

Grzegorz Janowski

Charakterystyka mikroformowania wtryskowego. Formy wtryskowe, optymalizacja procesu, zastosowanie z wyszczególnieniem przemysłu samochodowego

JEL: L62, DOI: 10.24136/atest.2018.006

Data zgłoszenia: 25.10.2017. Data akceptacji: 15.01.2018

Stale rosnąca potrzeba miniaturyzacji detali z tworzyw sztucznych skłania do rozwoju technologii mikroformowania wtryskowego. Charakterystyczne cechy procesu, takie jak niskie koszty wytwarzania, krótki czas trwania procesu, zdolność wytwarzania detali o zróżnicowanych wymiarach oraz szeroka gama właściwości poszczególnych tworzyw sztucznych, pozwalają na masowe rozpowszechnienie tej technologii. Badania nad mikroformowaniem wtryskowym rozwijają się w bardzo szybkim tempie, co daje duże nadzieje na sprawne przezwycięzenie rzeczywistych ograniczeń tej technologii. Prognozuje to bardzo intensywny rozwój możliwości zastosowania detali mikroformowanych m.in. w przemyśle samochodowym, w tym w procesie produkcji autobusów. Konwencjonalny proces formowania wtryskowego zaprezentowano w artykule [23]; w tekście tym omówiono aspekty projektowania i możliwości wytwarzania form przeznaczonych do mikroformowania wtryskowego, przedstawiono kwestię optymalizacji procesu z uwzględnieniem głównych czynników wpływających na jakość wyprasek oraz omówiono główne obszary zastosowania mikrodetali, szczególnie w przemyśle samochodowym.

Słowa kluczowe: mikroformowanie, tworzywa termoplastyczne, mikrodetale, mikroformy, przemysł samochodowy.

Wprowadzenie

W części pierwszej artykułu [23] dokonano charakterystyki konwencjonalnego procesu formowania wtryskowego – omówiono istotę procesu, przedstawiono cykl formowania wtryskowego, zaprezentowano budowę konwencjonalnej wtryskarki ślimakowej. Następnie skupiono się na mikroformowaniu wtryskowym. Omówiono kwestię doboru materiału do procesu mikroformowania oraz rodzaj mikrodetali. Scharakteryzowano również wtryskarki przeznaczone do tego procesu. Niniejsze opracowanie stanowi logiczną kontynuację części pierwszej artykułu.

Formy wtryskowe przeznaczone do procesu mikroformowania

Konstrukcja i praca formy wtryskowej przeznaczonej do mikroformowania warunkują prawidłowy przebieg procesu. Gniazdo formujące oraz kanały przepływowe muszą charakteryzować się małą chropowatością powierzchni oraz małym kątem nachylenia ścianek. Ponadto kanały przepływowe powinny mieć dość duże gabaryty w celu uniknięcia degradacji materiału polimerowego. Z uwagi na dążenie do łatwego oddzielenia detalu od odpadu przewężki powinny charakteryzować się małym przekrojem poprzecznym, ale z drugiej strony na tyle dużym, aby nie doprowadzić do występowania zjawiska strumie-

niowego [6, 7]. Materiały przeznaczone na elementy formujące charakteryzować się powinny odpowiednim współczynnikiem przenikania ciepła, wytrzymałością i możliwością obróbki [7, 17, 31].

Należy zauważyć, że proces mikroformowania wtryskowego wymaga zmiennej temperatury formy w trakcie cyklu. W fazie wypełniania gniazda formującego temperatura formy musi być wysoka, aby gniazdo było w pełni wypełnione, z kolei w fazie usuwania wypraski detal musi mieć na tyle niską temperaturę, aby nie doprowadzić do jego odkształceń i uszkodzeń. Formy przeznaczone do mikroformowania przeważnie wyposażone są w 2 układy nagrzewania/chłodzenia – zewnętrzny (np. nagrzewanie indukcyjne, radiacyjne lub płomieniowe) oraz wewnętrzny (np. z medium wymiany ciepła w formie wody lub oleju). W początkowym etapie induktory są umieszczane między otwartymi połówkami formy, dzięki czemu następuje szybkie ich nagrzanie do żądanej temperatury. Następnie nagrzewanie zewnętrzne jest wyłączane i usuwane z użyciem robota. Po zamknięciu i wypełnieniu gniazda formującego zostaje uruchomione ochładzanie wewnętrzne, dzięki czemu następuje szybkie zestalanie tworzywa [6, 25, 26].

