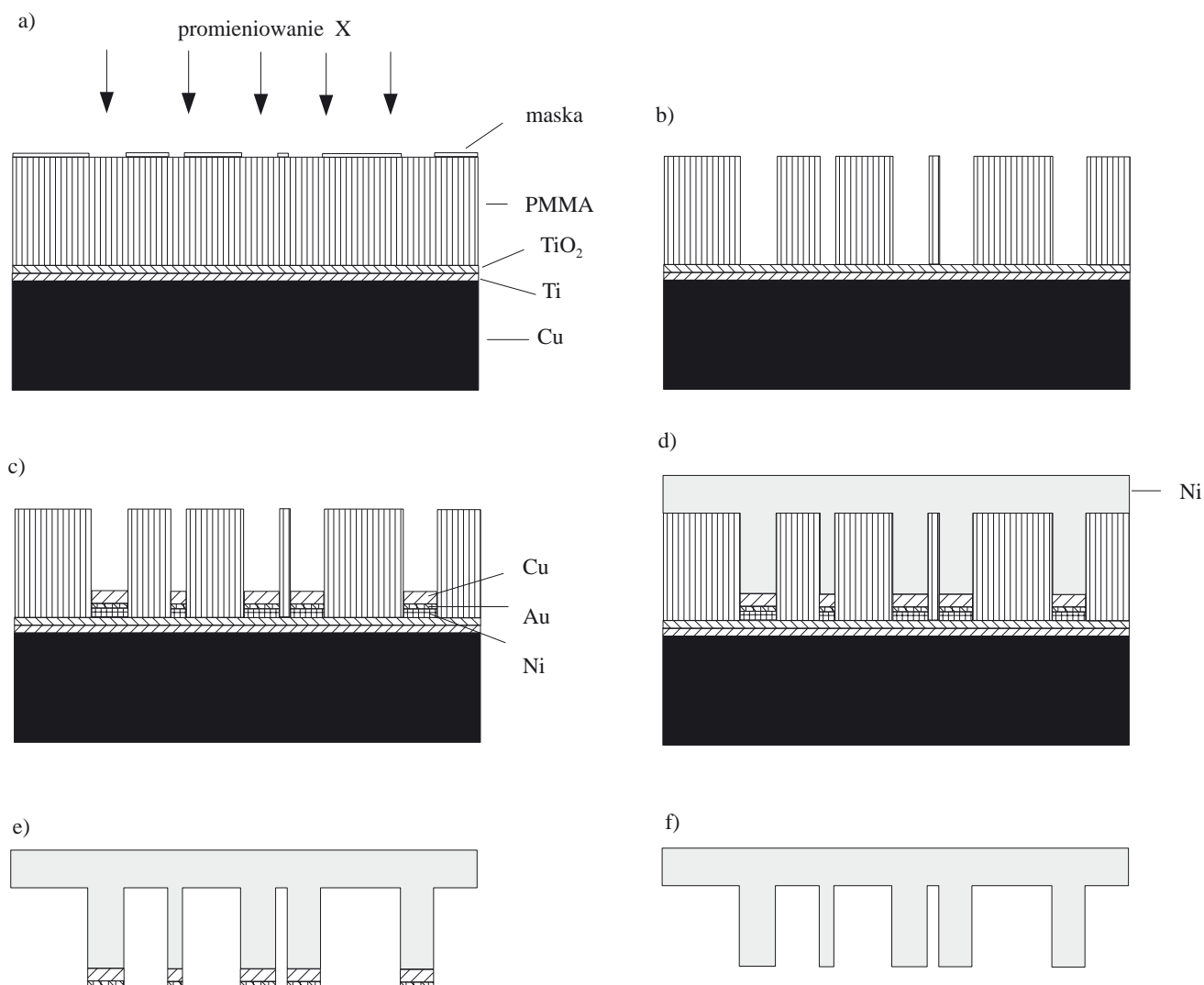
trzenie gniazd formujących na początku formowania oraz zapewniające zmienne termostatowanie [2]. Wyewakuowanie powietrza z narzędzia jest konieczne w celu prawidłowego przeprowadzenia procesu mikro-wtryskiwania. W przeciwnym bowiem przypadku ciekłe tworzywo polimerowe przemieszcza się wewnątrz gniazd nieodpowietrzonej formy powodując wzrost ciśnienia powietrza, co prowadzi do jego ogrzania do wysokiej temperatury i, w konsekwencji, do spalania tworzywa.