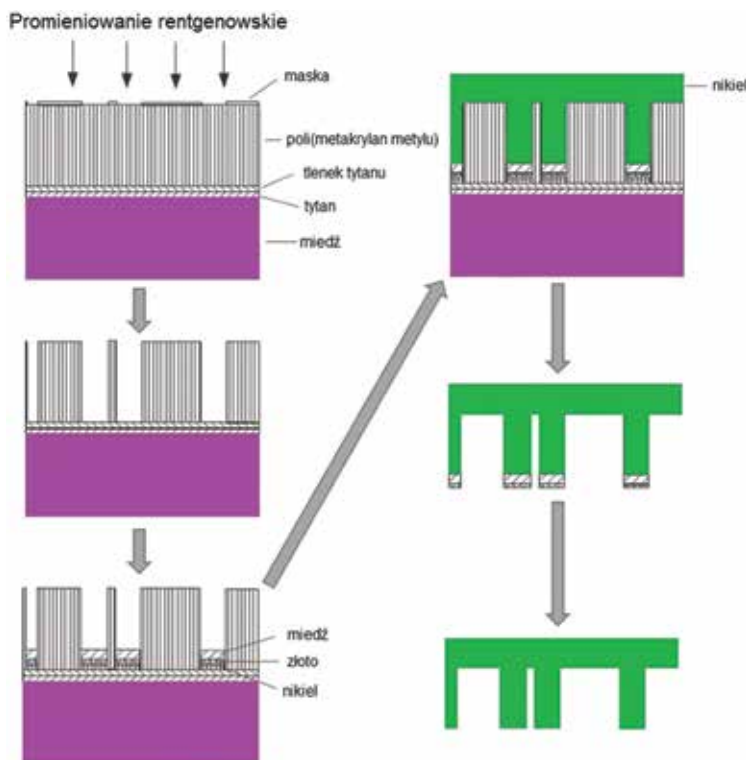
Zasadniczo wyróżnia się 4 metody wytwarzania form przeznaczonych do mikroformowania wtryskowego (rys. 1).

Podstawowa metoda obróbki mikroformy wtryskowej jest zbliżona do metody wytwarzania standardowej formy poprzez toczenie, wiercenie i frezowanie. Wadą metody może być tu mała dostępność mikronarzędzi, jak i ograniczona wytrzymałość obrabianego materiału. Mikrodrażenie elektroerozyjne daje możliwość uzyskania złożonych kształtów i wymiarów formy; ograniczeniami są mała wydajność oraz mała prędkość usuwania materiału. Obróbka galwaniczna pozwala z kolei na otrzymanie zaawansowanych form przeznaczonych do produkcji mikroukładów, lecz wadą tej metody jest mała dokładność wymiarowa [3, 6, 13, 18, 20, 34].

Bardzo istotną rolę w produkcji mikroform pełni technologia LIGA (akronim z języka niemieckiego: Lithografie, Galvanoformung, Abformung – litografia, obróbka galwaniczna, formowanie), szczególnie w przypadku uzyskania lepszych jakościowo powierzchni o bardzo małej chropowatości ścianek [6]. W tej technologii materiałem służącym do uzyskania wkładek formujących jest nikiel. Pierwszym etapem jest odwzorowanie litograficz-



Rys. 1. Przedstawienie głównych metod wytwarzania form wtryskowych przeznaczonych do procesu mikroformowania



Rys. 2. Zobrazowanie kolejnych etapów wytwarzania wkładki formującej z zastosowaniem technologii LIGA

ne poprzez promieniowanie rentgenowskie na warstwie PMMA, usytuowanej w rdzeniu złożonym ze stopu tlenku tytanu, miedzi oraz tytanu. Promieniowanie jest odpowiednio blokowane oraz przepuszczane przez absorber w postaci złota, co prowadzi do degradacji warstwy PMMA w odpowiednich miejscach. Następnie wykonywane jest nakładanie tzw. warstw pośrednich: niklu, złota i miedzi. Kolejnym etapem jest naniesienie warstwy niklu jako domyślnej powłoki wstawki formującej. Gotowa warstwa jest poddawana obróbce mechanicznej w celu nadania pożądanych wymiarów. W końcowym etapie następuje oddzielenie warstwy niklowej od miedzi, a następnie oczyszczenie wstawki formującej z pozostałości PMMA (rys. 2.) [4, 7, 20]. Metoda ta pozwala na otrzymanie pionowych ścianek w formach o gładkiej powierzchni, co pozwala często na wyeliminowanie wypychaczy. Upowszechnienie tej technologii jest jednak wciąż ograniczone z uwagi na wysokie koszty produkcji mikroformy tą metodą [6].

Optimalizacja procesu

Określenie najbardziej efektywnych warunków przeprowadzania mikroformowania wtryskowego było przedmiotem wielu badań. Główne parametry technologiczne wpływające na jakość procesu to:

- ♦ temperatura formy;
- ♦ temperatura uplastycznienia tworzywa;
- ♦ prędkość wtryskiwania;
- ♦ ciśnienie wtryskiwania;
- ♦ czas wtryskiwania;
- ♦ czas chłodzenia.

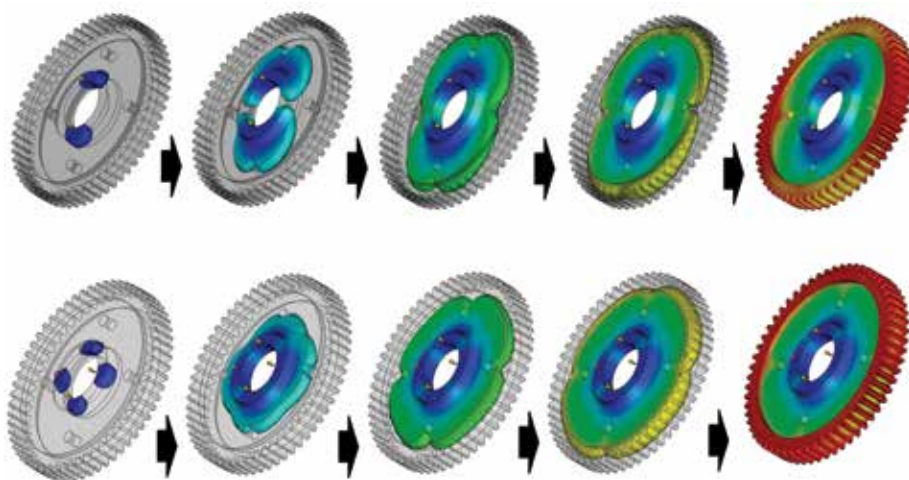
Otrzymanie prawidłowo wykonanej mikrowypraski w głównej mierze jest związane ze zdolnością wypełnienia mikroformy przez tworzywo. Najczęstsze problemy związane z tym zagadnieniem to: błędnie dobrana wielkość kanału wlewowego i doprowadzającego, niewłaściwie dobrane wymiary wypraski, tj. bez uwzględ-

nienia skurczu przetwórczego tworzywa, błędnie dobrana masa wtryskiwanego tworzywa, zbyt długi/krótki czas przepływu tworzywa w mikroformie, występowanie linii łączenia [1, 14, 27]. W literaturze znaleziono informacje dotyczące przeprowadzonych badań w celu określenia zależności wypełniania formy w stosunku do grubości wypraski. Wyniki jednoznacznie wskazały, że grubość ścianki wypraski jest jednym z decydujących parametrów wypełnienia gniazda formującego. Jest to związane ze zróżnicowanymi oporami przepływu uplastycznionego tworzywa [2]. Zauważalna jest również zależność między jakością wykonania powierzchni formującej a możliwością przepływu materiału polimerowego w procesie mikroformowania [9, 18, 17].

Wciąż istnieje wiele problematycznych kwestii związanych z procesem mikroformowania wtryskowego. Głównymi przedmiotami badań są [6, 7, 16, 21]:

- ♦ wizualizacja przepływu, a w szczególności obrazowania płynięcia tworzywa w ostatnich etapach wypełnienia gniazda formującego. Jedną z metod wizualizacji przepływu polega na tym, iż forma jest wypełniana różnymi objętościami tworzywa w celu oceny prawidłowej jakości przepływu. Jest to przydatne badanie, zważając na fakt, że większość defektów powstaje zazwyczaj w końcowym etapie wypełniania gniazda formującego;
- ♦ optymalizacja konstrukcji mikroform przed rozpoczęciem produkcji w celu uniknięcia wysokich kosztów związanych z korektą form powstałych. W tym przypadku podejście związane z przeprowadzeniem symulacji procesu jest jak najbardziej pożądane, gdyż niskim, wręcz znikomym, kosztem można zaprojektować kilka wariantów, przetestować, a następnie wybrać najlepsze rozwiązanie;
- ♦ symulacja warunków termicznych i reologicznych podczas napełniania gniazda formującego i chłodzenia. Uzyskane dane są bardzo użyteczne w trakcie szacowania czasu trwania cyklu oraz określenia obszarów krytycznych procesu;
- ♦ identyfikacja właściwości i defektów otrzymanych detali, np. skurczu, naprężeń, wypaczeń. W czasie procesu formowania materiał podlega zwiększonemu ciśnieniu i temperaturze, a następnie szybkiemu spadkowi temperatury i ciśnienia w formie, co prowadzi do krzepnięcia, wysokich naprężeń, złożonych orientacji cząsteczek, które definiują jakość detalu;
- ♦ optymalizacja związana z automatyzacją oraz zwiększeniem opłacalności procesu.