Odpowietrzona forma musi być podgrzana do temperatury wyższej niż temperatura zeszczenia w przypadku wtryskiwania polimerów amorficznych [np. poli(metakrylanu metylu) lub poliwęglanu] bądź też powyżej temperatury topnienia w odniesieniu do polimerów semikrystalicznych [np. poli(tlenku fenylenu) albo

poliamidu], tak aby niewielka ilość przetwarzanego materiału nie ulegała natychmiastowemu zestaleniu w kontakcie z dużą masą wkładki formującej. Aby usunąć wypraskę z formy, wkładkę formującą należy ochłodzić do temperatury, której wartość zależy od rodzaju materiału i właściwości uzyskiwanego z niego detalu [2, 9, 17].

Wkładki formujące winny charakteryzować się następującymi cechami [2]:

- gładką powierzchnią wewnętrzną zmniejszającą tarcie podczas usuwania detalu z formy,
- względnie małym kątem nachylenia ścianek,
- stabilnością kształtu i wymiarów gniazd podczas wielu cykli wtryskiwania (co pociąga za sobą konieczność stosowania materiałów konstrukcyjnych o określonej plastyczności i twardości).



Rys. 2. Etapy wytwarzania wkładki formującej z zastosowaniem technologii LIGA (por. tekst) [21]: a) działanie promieniami Rentgena na poli(metakrylan metylu) (PMMA), b) „wywołany” fotorezyst umieszczony na bazowej płycie metalowej, c) naniesione warstwy pośrednie, d) nałożona warstwa niklu stanowiąca właściwą wkładkę formującą, e) rozdzielona od miedzi warstwa niklu (rozdzielenie następuje na granicy faz Au/Ni w warstwie pośredniej), f) gotowa wkładka formująca

Fig. 2. Steps of the fabrication of mold insert in LIGA technology (see text) [21]: a) X-ray irradiation of poly(methyl methacrylate) (PMMA), b) developed photoresist on the base metal plate, c) intermediate layers put on, d) nickel layer put on, constituting the actual insert, e) separated nickel and copper layers (between gold and nickel in the intermediate layer), f) ready mold insert

Aby uzyskać takie właściwości, projekt wypraski i formy a także wykonawstwo formy muszą być zgodne z wymogami procesu mikrowtryskiwania.

Mikroformy metalowe wytwarza się najczęściej w wyniku kopiowania w metalu wcześniej otrzymanego mikrodetalu [18]. Natomiast kształtowanie wkładek formujących odbywa się na drodze obróbki mikromechanicznej bądź laserowej, drażenia elektroerozyjnego (EDM — *electric discharge machining*) w procesach litograficznych z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego lub UV a także metodami galwanotechnicznymi [2].

Metody obróbki mikromechanicznej są zbliżone do rozpowszechnionych technik obróbki ubytkowej. Mianowicie, wkładki formujące w mikrowtryskiwaniu wytwarza się poprzez toczenie, wiercenie i frezowanie za pomocą obrabiarek sterowanych numerycznie. Najładniejsze ścianki gniazd uzyskuje się przy użyciu narzędzi diamentowych, nie mogą być one jednak stosowane do wykonywania form ze stali (ze względu na tendencję węgla w postaci diamentu do migracji w głąb stali i zanieczyszczenia tego materiału), która jest najbardziej rozpowszechnionym materiałem konstrukcyjnym. W porównaniu z procesami litograficznymi, na drodze obróbki mikromechanicznej, np. wykorzystując narzędzia frezujące o żądanym przekroju, łatwiej jest otrzymać wkładki formujące nawet z powierzchniami charakteryzującymi się dużymi krzywiznami [2].

Drażenie elektroerozyjne pozwala także na uzyskanie pożądaných kształtów i wymiarów z dokładnością rzędu mikrometrów. Do tego celu stosuje się druty średnicy 30 μm lub elektrody wykonane metodą galwanotechniczną. Wykorzystując drażenie erozyjne można „przenieść” kształt wzorcowych mikrodetali z niklu lub innych metali na stalowe wkładki formujące. Wadą tej techniki w porównaniu z frezowaniem jest większa chropowatość ścianek formy [2].