Proces mikroformowania wtryskowego – pomimo właściwych ustawień parametrów nastawnych – może nie przebiegać prawidłowo lub też otrzymane produkty mogą posiadać pewne defekty. Istotną kwestią jest zdiagnozowanie problemu i wybranie odpowiedniej metody rozwiązania [2, 10, 17, 18]. W celu uniknięcia problemów związanych z mikroformowaniem wtryskowym warto sięgnąć po wcześniejsze zasymulowanie procesu. Jest to użyteczna pomoc zarówno w przygotowaniu podzespołów formujących, jak też w projektowaniu całego procesu oraz w czasie jego optymalizacji. Większość programów jest w stanie zasymulować wypełnianie formy przez tworzywo z uwzględnieniem gabarytów konkretnego detalu (rys. 3), doboru odpowiedniego tworzywa itp. Poprzez symulację można przewidzieć problemy takie jak: linie łączenia, pułapki powietrzne, skurcz przetwórczy, deformacje i inne. W zaawansowanych symulacjach uwzględnia się charakterystyki cieplne i reologiczne odpowiedniego tworzywa, możliwość użycia napełniacza w matrycy polimerowej itp., co daje duże prawdopodobieństwo odzwierciedlenia realnego procesu [27].



Rys. 3. Przykład symulacji napełniania mikroformy w przypadku mikrowtryskiwania dwupunktowego (powyżej) oraz w przypadku mikrowtryskiwania czteropunktowego (poniżej)

Zastosowanie mikrodetali z wyszczególnieniem przemysłu samochodowego

W wyniku mikroformowania wtryskowego można uzyskać detale o ściankach większych lub równych $10\ \mu\text{m}$ i chropowatości powierzchni na poziomie $0,05\ \mu\text{m}$ [28]. Wyroby wytworzone w tym procesie mają szerokie zastosowanie. Mogą być produkowane jako mikroczęści mechaniczne, takie jak: mikronapędy, mikropompy, mikroprzekładnie [29]. Dobrym przykładem jest wytwarzanie siatkowych pokryć pomp, jak również czujników ciśnienia i przepływu [32, 33].

Zważając na właściwości optyczne niektórych tworzyw sztucznych, produkty powyższego procesu mogą mieć zastosowanie w mikrooptyce jako mikrosoczewki i mikrowłókna. Warto również wspomnieć o szerokim zastosowaniu mikroformowania wtryskowego w technologiach medycznych – powstają w ten sposób elementy aparatów słuchowych bądź mikrokomponenty medycyny inwazyjnej [1, 6, 7, 17, 26].

Mikroformowanie wtryskowe ma również istotne zastosowanie w produkcji wyprasek przeznaczonych stricte do przemysłu samochodowego [8, 15, 21]. Przede wszystkim tą technologią są produkowane detale, takie jak:

- ♦ klipsy i podkładki;
- ♦ elementy blokady drzwi;



Rys. 4. Przykłady detali wytworzonych w procesie mikroformowania wtryskowego jako elementy mające zastosowanie w przemyśle samochodowym

- ♦ koła zębate i elementy do modułów elektronicznych;
- ♦ wewnętrzne przyciski/przełączniki/siłowniki;
- ♦ detale występujące w obrębie silnika mikrowtryskiwane materiałami odpornymi na wysokie temperatury.

Przykładowe możliwości zastosowania mikrodetali z tworzyw sztucznych w zastosowaniu w przemyśle samochodowym przedstawiono na rys. 4.

Podsumowanie

Istotną metodą wytwarzania form wtryskowych przeznaczonych do procesu mikroformowania wtryskowego jest metoda LIGA. W wyniku tej technologii można otrzymać gniazda formujące o bardzo małej chropowatości ścianek, co jest istotnym aspektem rzutującym bezpośrednio na

jakość powierzchni zewnętrznych wyprasek.