Obecnie dużą rolę w produkcji mikrodetali z materiałów innych niż krzem odgrywa technologia LIGA [niem.: *Lithographie* (litografia), *Galvanoformung* (kształtowanie galwaniczne), *Abformung* (formowanie)] z zastosowaniem promieni Rentgena [19, 20]. Otrzymywanie wkładek formujących w procesie LIGA stwarza większe niż dotychczasowe możliwości w zakresie projektowania detali i uzyskiwania lepszych jakościowo powierzchni, wymaganych np. w mikrooptyce. Metodą tą wytwarza się formy o małej chropowatości ścianek formy ($R_z = 0,05 \mu\text{m}$ i $R_a = 0,02 \mu\text{m}$), zatem niewymagające wyrzutników (co zapobiega deformacji wyrobu) [17]. Materiałem, z którego najczęściej wykonuje się wstawki formujące jest nikiel [21], ponieważ jakość powierzchni wstawek z tego metalu jest dobra i nie powoduje zakleszczeń podczas usuwania detalu z formy.

Pierwszym etapem otrzymywania wstawek formujących (rys. 2 [21]) z zastosowaniem technologii LIGA jest ich odwzorowanie litograficzne — za pomocą promieniowania rentgenowskiego — na warstwie poli(meta-

krylanu metylu) (PMMA) [22] umieszczonej na rdzeniu zbudowanym z Cu/Ti/TiO₂. Pochodzące z synchrotronu promieniowanie rentgenowskie jest częściowo przepuszczane lub blokowane przez maskujący absorber (złoto) z ukształtowaną strukturą wkładki formującej (rys. 2a). Promienie penetrują warstwę PMMA powodując rozpad łańcuchów polimerowych w naświetlanych obszarach [23]. Fotorezyst (naświetlany PMMA) jest następnie „wywoływany” przy użyciu organicznego rozpuszczalnika, który rozpuszczając obszary o mniejszym ciężarze cząsteczkowym [19] powoduje powstawanie wolnych przestrzeni — aż do metalowego rdzenia (jeśli dostarczona energia była wystarczająca do całkowitego naświetlenia fotorezystu) [24] (rys. 2b).

Kolejny etap omawianego procesu stanowi nałożenie na ukształtowaną warstwę PMMA tzw. warstw pośrednich (ang. *intermediate layers*) (rys. 2c). Nakładane są one w kolejności Ni/Au/Cu i grubości odpowiednio 2, 1 oraz 5 μm w otworach tworzących się w żywicy podczas procesu litografii. Warstwy te pomagają zmniejszyć liczbę defektów, wpływają więc na jakość powierzchni otrzymywanej niklowej wstawki formującej. Miedź w tym układzie działa separująco, ponieważ jednak wykazuje ona zbyt słabą adhezję do niklu, niezbędne jest spojenie tych dwóch warstw złotem.

Następnym etapem procesu jest naniesienie na rdzeń pokryty żywicą i warstwami pośrednimi powłoki z niklu grubości ok. 5 μm , stanowiącej właściwą wstawkę formującą (rys. 2d). Grubość ta zapewnia wprawdzie optymalną wytrzymałość mechaniczną kształtowanej wstawki, jednak jej formowanie (osadzanie galwaniczne) trwa aż 2—3 tygodnie, w zależności od kształtu. Proces musi być prowadzony w stabilnych warunkach temperatury, wartości pH (wzrost pH może powodować powstawanie wodorotlenku niklu, który inhibituje późniejsze osadzanie się czystego metalu niklu i pogarsza właściwości mechaniczne wstawki formującej) oraz stężenia elektrolitu. Po uzyskaniu żądanej grubości warstwy niklu, dalsze jego osadzanie zostaje zatrzymane a cały układ jest poddawany obróbce mechanicznej w celu nadania odpowiednich wymiarów zewnętrznych. Kolejnym krokiem jest mechaniczne oddzielenie uzyskanej wstawki niklowej od miedzi. Rozdziel ten następuje najczęściej pomiędzy złotem i niklem w warstwie pośredniej (rys. 2e). Miedź i złoto pokrywające utworzoną wstawkę niklową usuwa się na drodze wytrawiania miedzi. Ostatnim etapem jest oczyszczanie powierzchni niklowej wstawki formującej z pozostałości PMMA (rys. 2f).

WTRYSKARKI

Jednym z ograniczeń we wdrażaniu technologii mikrowtryskiwania jest mała liczba wytwórców oferujących odpowiednie wtryskarki. Do mikrowtryskiwania stosuje się więc obecnie tradycyjne maszyny z przystosowanymi dyszami o małych średnicach, umożliwiając

cymi wprowadzenie do formy niewielkiej ilości stopionego polimeru. Niestety, powoduje to powstawanie dużych wlewków, zatem znacznych strat materiału, często dochodzących do 90 %. Przedłuża się także czas chłodzenia, a w konsekwencji i czas pełnego cyklu, co dodatkowo zwiększa koszt wyrobu [8]. Wtryskarki wykorzystywane do mikrowtryskiwania muszą być zaopatrzone w odpowiednie urządzenia peryferyjne umożliwiające usunięcie powietrza z gniazd formujących oraz utrzymanie odpowiedniej temperatury formy [9].

Typ maszyny przeznaczonej do mikrowtryskiwania produkuje firma Arburg; jest to „Allrounder 170 U” o sile zamknięcia formy 125 kN bądź 150 kN oraz minimalnej masie wtryskiwanego tworzywa wynoszącej setne części grama [26]. Wtryskarki do mikrowtryskiwania mają w swojej ofercie także firmy Battenfeld i Boy.

PODSUMOWANIE

Wzrost zapotrzebowania na mikrodetale powoduje konieczność opracowania prostych i tanich metod ich wytwarzania. Formowanie wtryskowe jest właśnie metodą, którą stosunkowo łatwo dostosować do wymagań, jakie stawia produkcja detali o wymiarach mikrometrycznych. Zmienne termostatowanie oraz usuwanie powietrza z gniazd formujących umożliwia wytwarzanie mikrodetali z materiałów polimerowych. W związku z rozpowszechnieniem mikrowtryskiwania niezbędne stało się także rozwinięcie odpowiednich metod otrzymywania mikrowkładek formujących, na przykład mikroobróbki mechanicznej lub drażenia elektroerozyjnego. Coraz większego znaczenia nabiera produkcja wkładek formujących z zastosowaniem procesu LIGA; umożliwia ono wytwarzanie trójwymiarowych wkładek formujących o dużej gładkości ścianek niewymagających wyrzutników deformujących mikrowypraski.

Obecnie na rynku pojawia się też coraz szersza oferta wtryskarek charakteryzujących się małymi objętościami wtrysku oraz niewielkimi siłami zamknięcia formy.

LITERATURA

- Pfeifer T., Driessen S., Dussler G.: *Microsystem Techn.* 2004, **10**, 211.
- Heckele M., Schomburg W. S.: *J. Micromech. Microeng.* 2004, **14**, R1.
- Bociąga E.: *Polimery* 2005, **50**, 10.
- Heckele M., Bacher W., Muller K. D.: *Microsystem Techn.* 1998, **4**, 122.
- Jensen K. F.: *Chem. Eng. Sci.* 2001, **56**, 293.
- Goretty Alonso-Amigo M.: *J. Assoc. Labor. Automat.* 2000, **5**, 96.
- Lee G.-B., Chen S.-H., Huang G.-R., Sung W.-C., Lin Y.-H.: *Sensors and Actuators B* 2001, **75**, 142.
- Michaeli W., Spennemann A., Gärtner R.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 55.
- Piotter V., Hanemann T., Ruprecht R., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 1997, **3**, 129.
- Piotter V., Bauer W., Benzler T., Emde A.: *Microsystem Techn.* 2001, **7**, 99.
- Piotter V., Mueller K., Plewa K., Ruprecht R., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 387.
- 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.
- Lee B.-K., Kim D. S., Kwon T. H.: *Microsystem Techn.* 2004, **10**, 531.
- Piotter V., Hanemann T., Ruprecht R., Hausselt J.: „Microinjection moulding of medical device components”, Business Briefing „Medical Device Manufacturing and Technology”, Materials/Biomaterials Plastics, 2002, str 63–66.
- Kaczmar J. W., Brzostek A.: *Polimery* 2007, **52**, nr 2.
- Rötting O., Röpke W., Becker H., Gärtner C.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 32.
- Ruprecht R., Gietzelt T., Müller K., Piotter V., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 2002, **8**, 351.
- Ruprecht R., Hanemann T., Piotter V., Hausselt J.: *Microsystem Techn.* 1998, **5**, 44.
- Kupka R. K., Bouamrane F., Cremers C., Megtert S.: *Appl. Surface Sci.* 2000, **164**, 97.
- Malek Ch. K., Saile V.: *Microelectronics J.* 2004, **35**, 131.
- Bacher W., Bade K., Matthis B., Saumer M., Schwarz R.: *Microsystem Techn.* 1998, **4**, 117.
- Hormes J., Gottert J., Lian K., Desta Y., Jian L.: *Nucl. Instr. Meth. Physics Res. B* 2003, **199**, 332.
- Henry A. C., McCarley R. L., Das S., Khan Malek C., Poche D. S.: *Microsystem Techn.* 1998, **4**, 104.
- <http://www.me.mtu.edu/~microweb/GRAPH/Intro/BASLITH.JPG>

Otrzymano 16 I 2006 r.