Walory estetyczne, jak również właściwości otrzymanych mikrodetali, w dużej mierze zależą od odpowiednio zoptymalizowanych parametrów procesu. Głównymi problemami procesu mikrowtryskiwania są: widoczne linie łączenia, nieoszacowany skurcz wyprasek, niepełne wypełnienie gniazda formującego itp. W celu usunięcia ww. problemów należy skorzystać z możliwości przeprowadzenia analiz numerycznych procesu mikroformowania wtryskowego. Ponadto głównymi przedmiotami badań związanymi z przewidywaniem, kontrolą oraz optymalizacją procesu są m.in.: możliwości wizualizacji przepływu w formie wtryskowej, optymalizacja konstrukcji mikroformy, symulacja warunków termicznych i reologicznych oraz identyfikacja właściwości otrzymanych mikrodetali.

Z uwagi na możliwość uzyskania wyprasek o bardzo małych gabarytach mikroformowanie wtryskowe ma wartość podkreślenia zastosowanie między innymi w produkcji mikrowyprasek używanych w przemyśle samochodowym. Metodą tą wytwarza się mikrodetale będące elementami pojazdów samochodowych; są to np. klipsy i podkładki, elementy blokady drzwi, koła zębate i elementy modułów elektronicznych, wewnętrzne przyciski/przełączniki/siłowniki. Bez wątpienia spodziewać się można jeszcze większego rozwoju produkcji mikrodetali z tworzyw sztucznych w przemyśle samochodowym.

Bibliografia:

1. Attia U. M., Marson S., Alcock J. R., *Micro-injection moulding of polymer microfluidic devices*, „Microfluidics and Nanofluidics” 2009, No. 7 (1).
2. Attia U., Alcock M., Jeffrey R., *Optimising process conditions for multiple quality criteria in micro-injection moulding*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2010, No. 50.
3. Azuddin M., Choudhury I. A., Taha Z., *Development and performance evaluation of a low-cost custom-made vertical injection molding machine*, „Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering” 2015, No. 37.
4. Bacher W., Bade K., Matthis B., Saumer M., Schwarz R., *Fabrication of LIGA mold inserts*, „Microsystem Technology” 1998, No. 4.
5. Bellantone V., Surace R., Trotta G., Fassi I., *Replication capability of micro injection moulding process for polymeric parts manufacturing*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2013, No. 67.

6. Bociaga E., *Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
7. Brzostek A., Kaczmar J., *Mikrowtryskiwanie tworzyw polimerowych – technologia, narzędzia i maszyny*, „Polimery” 2007, nr 2.
8. Deng K., Felorzabih N., Winnik M. A., Jiang Z., Yin Z., Liu Y., Ryntz R. A., *Influence of position and composition on adhesion to injection-molded TPO plaques as model automotive parts*, „Polymer” 2009, No. 50 (21).
9. Erzurumlu T., Ozelci B., *Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method*, „Materials and Design” 2006, No. 10.
10. Frącz W., Janowski G., *Analiza numeryczna procesu wytwarzania kompozytowego fotela pasażera miejskiego autobusu w technologii RTM*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 5.
11. Frącz W., Janowski G., Bednarz A., *Ocena dokładności modelu RSC w prognozowaniu orientacji włókien w kompozytach typu drewno-polimer*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 12.
12. Frącz W., Janowski G., *Ocena możliwości wtryskiwania kompozytu WPC w produkcji elementów wyposażenia wnętrza autobusu w oparciu o symulacje numeryczne procesu*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2015, nr 7–8.
13. Frącz W., *Optymalizacja skurczu wyprasek z wykorzystaniem wyników symulacji 3D*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 2011, nr 83 (4).
14. Frącz W., Trzepieciński, T., *Optymalizacja i prognozowanie deformacji wyrobów wtryskowych*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2010, nr 16 (6).
15. Friedrich K., Almajid A. A., *Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications*, „Applied Composite Materials” 2013, No. 20 (2).
16. Giboz J., Copponnex T., Mélé P., *Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review*, „Journal of Micromechanics and Microengineering” 2007, nr 17 (6).
17. Griffiths C. A., Dimov S. S., Brousseau E. B., Hoyle R. T., *The effects of tool surface quality in micro-injection moulding*, „Journal of Materials Processing Technology” 2007, No. 189.
18. Griffiths C. A., Dimov S. S., Brousseau E. B., *Microinjection moulding: the influence of runner systems on flow behaviour and melt fill of multiple microcavities*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture” 2008, No. 222 (9).
19. Han X., Yokoi H., *Visualization analysis of the filling behaviour of melt into microscale V-groove during the filling stage of injection molding*, „Polymer Engineering and Science” 2006, No. 46.
20. Holzhauer M., Zippmann V., *Formy do mikrowtryskiwania*, [w:] *Nowoczesne formy wtryskowe. Problemy konstrukcji i użytkowania*, Wydawnictwo Plastech, Warszawa 2001.
21. <https://makuta.com/automotive-micro-molding/> (dostęp: 28.08.2017 r.).
22. Huiping W. G. Z. G. L., Liang G. Y. C., *Heat Response Simulation of Variotherm Injection Molding and Optimization of Mold Structure*, „Journal of Mechanical Engineering” 2009, No. 45 (6).
23. Janowski G., *Charakterystyka mikroformowania wtryskowego. Konwencjonalne formowanie wtryskowe, dobór materiału, wtryskarki w mikroformowaniu wtryskowym*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2017, nr 12.
24. Katoh T., Tokuno R., Zhang Y., Abe M., Akita K., Akamatsu M., *Micro injection molding for mass production using LIGA mold inserts*, „Microsystem Technologies” 2008, No. 14 (9–11).
25. Michaeli W., Gärtner R., *Injection molding of micro-structured surfaces*, „ANTEC conference proceedings” 2004, No. 1.
26. Nian S. C., Yang S. Y., Lin C. H., *Study of the Performance of Rapid Mold Heating/Cooling System for Micro Injection Molding*, [in:] *The Polymer Processing Society Nineteenth Annual Meeting*, Melbourne 2003.
27. Piötter V., Klein A., Mueller T., Plewa K., *Manufacturing of integrative membrane carriers by novel powder injection molding*, „Microsystem Technologies” 2015.
28. Surace R., Trotta G., Bellantone V., Fassi I., *The Micro Injection Moulding Process for Polymeric Components Manufacturing*, „New Technologies – Trends, Innovations and Research” 2012.
29. Tosello G., Gava A., Hansen H. N., Lucchetta G., *Study of process parameters effect on the filling phase of micro-injection moulding using weld lines as flow markers*, „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2010, No. 47 (1).
30. Xiaowei L., Zhiming J., Zhang Y., Zhuang J., Zhou G., Wang L., *Kinematic calculation analysis of micro injection molding machine with double-toggle clamping mechanism based on MATLAB*, 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2012.
31. Xie L., Ziegmann G., *Influence of processing parameters on micro injection molded weld line mechanical properties of polypropylene (PP)*, „Microsystem Technologies” 2009, No. 15.
32. Yang C., Yin X. H., Cheng G. M., *Microinjection molding of microsystem components: new aspects in improving performance*, „Journal of Micromechanics and Microengineering” 2013, No. 23 (9).
33. Yu P. C., Li Q. F., Fuh J. Y. H., Ho T., Li P. W., *Micro injection molding of micro gear using nano-sized zirconia powder*, „Microsystem Technologies” 2009, No. 15.
34. Zhao J., Mayes R. H., Chen G., Chan P. S., *Micro Injection Moulding Process*, *The Polymer Processing Society Eighteenth Annual Meeting*, Guimarães 2002.

**Characteristic of micro injection molding process.
Molds, optimization of the process, application with specification
to automotive industry**

The growing needs for miniaturization of plastic parts motivates to the development of micro injection molding technology. Characteristic features of this process such as: low manufacturing costs, short process duration, the ability to produce details of various dimensions and a wide range of plastic properties allow to mass dissemination of this technology. Research on micro injection molding develops in a very fast time, which gives high hopes for a successful overcoming of the real limitations of this technology. This gives a great perspective on the development of the possibility of using micro injection parts e.g. in the automotive industry.

This paper presents the possibilities of manufacturing molds for micro injection molding. The issue of process optimization has been discussed, taking into consideration the main technological parameters influencing the quality of micro-part. In addition, the possibility of using microdetails, including the automotive industry was presented.

Keywords: micro injection molding, thermoplastics, micro-parts, micro-molds, automotive industry.

Autor:
mgr inż. **Grzegorz Janowski** – Katedra Przeróbki Plastycznej, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska